

引用格式: 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, 25.

长江源区气温降水变化趋势及其对区域干旱的影响

孙可可^{1,2}, 许继军^{1,2}, 许斌^{1,2}, 姚立强^{1,2}, 国小龙³

(1. 长江科学院水资源综合利用研究所, 湖北武汉 430010; 2. 长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430010; 3. 武汉市城市防洪勘测设计院有限公司, 湖北武汉 430014)

摘要:长江源区是受全球气候变化影响的敏感地区。为研究气候变化对其区域干旱的影响, 采用了TFPW-MK趋势检验法, 对20世纪50年代以来长江源区气象站降水量、气温的变化趋势进行了显著性检验, 识别了各季节和月份的变化特点, 采用了标准化降水蒸散发指数(SPEI)作为反映区域干旱的指标, 对年尺度、月尺度长序列变化趋势进行了分析, 通过气温-潜在蒸发相关性分析, 研究了降水、气温变化对区域干旱的影响。结果表明: ①长江源区年降水量增加趋势显著, 各站点年降水增加幅度平均为0.31%/a, 增加的月份主要集中在4月和5月; ②各站点年平均气温、最高气温和最低气温变化均存在显著增加趋势, 平均每年增加1.55%、0.49%和0.59%; ③月尺度气温与潜在蒸发序列间相关性较高(0.8以上), 表明气温是SPEI干旱指标演变的重要驱动因素, 长江源区上游(五道梁、沱沱河站)干旱呈现加剧趋势, 而下游(曲麻莱站)干旱呈现减轻趋势。

关键词:气温; 降水; SPEI干旱指标; TFPW-MK趋势检验法; 长江源区

中图分类号: P331

文献标志码: A

DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2021.09.002

文章编号: 1006-0081(2021)09-0015-06

0 引言

近年来, 气候变暖已成为全球性问题, 由于长江源区地处全球中纬度地区海拔最高的青藏高原区域, 受全球气候变暖影响较为明显。全球变暖将影响水文循环过程, 进而增大水资源系统对气候变化的脆弱性显现, 如降水的时空分布较过去发生变异, 可能会改变河川径流的年内分配, 从而加剧水资源供需之间的矛盾^[1]; 气温增加将加快冰雪融水进程以及冻土退缩等, 从而增加旱涝灾害发生的频率和强度^[2]。

本文采用TFPW-MK趋势检验方法^[3-7], 针对长江源区及周边的8个基本气象站点, 计算了近60 a来降水量、气温等气象要素变化趋势, 分析了年尺度以及各季节和月份气象要素的变化趋势及分布特征, 并选择标准化降水蒸散发指数SPEI作为区域干旱指标, 分析了气温降水变化对区域干旱的影响。

1 数据来源

本文研究范围为通天河直门达水文站以上的长江源区, 依据的气象数据包括: 降水量、气温、潜在蒸发等多年逐日序列, 其中降水量、气温数据为分布在长江源区及周边8个气象站的逐日观测值, 序列长度为1950~2013年, 因建站时间早晚等因素, 数据序列长度不尽相同, 最长的有60 a, 最短的为47 a。长江源区及周边气象水文站点位置分布见图1。

2 研究方法

2.1 TFPW-MK趋势分析方法

MK(Manna-Kendall)检验方法, 是世界气象组织推荐的时间序列非参数检验方法, 在气象水文序列的趋势分析中得到广泛应用。王跃峰等^[3]采用TFPW-MK法分析了闽江流域不同时间尺度下径流

收稿日期: 2021-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502404); 长江科学院院级创新团队项目(CKSF2017061/SZ); 国家自然科学基金项目(51809009)

作者简介: 孙可可, 男, 工程师, 主要从事干旱风险研究及流域水资源管理与规划工作。E-mail: kewater@yeah.net

通讯作者: 许斌, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事变化环境下的水文水资源研究工作。E-mail: taibaidugu@163.com

演变趋势,并对MK、PW-MK和TFPW-MK等3种方法的趋势结果进行了对比。

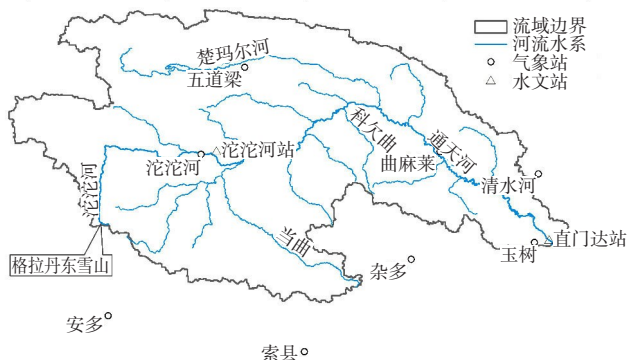


图1 长江源区气象水文站点位置分布

MK检验方法的主要参数为统计量S,计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:S为统计量, x_i 为平稳序列, $\text{sgn}(\theta)$ 为自定义函数, $\theta = x_j - x_i$ 。当 $n \geq 10$ 时,统计量S近似服从正态分布,其均值和方差分别为

$$E(S) = 0, V(S) = n(n+1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

正态分布的统计量 Z_{MK} 计算公式为

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E(S)$ 为序列均值, $V(S)$ 为序列方差, Z_{MK} 为正态分布的统计量。

TFPW-MK (Mann-Kendall test with trend-free pre-whitening)方法在MK的基础上进行自由预置白处理,以消除序列自相关性对于趋势显著性的影响,计算步骤为:首先计算趋势坡度参数 β ,见式(5);然后去除数据中的趋势项,形成不含趋势项的序列 Y_t ,见式(6);计算序列 Y_t 的一阶自相关系数 r_1 ,并进行显著性检验;如果 r_1 通过检验则采用 Y_t 进行趋势分析,否则采用 Y_t, Y_t' 进行趋势分析。其中 Y_t 为采用PW-MK方法时的检验项, Y_t' 为采用TFPW-MK方法时的检验项。

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall i < j \quad (5)$$

$$Y_t = x_t - \beta t \quad (6)$$

$$Y_t = Y_t - r_1 Y_{t-1} \quad (7)$$

$$Y_t'' = Y_t + \beta t \quad (8)$$

式中: β 为趋势坡度参数,Median为计算中位数函数, x_i, x_j, x_t 为样本序列值, r_1 为序列一阶自相关系数, Y_t, Y_t', Y_t'' 为构造的不含趋势项序列, i, j, t 为序列序号。

2.2 干旱指数计算方法

选取标准化降水蒸散发指数(SPEI)为干旱指标,分析降水气温等变化对区域干旱的影响。该指标根据降水和潜在蒸发的差值偏离平均状态的程度来反映区域干旱状况^[8-10],其计算公式如下:

$$D_i = P_{ei} - ET_i \quad (9)$$

式中: D_i 为月降水量和潜在蒸发量的差值,mm; P_{ei} 为月降水量,mm; ET_i 为月潜在蒸发量,可根据Penman-Monteith公式计算。对 D_i 序列进行标准正态分布转换可得到SPEI值,根据计算的需要,可计算特定时间尺度(如1个月、3个月等)的区域干旱指数,本文以1个月为计算尺度。

3 降水量变化趋势

采用TFPW-MK趋势检验方法,对长江源区及周边8个气象站点近60a的年、月尺度降水序列变化进行显著性检验,显著性水平分别取0.10和0.05,计算结果见表1。可以看出,长江源区总体的年、月降水变化存在增加趋势,7个站点的年降水量变化通过0.10显著性检验,其中五道梁、曲麻莱、安多3个站点通过0.05显著性检验;各站点的年降水变化坡度介于0.001~0.005之间,平均增加幅度为0.31%/a。降水变化的月份主要集中在春季3~5月,尤其是4、5月份降水增加趋势较为显著,而夏季、秋季和冬季的月降水变化相对不显著,部分气象站月降水存在一定的减少趋势。

在降水变化的空间分布上,呈现出流域上游气象站年降水变化坡度大于下游站点的特点。长江源区中上游的沱沱河站、五道梁站、曲麻莱站年降水变化坡度分别为0.004,0.005和0.004,而下游地区玉树站、清水河站的变化坡度分别为0.001和0.002。

五道梁、沱沱河、曲麻莱年降水量分别通过0.05,0.10和0.05的显著检验,存在显著增加趋势,其中5、6月降水增加对于年降水的变化趋势贡献最大;玉树站年降水无显著变化趋势。对于6月,上游五道梁和沱沱河等站降水均存在趋势增加趋势,而中下游的曲麻莱、玉树站无显著变化,见图2~3。

表1 长江源区气象站点近60 a降水年、月平均变化坡度

季节	月份	五道梁	沱沱河	曲麻莱	安多	杂多	玉树	清水河	索县
春季	3	-0.001	0.007 ⁺⁺	0	0.013 ⁺	0.005	0.012	0.004 ⁺⁺	0.003 ⁺
	4	0.005	0.016 ⁺⁺	0.01 ⁺	0.02 ⁺⁺	0.013 ⁺⁺	0.015 ⁺⁺	0.007	0.005
	5	0.014 ⁺⁺	0.017 ⁺⁺	0.005 ⁺	0.023 ⁺⁺	0.012 ⁺⁺	0.003	0.008 ⁺⁺	0.011 ⁺⁺
夏季	6	0.009 ⁺⁺	0.008 ⁺⁺	0.004	0.006	-0.001	-0.001	0.002	-0.001
	7	0.005	0.001	0.005	0.002	0.004 ⁺	0	0	0
秋季	8	0.003 ⁺⁺	0.001	0.002	-0.001	-0.003 ⁻	-0.001	-0.001	-0.002
	9	0.001	0.004	-0.001	0.008 ⁺	0	-0.003 ⁻	0	0.002
	10	0.008	0.001	0.011 ⁺⁺	-0.004	0.002	0.008 ⁺	0.006	0.01 ⁺
冬季	11	0.009 ⁺	0.029 ⁺⁺	0.01	0.006	0.001	0.007	0	0.008
	12	-0.004	0.005	0.004	0.001	0.002	-0.002	-0.004	0.007
	1	0.003	0.008 ⁺⁺	0.021	0.008	0.007	-0.008	0.005	-0.001
	2	0.011	0.006 ⁺	0.006	0.005	0.013 ⁺⁺	0.004 ⁺	0.007	0.013 ⁺⁺
年降水		0.005 ⁺⁺	0.004 ⁺	0.004 ⁺⁺	0.005 ⁺⁺	0.002 ⁺	0.001	0.002 ⁺	0.002 ⁺

注：“+”、“++”分别表示通过0.1和0.05显著性检验，呈增加趋势；“-”表示呈0.1显著减少趋势，表2同。

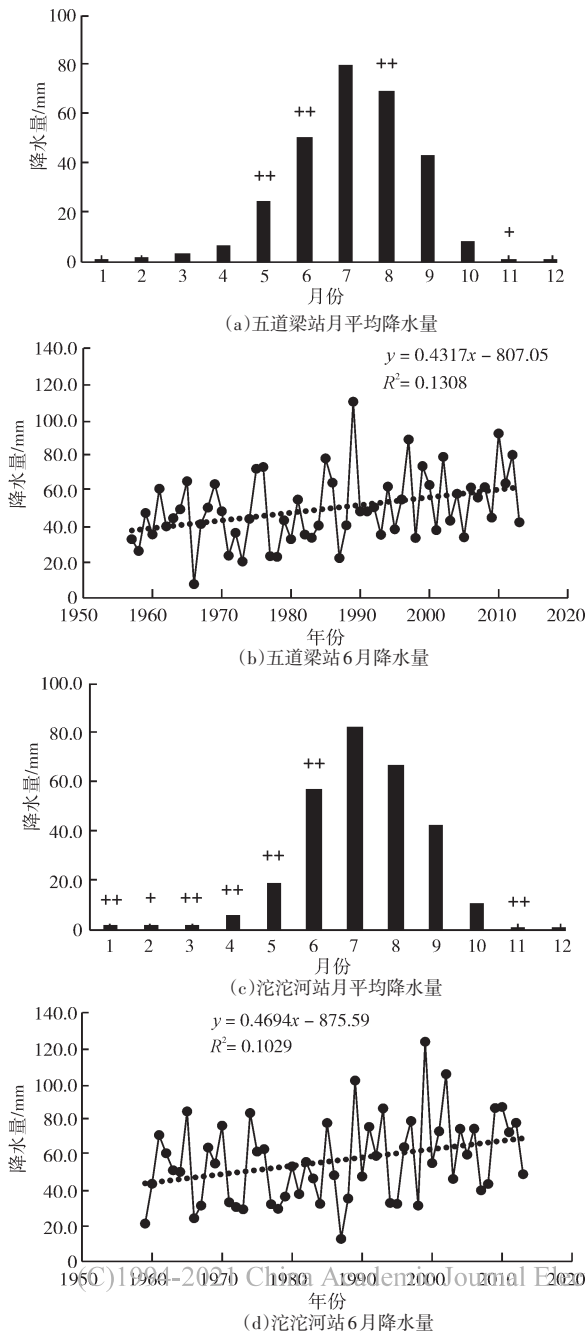


图2 上游气象站降水年内分布及6月降水变化趋势

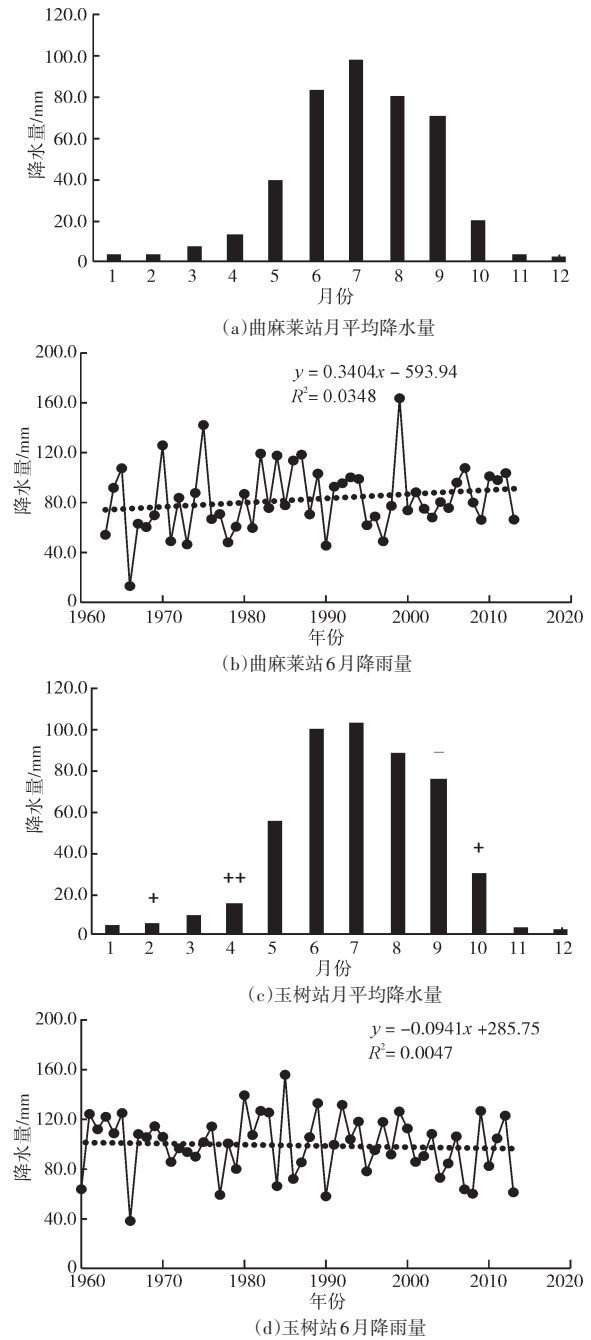


图3 下游气象站降水年内分布及6月降水变化趋势

4 气温变化趋势

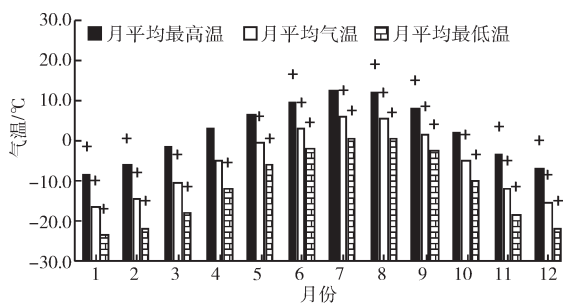
气温是影响降水、蒸发变化的重要气象因子，近年来针对气温变化趋势及其对气象水文条件的影响进行了大量的研究^[11]。这里同样采用TFPW-MK趋势检验方法，对长江源区及周边8个气象站的1958~2013年的日平均气温序列变化趋势进行了分析，计算结果见表2。可以看出，长江源区年平均日均气温、最高气温、最低气温变化均通过0.05显著性检验，增加趋势十分显著。其中最高气温均值介于2.4℃和11.9℃之间，平均每年约增加0.49%；平均

表2 长江源区气象站点近60a气温均值及变化坡度

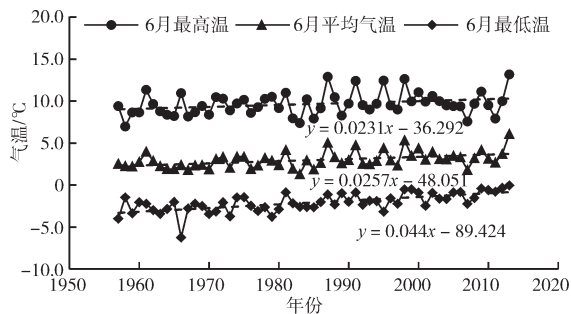
站点	年平均日最高气温		年平均日均气温		年平均日最低气温	
	均值/℃	变化坡度	均值/℃	变化坡度	均值/℃	变化坡度
五道梁	2.4	0.009**	-5.2	0.006**	-11.2	0.004**
沱沱河	4.6	0.004**	-3.8	0.008**	-10.9	0.004**
曲麻莱	5.9	0.008**	-1.9	0.021**	-8.5	0.004**
安多	4.9	0.004**	-2.5	0.014**	-8.7	0.006**
杂多	8.5	0.002**	0.7	0.047**	-5.3	0.008**
玉树	11.9	0.002**	3.4	0.008**	-3.1	0.011**
清水河	4.0	0.007**	-4.5	0.006**	-11.2	0.003**
索县	9.5	0.003**	1.9	0.014**	-4.2	0.007**

气温均值介于-5.2℃和3.4℃之间,平均每年约增加1.55%;最低气温均值介于-11.2℃和-3.1℃之间,平均每年约增加0.59%。各站点的平均气温增加幅度最为明显,最高气温、最低气温变化相对较小。气温变化坡度最大的站点为曲麻莱、安多和索县等站。

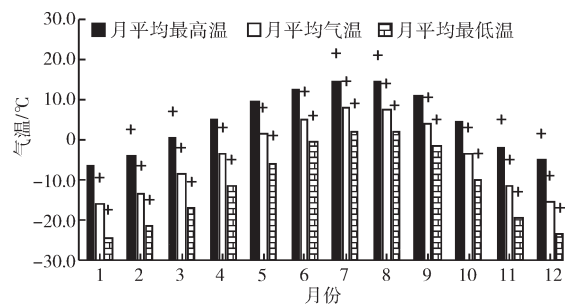
如图4~5所示,五道梁、沱沱河、曲麻莱、玉树等站各年尺度平均气温变化均通过0.05显著性检验,存在显著增加趋势。以6月为例,除五道梁站月平



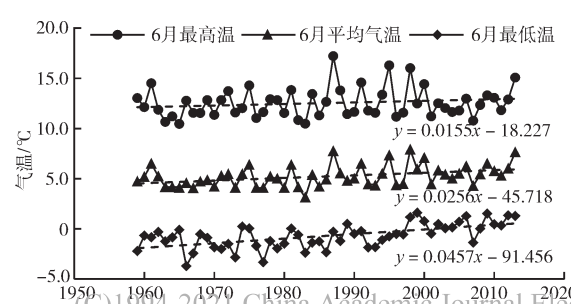
(a)五道梁站气温变化



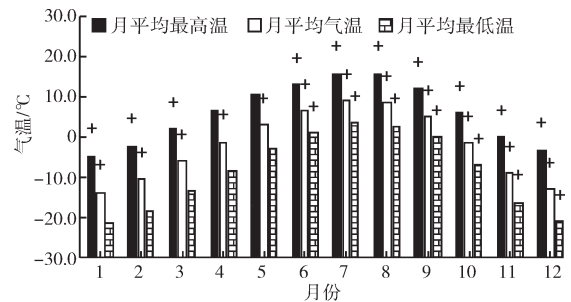
(b)五道梁站气温变化



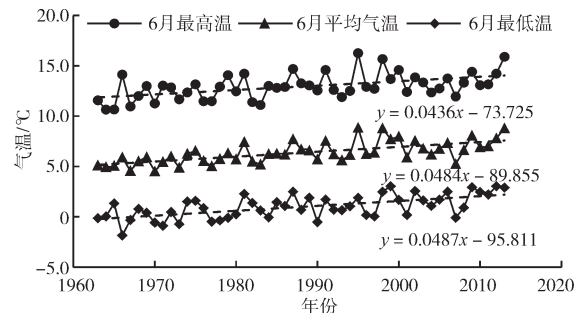
(c)沱沱河站气温变化



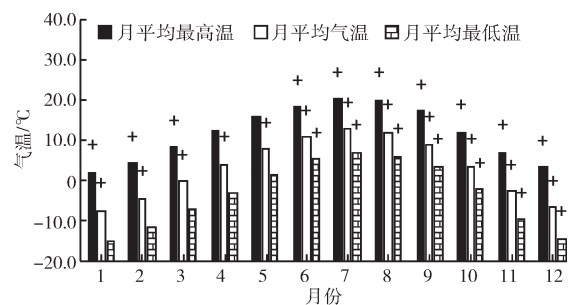
(d)沱沱河站气温变化



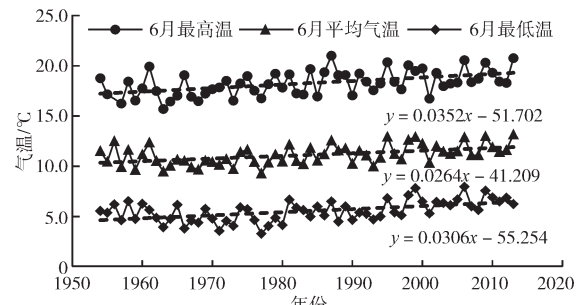
(a)曲麻莱站气温变化



(b)曲麻莱站气温变化



(c)玉树站气温变化



(d)玉树站气温变化

图4 上游气象站月平均气温、6月气温变化趋势

图5 下游气象站月平均气温、6月气温变化趋势

注:“+”表示通过0.05显著性检验,呈增加趋势。

均最低气温无明显变化趋势外,各站点的6月份平均气温、最高气温、最低气温均呈显著增加趋势。

5 降水气温变化对区域干旱的影响

5.1 气温对潜在蒸发量的影响

以五道梁、沱沱河、曲麻莱为长江源区代表性站点,分析1958~2013年月平均气温与月潜在蒸发量的相关关系,结果见图6所示。可以看出,气温是潜在蒸发量变化的重要驱动因素,二者之间相关系数在0.8以上。随着近几十年平均气温快速增高,潜在蒸发量将呈现显著增加趋势,而降水量也呈现增加趋势,由于干旱指数SPEI为降水量和潜在蒸发量的差值,在降水、蒸发均增加的同时,有必要分析其变化幅度,便于研究其对干旱指数的主导作用。

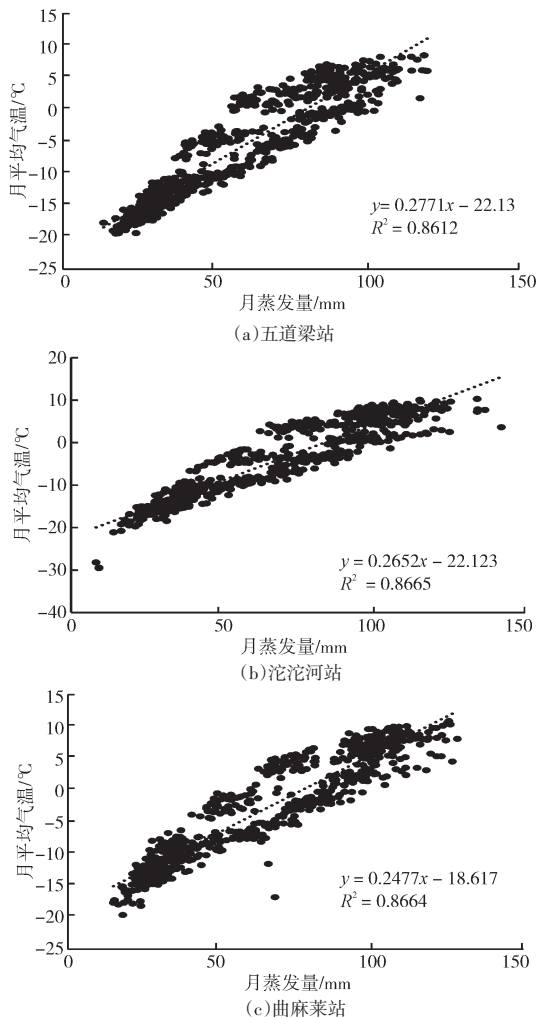


图6 月平均气温~潜在蒸发量相关关系

5.2 干旱指数计算及其变化特征

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
 选取五道梁站、沱沱河站、曲麻莱站为长江源区代表性站点,以1958~2013年降水、潜在蒸发数据

为输入,采用2.3节干旱指数计算方法,得到近几十年月尺度干旱指数SPEI,以SPEI小于0为判别标准,计算年尺度、月尺度干旱累积烈度,作为衡量区域旱情年际、年内变化的依据,结果如表3和图7所示。可以看出,3个站点年累积干旱烈度呈现不同的变化趋势,五道梁站显著增加、曲麻莱站显著降低,而沱沱河站无明显变化。

表3 长江源区代表性站点累积干旱烈度年内变化特征

月份	五道梁站		沱沱河站		曲麻莱站	
	平均干旱烈度	年变化坡度/%	平均干旱烈度	年变化坡度/%	平均干旱烈度	年变化坡度/%
1	0.41	1.37	0.41	0.88	0.43	0.19
2	0.43	1.40	0.43	0.80	0.44	0.69
3	0.42	0.85	0.46	0.27	0.44	0.32
4	0.46	0.88	0.44	0.36	0.42	0.29
5	0.42	-0.70	0.44	-0.69	0.39	-0.82
6	0.41	-0.51	0.43	-0.64	0.42	-1.00
7	0.43	-0.10	0.40	0.42	0.40	-0.11
8	0.41	-0.16	0.41	-0.10	0.41	-0.06
9	0.44	0	0.41	-0.40	0.40	-0.66
10	0.43	-0.48	0.41	-0.12	0.41	-0.64
11	0.44	-0.42	0.43	-0.76	0.41	-1.08
12	0.43	0.85	0.43	-0.15	0.38	-1.24
合计	5.13	2.93	5.10	0.11	4.95	-4.12

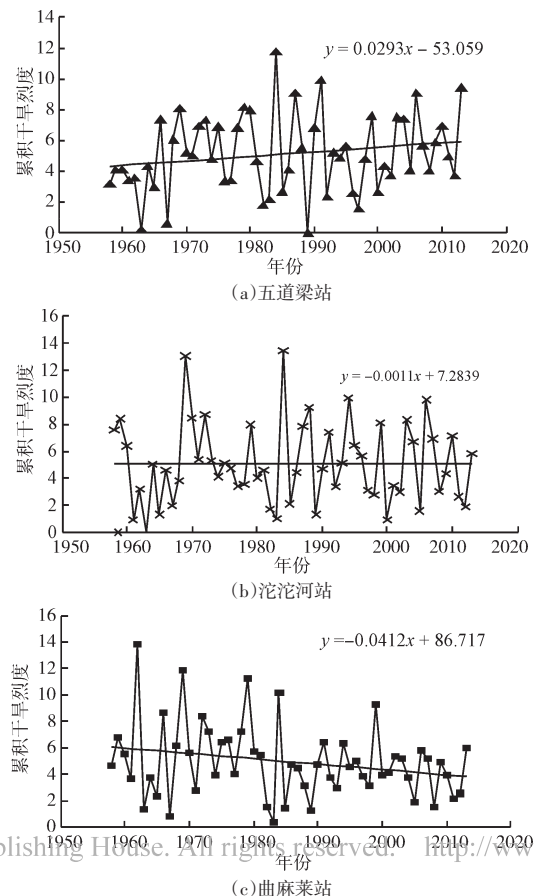


图7 长江源区代表性站点累积干旱烈度年际变化特征

通过降水、气温、潜在蒸发及干旱指数的变化趋势分析可知:3个代表性站点近几十年降水、气温、潜在蒸发均呈现一定的增长趋势。由于五道梁站潜在蒸发增加(气温升高)占主导作用,在降水量增加趋势的背景下,干旱累积烈度呈现逐年增加趋势;沱沱河站降水量增加、潜在蒸发增加(气温升高)的幅度较为接近,因此干旱累积烈度无显著变化趋势;曲麻莱站降水增加趋势占主导作用,在潜在蒸发增加(气温升高)的背景下,干旱累积烈度呈降低趋势。

6 结论

本文采用TFPW-MK趋势检验方法,对长江源区主要气象水文站点近几十年的降水、气温进行了显著性检验。由检验结果可知,长江源区整体上气温变化的增加趋势最为显著,由此带来潜在蒸发快速增加,降水增加幅度相对较小。具体的:对于降水而言,上游地区五道梁、沱沱河等站6月份降水存在显著增加趋势,而下游曲麻莱、玉树站降水无显著变化;对于气温而言,各站点6月气温均存在显著增加趋势。由于长江源区的河川径流以冰川融雪以及区间降水补给为主,气温上升引起的冰川融水加剧将引起径流量的增加,在一定时期内带来区域水资源量的增长。

当采用SPEI指标反映区域干旱程度时,由于SPEI为降水和潜在蒸发的差值,因此干旱变化趋势取决于降水、潜在蒸发的相对变化幅度,即:降水变幅占主导作用时,干旱呈现减轻趋势,潜在蒸发变幅占主导作用时,干旱呈现加剧趋势。为研究气温变化对区域干旱的影响,本文分析了月平均气温-月潜在蒸发量的相关关系。由代表性站点计算结果可知,月平均气温与潜在蒸发的长序列间相关性系数均在0.8以上,即平均气温是长江源区干旱演变的重要驱动因素。由1958~2013年月尺度、年尺度SPEI指数计算结果可知,由于气温和潜在蒸发增长幅度相对降水变幅更高,长江源区干旱情况呈现

总体加剧趋势,且存在空间分布上的差异性,即:上游地区(五道梁、沱沱河站)增加趋势,下游地区(曲麻莱站)下降趋势。

由于长江源区范围尺度较大,选取的气象、水文站点地区分布较为不均,下一步研究需要重点关注典型站点分析结果的区域代表性。

参考文献:

- [1] 许继军,杨大文,雷志栋,等.长江流域降水量和径流量长期变化趋势检验[J].人民长江,2006,37(9):63-67.
- [2] 徐明,马超德.长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [3] 王跃峰,陈莹,陈兴伟.基于TFPW-MK法的闽江流域径流趋势研究[J].中国水土保持科学,2013,11(5):96-102.
- [4] 刘志斌,黄粤,刘铁.开都河源区径流变化的气候响应[J].干旱区研究,2020,37(2):418-427.
- [5] ZHANG X B, HARVEY K D, HOGG W D, TED R Y. Trends in Canadian streamflow[J]. Water Resources Research, 2001, 37(4):987-998.
- [6] JIE G, MARK W, FU X D. Spatiotemporal distribution of snow in eastern Tibet and the response to climate change[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121:1-9.
- [7] SHIFTEH B, AZADEH E, HOSSEIN T. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran[J]. Atmospheric Research, 2012, 113:1-12.
- [8] 尹军.流域干旱还原理论与方法研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [9] 陈少丹,张利平,汤柔馨.基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析[J].农业工程学报,2017,33(24):126-132.
- [10] YE L, SHI K, ZHANG H R, et al. Spatio-temporal analysis of drought indicated by SPEI over northeastern China[J]. Water, 2019, 11(5):1-18.
- [11] 徐宗学,张玲,黄俊雄,等.西藏地区气温、降水及相对湿度的趋势分析[J].气象,2007,33(7):83-88.

(编辑:唐湘茜)

(下转第25页)

Rain data comparative analysis of 2 gauges with different resolutions at Lushui Reservoir (Bashang) Station

QU Lanlan¹, YI Xiaoli², CHEN Yajian¹, DENG Kuiyang¹

(1. Chibi Branch of Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Chibi 437300, China; 2. Wanzhou Branch of Upper Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wanzhou 404000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of precipitation observation results and provide strong data support for flood prevention and forecasting, based on the precipitation observation data of 2017~2019 measured synchronously by two rain gauges with different resolutions at Lushui Reservoir (Bashang) Station, the comparative analysis is carried out from the aspects of instrument structure performance, annual precipitation, monthly precipitation, daily precipitation and precipitation days. The influence of different resolution rain gauges on rainfall observation results is studied. The final analysis results show that when the rainfall intensity is large, the rainfall observation data of 20 cm JDZ05-1 tipping bucket rain gauge with resolution of 0.5 mm is better representative, on the contrary, the rainfall observation data of JFZ-01 digital rain gauge with resolution of 0.1 mm is better representative.

Key words: rain gauge with different resolution; precipitation; observation accuracy; comparative analysis; Lushui Reservoir

~~~~~  
(上接第20页)

## Variation trend of temperature and precipitation in source region of Yangtze River and its influence on regional drought

SUN Keke<sup>1,2</sup>, XU Jijun<sup>1,2</sup>, XU Bin<sup>1,2</sup>, YAO Liqiang<sup>1,2</sup>, GUO Xiaolong<sup>3</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water Resources & Eco-Environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Wuhan City Flood Control Survey and Design Institute Limited Company, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** The source region of the Yangtze River is a sensitive region affected by global climate change. In order to study the impact of climate change on regional drought, in this paper, TFPW-MK trend test method is used to test the significance of the variation trend of precipitation and temperature of the meteorological stations in the source region of the Yangtze River since the 1950s. The seasonal and monthly variation characteristics are identified. The standardized evapotranspiration index (SPEI) is used as an index to reflect the regional drought. Through the correlation analysis between temperature and potential evaporation, the influence of precipitation and temperature on regional drought is studied. The results show that: the annual precipitation in the source region of the Yangtze River increases significantly, with an average increase rate of 0.31%/a, and the increasing months are mainly concentrated in April and May; the annual average temperature, maximum temperature and minimum temperature increase significantly, with an average annual increase of 1.55%, 0.49% and 0.59% for the stations. The correlation between temperature and potential evaporation is high and temperature is an important driving factor for the evolution of SPEI drought index. The upper reaches (Wudaoliang and Tuotuohe) of the source region of the Yangtze River shows an increasing trend of drought, while the lower reaches (Qumalai and Yushu) shows a decreasing trend of drought.

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

**Key words:** temperature; precipitation; SPEI drought index; TFPW-MK trend test method; source area of Yangtze River