

李玲萍, 卢泰山, 刘明春, 等. 基于标准化流量指数(SDI)的石羊河流域水文干旱特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 24-33.

基于标准化流量指数(SDI)的石羊河流域 水文干旱特征

李玲萍^{1,2}, 卢泰山³, 刘明春², 胡丽莉¹, 王素萍¹

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 武威市气象局, 甘肃 武威 733000; 3. 武威市凉州区水务局 金塔河水利管理处, 甘肃 武威 733000)

摘要: 利用石羊河流域8个水文站1961—2017年逐月实测流量数据和4个气象站点的气象观测资料, 采用标准化流量指数(SDI)、游程理论来获得干旱事件的特征指标, 分析了石羊河流域水文干旱演变特征, 并采用与降水量、最高气温、最低气温、平均气温、蒸发量的相关性来分析石羊河流域SDI的影响因素。结果表明: 1961—2017年石羊河流域干旱历时、干旱烈度和干旱强度的变化不是很一致, 流域水文干旱历时20世纪70年代最长, 80年代最短; 干旱烈度全流域90年代最强, 烈度最弱出现在80年代; 干旱强度全流域60年代最强, 80年代强度最弱; 石羊河流域及流域中、西部年SDI变化总体上表现为在波动中呈增加趋势, 西部增加幅度最大, 中部增加幅度很小, 流域东部年SDI在波动中呈减小趋势; 石羊河全流域及流域东、中和西部年及四季干旱发生频次总体都是中旱和重旱频次最多, 四季水文干旱发生频率最高的是春季, 冬季干旱发生频率最低; 从流域不同地段看, 水文干旱发生的频率流域东部最高; 构建的SDI临界值识别出的主要水文干旱事件和实际干旱事件基本一致, 干旱等级也较一致, 说明使用SDI能够较好地监测到石羊河流域干旱年份及干旱等级; 石羊河流域年SDI值与最高气温、平均气温和蒸发量呈负相关, 与降水量和平均气温呈正相关。

关键词: 石羊河流域; 标准化流量指数; 临界值; 水文干旱

文章编号: 1000-694X(2020)04-024-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00010

中图分类号: P467

文献标志码: A

0 引言

干旱通常指长期无降水或降水偏少而造成水分收支或供求失衡形成水分亏缺^[1], 对工农业生产和生态环境具有严重的影响。全国每年因干旱造成的损失占各种自然灾害的15%以上, 每年受旱面积约占各种气象灾害受灾面积的60%^[2]。进入21世纪以来, 全球气候变化异常以及人类活动等因素导致干旱事件的发生更加频繁^[3-6], 干旱的问题已经成为众多国内外学者关注的焦点^[7-13]。干旱通常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[14-17]。水文干旱影响因素较气象、农业、社会经济等干旱更加复杂, 程度更深、后果更严重^[18-21]。

石羊河流域是中国水资源开发程度最高的内陆河流域之一, 也是干旱区典型的水资源脆弱带。

近50年来, 在气候变暖^[22-23]和人类活动的双重干扰下, 流域自然生态环境逐步恶化, 引发了水资源短缺、用水矛盾激化、植被退化、生态恶化等一系列生态环境问题, 水文干旱问题更加突出, 对绿洲的生存和繁荣发展影响极大。近年来, 针对石羊河流域水文特征, 各学者开展了大量相关研究, 发现内陆河流流量的丰枯主要受祁连山区汛期降水的影响, 汛期流量的稳定性主要是源于祁连山区降水稳定, 非汛期降水形成的冰雪消融也起到了一定的调节作用^[24]; 石羊河流域年流量呈减少趋势, 流量与降水量呈显著的正相关, 与蒸发量呈显著的负相关^[25]; 流域内最大的河流西营河径流量呈减少趋势, 冬夏季减幅大于秋春季^[26]。关于石羊河流域水文干旱, 王劲松等^[27]构建径流量Z指数, 并作为径流干旱指

收稿日期: 2019-10-23; 改回日期: 2020-01-05

资助项目: 中国干旱气象科学研究基金项目(IAM201812); 武威市市列科技计划项目(WW190102)

作者简介: 李玲萍(1977—), 女, 甘肃定西人, 高级工程师, 主要从事天气气候变化及灾害性天气预报研究。E-mail: wwqxjllp@163.com

通信作者: 卢泰山(E-mail: lts397@126.com)

数,对河西部分河流旱涝等级进行划分。

就目前研究来看,单一的水文干旱指标难以满足各行业的需求,且研究仅限于某条河流或河流的某个点、段,对整个流域及不同地理区域出山口流量干旱发生的定量指标研究及演变规律研究报道较少。因此本文利用石羊河流域8条河流1961—2017年逐月流量资料,采用标准化流量指数研究出比较符合当地实际的水文干旱定量指标,揭示气候变化背景下石羊河流域水文干旱变化特点,为石羊河流域干旱预测和水文干旱评价系统完善提供参考依据,同时在有效应对气候变化、保护和合理开发水资源、保护生态环境和绿洲农业可持续发展等方面有着理论和实践上的重要意义。

1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北麓,37°07′—39°27′N,101°22′—104°04′E。东南与甘肃省白银、兰州两市相连,西北与甘肃省张掖市毗邻,西南紧靠青海省,东北与

内蒙古自治区接壤,河流全长300余km,流域面积4.16万km²。全流域可分为南部祁连山地、中部走廊平原区、北部低山丘陵区及荒漠区四大地貌单元。南部祁连山高寒半干旱半湿润区,海拔2000~5000m,年降水量300~600mm,年平均气温2~6℃;中部走廊平原温凉干旱区,海拔1500~2000m,年降水量150~300mm,年平均气温6~8℃;北部温暖干旱区,海拔1300~1500m,年降水量小于150mm,年平均气温大于8℃。石羊河水系发源于祁连山,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等8条河流及多条小沟小河组成,8条河流出山口均建有水文站(图1)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

利用石羊河流域8个水文站(西部:插剑门、沙沟寺;中部:四沟嘴、南营水库、杂木寺;东部:黄羊

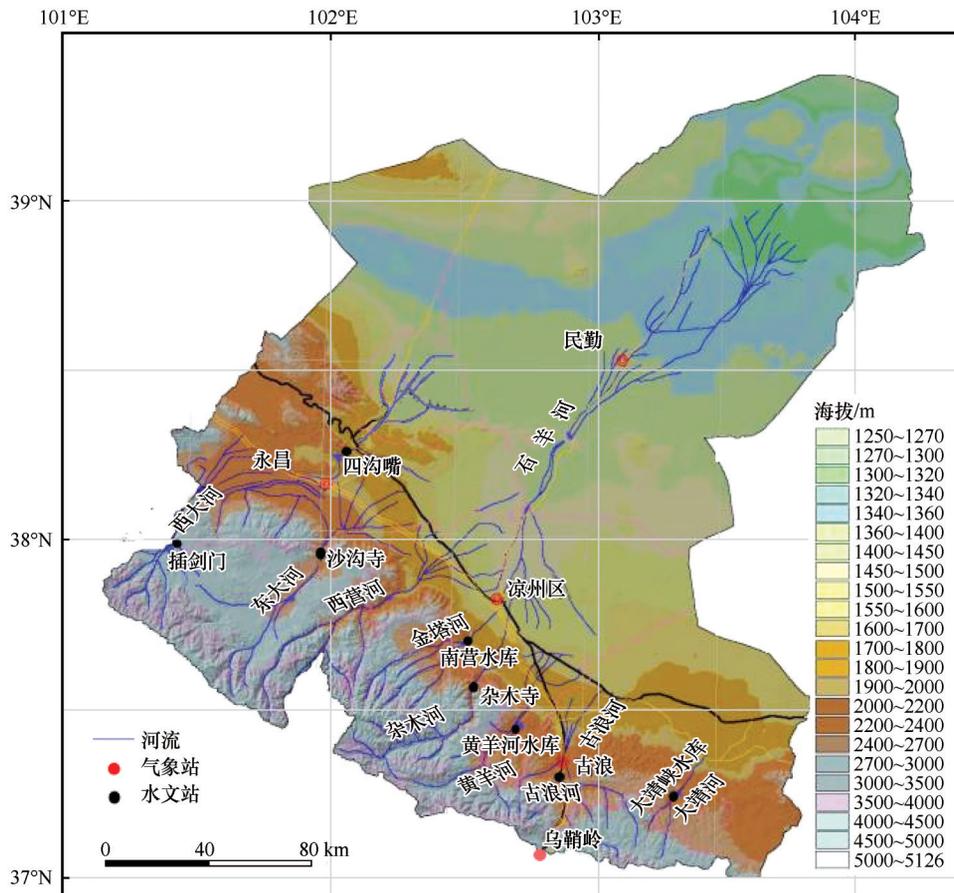


图1 石羊河流域地理分布

Fig.1 Geographic distribution over Shiyang river basin

河水库、大靖峡水库、古浪)1961—2017年逐月实测流量数据和石羊河流域4个气象站点(乌鞘岭、古浪、凉州、永昌)的平均气温、最高气温、最低气温、降水量、蒸发量气象观测资料。插剑门、沙沟寺2013—2017年逐月流量资料为插值,具体插值方法为用2013年以前插剑门逐月流量资料和距离插剑门最近的水文站点四沟嘴2013年以前流量资料建立线性方程,计算出插剑门2013—2017年逐月流量资料,再用2013年以前沙沟寺逐月流量资料和距离最近的水文站点插剑门2013年以前流量资料建立线性方程,计算沙沟寺2013—2017年逐月流量资料。从统计意义上看,这样长的时间序列足够获得比较可信的趋势结果。

2.2 研究方法

采用标准化流量指数 *SDI*、游程理论来获得干旱事件的特征指标,分析石羊河流域的水文干旱特征,*SDI*具有多时间尺度的特征,本文选用3个月和12个月时间尺度的 *SDI* 作为研究尺度,*SDI3* 反映年内短期干旱特征,*SDI12* 反映长期的干旱变化特征。用3—5月、6—8月、9—11月、12月至翌年2月分别代表春季、夏季、秋季、冬季。年尺度为1—12月。

2.2.1 标准化流量指数 *SDI*

标准化流量指数 *SDI* 计算的基础资料是水文监测断面的历史月流量,标准化流量指数就是在计算出某时段内流量的 Γ 分布概率后,再进行正态标准化处理求得 *SDI* 值,*SDI* 具体计算步骤同标准化降水指数 *SPI*^[28],最后用标准化流量累积频率分布来划分干旱等级。

假设某时段流量为随机变量 χ , 则其 Γ 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0 \quad (1)$$

式中: $\beta > 0$, $\alpha > 0$ 分别为尺度和形状参数。 β 和 α 可用极大似然估计方法求得:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2)$$

$$\beta = \bar{x} / \alpha \quad (3)$$

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (4)$$

式中: x_i 为实测流量样本; \bar{x} 为实测流量的平均值。

确定概率密度函数中的参数后,对于某一时段的流量 x_0 , 可求出随机变量 $x < x_0$ 事件发生的概率为:

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (5)$$

利用数值积分可以计算用公式(1)代入公式(5)后的时间概率近似估计值。

对 Γ 分布概率进行正态标准化处理,即将公式(5)求得的概率值代入标准化正态分布函数,即:

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-z^2/2} dz \quad (6)$$

对公式(6)进行近似求解可得:

$$Z = \left[t - \frac{(c_2 t + c_1)t + c_0}{((d_3 t + d_2)t + d_1)t + 1.0} \right] \quad (7)$$

式中: $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F}}$, F 为公式(5)求得的概率,当 $F >$

0.5 时, $F=1.0-F$, $S=1$, 当 $F < 0.5$ 时, $S=-1$ 。

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

最后求得的 Z 值就是此标准化流量指数。

计算石羊河流域 *SPI* 与 *SDI* 的 Pearson 相关系数,发现 *SDI* 与 *SPI* 的相关系数为 0.59,通过信度为 0.01 检验,反映了流量与降水具有很好的相关,所以标准化流量指数在石羊河流域是适用的。采用最小二乘法线性倾向趋势分析石羊河流域年 *SDI* 变化趋势,并通过 Pearson 相关系数检验信度。

根据《GB/T 22482-2008 水文情报预报规范》中对流量的丰枯等级划分标准(方法一)、《黄土高原的水文干旱划分等级》(方法二)和《基于距平径流量的丰枯等级法》(方法三)3种分类标准^[29](表1)对石羊河流域实测流量资料进行等级划分(表2)。3种不同的划分方法得出的百分数每个干旱等级中有两两差距很小,甚至相等,因此取其平均值作为石羊河流域各干旱等级出现情况的百分比,再根据干旱等级出现的频率依次累加则可得到干旱等级的累积频率,特旱的累积频率为7%,重旱的累积频率为33%,中旱的累积频率为74%,轻旱的累积频率为86%,无旱的累积频率为100%。

将计算得到的 *SDI* 序列值绘制频率累积曲线(图2),在图2中找到对应累积频率的 *SDI* 值即为干旱等级的划分界限,最终确定石羊河流域以 *SDI* 为干旱指数的水文干旱等级划分标准(表3)。

表 1 不同方法水文干旱等级划分标准
Table 1 Standard for hydrological drought classification by different methods

等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
方法一	$P > 20\%$	$10\% < P \leq 20\%$	$-10\% < P \leq 10\%$	$-20\% \leq P < -10\%$	$P < -20\%$
方法二	$Q \geq Q_0 + 1.17\delta$	$Q_0 + 0.33\delta \leq Q < Q_0 + 1.17\delta$	$Q_0 - 0.33\delta \leq Q < Q_0 + 0.33\delta$	$Q_0 - 1.17\delta \leq Q < Q_0 - 0.33\delta$	$Q < Q_0 - 1.17\delta$
方法三	$P \geq 30\%$	$10\% \leq P < 30\%$	$-10\% \leq P < 10\%$	$-30\% \leq P < -10\%$	$P < -30\%$

Q 为段径流量, Q_0 为平均径流量, δ 为径流系列均方差, P 为距平百分率, $P = (Q - Q_0) / Q_0 \times 100\%$ 。

表 2 石羊河流域干旱等级百分比
Table 2 Drought percentage of Shiyang River Basin

等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
方法一	5.26	17.54	47.37	29.82	0.00
方法二	15.79	17.54	28.07	28.07	10.53
方法三	15.79	7.02	47.37	19.30	10.53
平均值	12	14	41	26	7

表 3 标准化流量指数(SDI)干旱分级
Table 3 Hydrologic drought degree based on SDI

等级	类型	SDI
0	无旱	$SDI \geq 1.21$
1	轻旱	$0.7 \leq SDI < 1.21$
2	中旱	$-0.59 \leq SDI < 0.7$
3	重旱	$-1.37 \leq SDI < -0.59$
4	特旱	$SDI < -1.37$

2.2.2 游程理论

一般而言,在一个有限取值序列中,满足一定条件的同一符号的一个连串称之为一个“游程”,一个游程中同一符号出现的次数称之为游程的长度^[30]。干旱一般可以用干旱持续时间、干旱程度和干旱强度 3 个特征来表示^[31-32],而这可以用游程理论来得到。因此,本文中对于水文干旱的识别也是

采用游程方法,即对于一个有限的样本序列,满足一定条件下(阈值)的同一符号串称之为“游程”。一个游程中连续出现同一符号的次数称之为游程长度。阈值水平可根据干旱分类标准选取,干旱指标小于阈值时出现负游程,即发生一次干旱,游程长度为干旱历时(单位为月),累积负游程的面积就是本次干旱事件的严重程度,也就是干旱烈度,干旱烈度与干旱历时的比值为干旱强度。根据表 3 的水文干旱划分等级,将 SDI 值小于 1.21 的月份记为干旱月。

3 结果

3.1 水文干旱历时、烈度和强度演变特征

石羊河流域 1961—2017 年干旱历时平均为 10.3 个月,干旱历时最长出现在 20 世纪 70 年代,平均持续时间是 12 个月,最短出现在 80 年代和 2011—2017 年,持续时间为 9.1 个月;干旱烈度平均为 7.23,最强出现在 1992 年,为 19.63,1989 年未出现干旱,各年代 20 世纪 90 年代最强,为 9.29,80 年代最弱,为 4.83;干旱强度平均为 0.69,最强出现在 1992 年,为 1.64,1989 年未出现干旱,各年代最强出现在 60 年代,为 0.87,80 年代最弱,为 0.48(图 3A)。

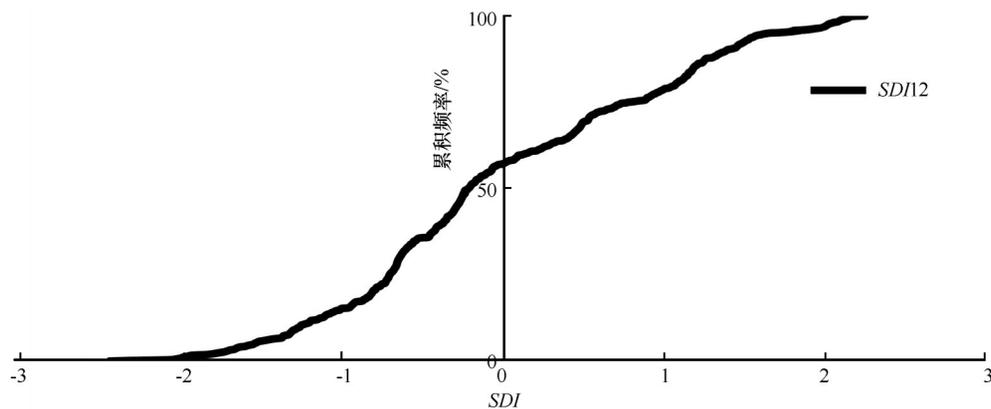


图 2 标准化流量指数 SDI 累积频率曲线
Fig.2 Cumulative frequency curve of SDI

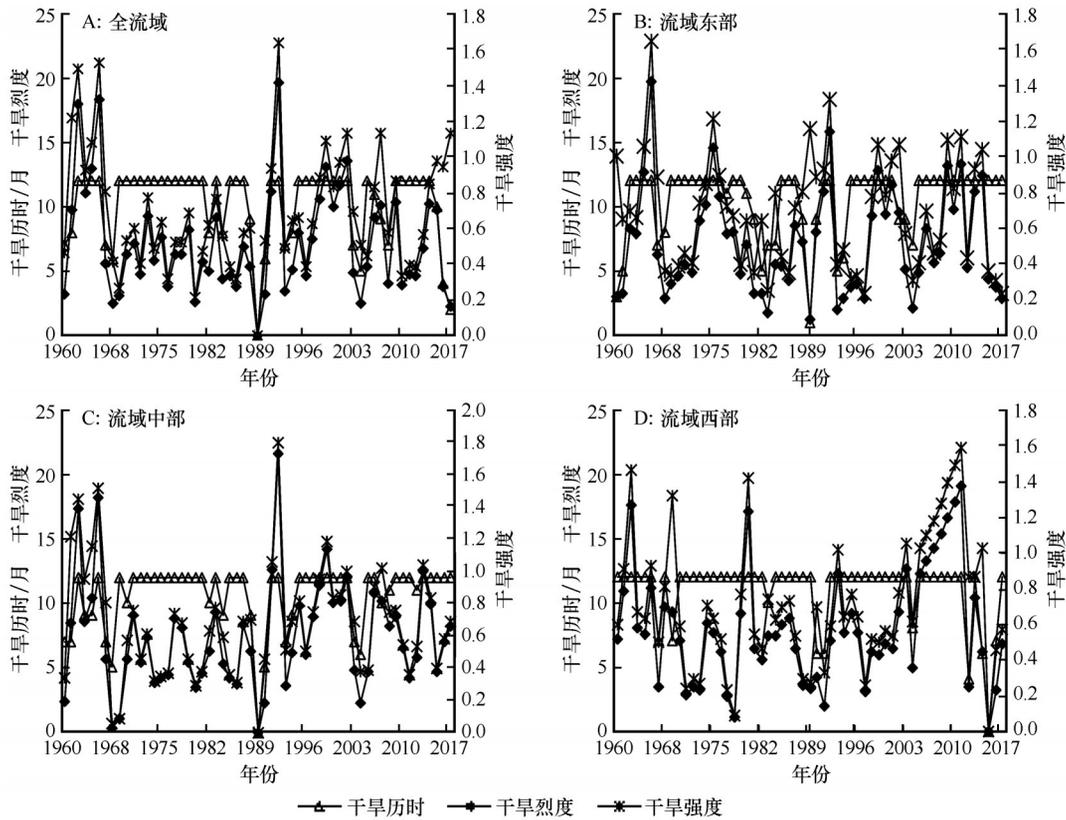


图3 石羊河流域水文干旱历时、烈度和强度演变

Fig.3 Evolution of hydrological drought duration, severity and intensity of Shiyang River Basin

流域东部 1961—2017 年干旱历时平均为 10.5 个月,各年代干旱历时最长出现在 20 世纪 70 年代,平均持续时间是 11.8 个月,最短出现在 80 年代,持续时间为 8.3 个月;干旱烈度平均为 7.10,最强出现在 1966 年,为 19.69,1989 年最弱,为 1.15,70 年代最强,为 8.20,80 年代最弱,为 4.79;干旱强度平均为 0.68,最强出现在 1966 年,为 1.64,1989 年最弱为 1.15,各年代最强出现在 60 年代,为 0.76,2011—2017 年最弱,为 0.63(图 3B)。

流域中部 1961—2017 年干旱历时平均为 10.6 个月,各年代干旱历时最长出现在 20 世纪 70 年代,平均持续时间是 12 个月,最短出现在 60 年代,持续时间为 9 个月;干旱烈度平均为 7.40,最强出现在 1992 年,为 21.52,1989 年未出现干旱,各年代 90 年代最强,为 10.41,80 年代最弱,为 5;干旱强度平均为 0.68,最强出现在 1992 年,为 1.79,1989 年未出现干旱,各年代最强出现在 90 年代,为 0.91,80 年代最弱,为 0.49(图 3C)。

流域西部 1961—2017 年干旱历时平均为 11 个月,各年代干旱历时最长出现在 20 世纪 70 年代,平均持续时间是 12 个月,最短出现在 2011—2017 年,持续时间为 7.6 个月;干旱烈度平均为 7.96,最强出

现在 2011 年,为 19.07,2015 年未出现干旱,2001—2010 年最强,为 12.27,80 年代最弱,为 6.13;干旱强度平均为 0.71,最强出现在 2011 年,为 1.59,2015 年未出现干旱,各年代最强出现在 2001—2010 年,为 1.04,70 年代最弱,为 0.51(图 3D)。

石羊河流域干旱历时、干旱烈度与干旱强度的变化不是很一致。整个流域水文干旱历时都是 20 世纪 70 年代最长,历时最短的年代流域各段不是很一致,全流域及流域东部 80 年代最短,流域中、西部分别为 60 年代和 2011—2017 年最短;干旱烈度全流域及流域中部 90 年代最强,流域东、西部分别为 70 年代和 2001—2010 年最强,烈度最弱整个流域都出现在 80 年代;干旱强度全流域及流域东、中、西部分别为 60 年代、70 年代、90 年代、2001—2010 年最强,强度最弱分别为 80 年代、2011—2017 年、80 年代、70 年代。

3.2 水文干旱时序演变特征

由图 4A 可以看出,石羊河流域 1961—2017 年 SDI 在波动中呈增加趋势,变化倾向率为 0.107/10a,未通过 $P < 0.05$ 的显著性信度水平,无旱年有 9 a,1991、1962、1965、2001 年属重旱年份。

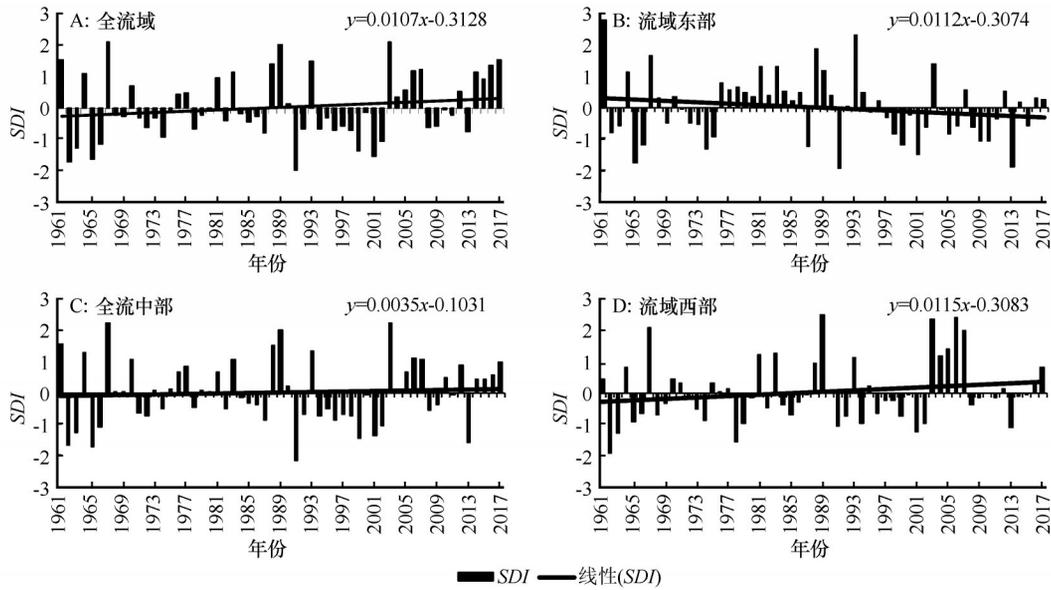


图4 1961—2017年石羊河流域年SDI变化

Fig.4 Evolution of SDI in Shiyang River Basin during 1961-2017

石羊河流域东部年SDI在波动中呈减小趋势,变化倾向率为 $-0.112/10a$,未通过 $P<0.05$ 的显著性信度水平,无旱年有7a,其中1991、2013、1965、2001年属重旱年份(图4B)。

石羊河流域中部年SDI在波动中呈增加趋势,变化倾向率为 $0.035/10a$,未通过 $P<0.05$ 的显著性信度水平,无旱年有7a,1991、1965、1962、2013年属重旱年份(图4C)。

石羊河流域西部年SDI在波动中呈增加趋势,变化倾向率为 $0.115/10a$,未通过 $P<0.05$ 的显著性信度水平,无旱年有7a,其中1962、1978、1963、2001年属重旱年份(图4D)。

石羊河流域SDI值变化幅度很小。其中石羊河流域及流域中、西部年SDI变化总体上表现为在波动中呈增加趋势,西部增加幅度最大,中部增加幅度很小;流域东部年SDI在波动中呈减小趋势。

3.3 水文干旱频率演变特征

石羊河流域年、春季、夏季、秋季、冬季干旱发生频次总体都是中旱和重旱频次最多(图5)。其中年中旱、重旱和特旱发生频率73%~82%,流域东部干旱频率最高,达82%,西部、中部和全流域分别达77%、76%和73%。春季中旱、重旱和特旱发生频率达72%~81%,流域东部干旱频率最高,达81%,西部、中部和全流域分别达74%、72%和74%。夏季中旱、重旱和特旱发生频率达70%~75%,流域东、西部干旱频率最高,均达75%,中部和全流域分别达74%

和70%。秋季中旱、重旱和特旱发生频率达72%~79%,流域东、西部干旱频率最高,均达79%,中部和全流域分别达72%和74%。冬季中旱、重旱和特旱发生频率达65%~72%,流域东、中部干旱频率最高,均达72%,西部和全流域分别达65%和68%。

石羊河全流域及流域东、中和西部年及四季干旱发生频次总体都是中旱和重旱频次最多,四季水文干旱发生频率最高的是春季,冬季干旱发生频率最低;从流域不同地段看,水文干旱发生的频率流域东部最高。总体而言,石羊河流域水文干旱发生的概率较高,进一步证实了该流域干旱频繁发生的事实。

3.4 干旱指标与实际干旱对比

为探明标准化流量指数是否符合石羊河流域的实际干旱情况,查找了研究区的历史干旱资料,以验证该指数在石羊河流域的适用性。与武威市统计局、水文局、气象局和《甘肃省历史气候资料》的干旱事件记载进行对比(表4),发现SDI方法识别出了石羊河流域实际发生的大部分重要干旱事件,只有个别年份(1963、1972、1992、1996、2002年)识别的干旱与实况稍有出入,这种差异可能是由于评估指标侧重点及计算方法或者干旱事件记载的不详等原因导致。据《甘肃省历史气候资料》记载:1962年4月以后,武威旱灾严重,全区河水流量由1961年同期的12.74亿 m^3 减少到7.04亿 m^3 ,约4万 hm^2 夏田未灌水;1991年大旱使武威市农作物受灾

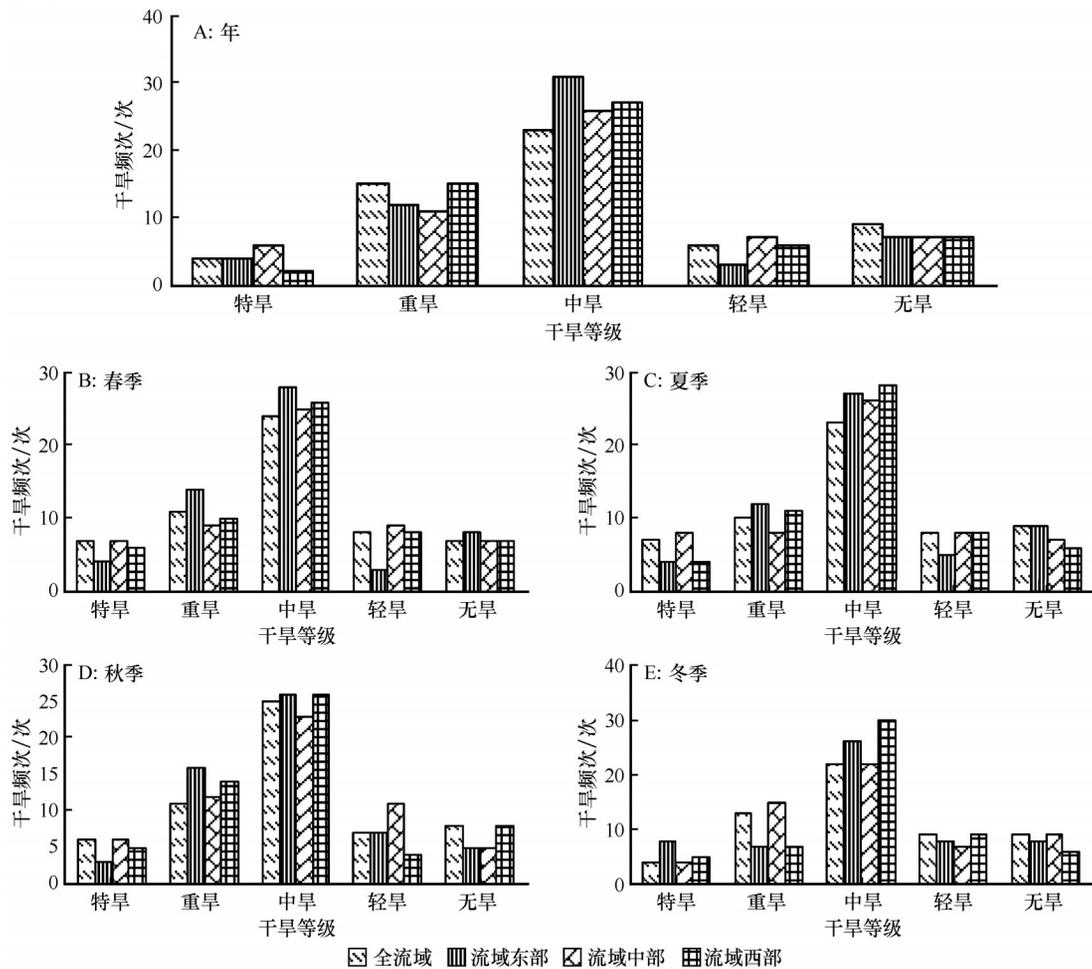


图5 石羊河流域水文干旱频次

Fig.5 Hydrological drought frequency of Shiyang River Basin

面积达到39.5%,受灾严重。这与SDI识别出的石羊河流域特旱年份一致。

总体上看,本文利用SDI识别出的主要水文干旱事件与实际干旱事件基本一致,干旱等级也较一致,说明使用SDI能够较好地监测到石羊河流域干旱年份及干旱等级。

4 讨论

在气候变暖的背景下全球和区域尺度的干旱时空分布都发生了变化^[33]。石羊河流域1961—2017年降水量、最高气温、最低气温、平均气温、蒸发量都呈增加趋势(表5),其中降水量增加趋势未通过显著性检验(除冬季降水增加通过0.01显著性检验),年及四季最高气温、最低气温、平均气温增加趋势都通过了0.01显著性检验,年蒸发量增加趋势通过了0.05显著性检验,冬季蒸发量增加趋势通过了0.01显著性检验,其他三季蒸发量增加趋势未通过显著性检验。计算石羊河流域SDI值与各气象

要素的相关发现(表6),年SDI值与降水量呈明显的正相关,与蒸发量表现为明显负相关,都通过0.01信度检验,与平均气温和最高气温表现为负相关,与最低气温表现为正相关,但都未通过显著性检验。四季SDI值与各气象要素的相关不一致,春季SDI值和年SDI值与各气象要素的相关性相似,夏、秋季SDI值和年SDI值与各气象要素的相关性也基本一致,除了夏季与最高气温的负相关通过了0.01信度检验,秋季与最低气温的负相关通过了0.01信度检验,并与平均气温呈正相关,冬季SDI值与各气象要素的相关性都表现为正相关,其中与最高气温、最低气温的相关通过0.01信度检验。

总之,1961—2017年石羊河流域气候变化对水文干旱有一定的影响,年降水量增加幅度大于气温升高和蒸发量增加的趋势幅度,而且年降水量和SDI值的相关性最大,所以石羊河流域由于年降水量的增加,水文干旱SDI值呈增加趋势,即水文干旱总体上呈减弱趋势;春季降水量的增加幅度小于蒸

表4 SDI临界值水文干旱识别与实际重要干旱事件对比
Table 4 Identification of hydrologic drought at varied thresholds and their comparison with actual important drought events

SDI临界值		石羊河流域重要干旱事件
重旱	特旱	记载年份
		1997年
		1972年
		2008年
		1978年
		1994年
		1992年
		1996年
		1998年
		2013年
		1987年
		1974年
		2002年
		1966年
		1963年
		1999年
	2001年	
	1965年	
	1962年	
	1991年	

发量,春季SDI值与蒸发量的相关性大于降水量,春季蒸发量的增大可能是春季干旱频率最高的原因。

流域的降水量在增加,加之气候变暖,冰川消融加快,为什么石羊河流域东部SDI值呈减小趋势,即水文干旱呈增加趋势?原因可能是石羊河流域主要受到季风、环流、地形以及海拔等因素的影响,

局地气候变化比较复杂^[34],有待进一步研究。选取石羊河流域4个气象站点的常规观测资料讨论气候变化对石羊河流域水文干旱的影响,虽然在一定程度上能够较为清晰反映水文干旱对气候变化的响应,但石羊河流域处于不同气候区的交汇过渡带,天气特征和气候变化规律复杂,仅用该地区4个气象站点资料分析存在站点稀少、分布不均、网格较粗的弊端。因此在之后的研究中需要增加出山口上游山区水文站点以及更多的气象区域站观测资料,结合石羊河流域地形、地理位置以及人类活动信息,进一步详细分析石羊河流域水文干旱的地域差异,对水文干旱等级划分进行修订。

5 结论

1961—2017年石羊河流域干旱历时、干旱烈度和干旱强度变化不是很一致,整个流域水文干旱历时20世纪70年代最长,历时最短的年代流域各段不是很一致,全流域及流域东部80年代最短,流域中、西部分别为60年代和2011—2017年最短;干旱烈度全流域及流域中部90年代最强,流域东、西部分别为70年代和2001—2010年最强,烈度最弱整个流域都出现在80年代;干旱强度全流域及流域东、中、西部分别为60年代、70年代、90年代、2001—2010年最强,强度最弱分别为80年代、2011—2017年、80年代、70年代。

从干旱时序分析,由于年降水量的增加,石羊河流域年SDI值总体呈增加趋势。其中石羊河流域及流域中、西部年SDI变化总体上表现为在波动中呈增加趋势,西部增加幅度最大,中部增加幅度很小;流域东部年SDI在波动中呈减小趋势。

从干旱频率分析,由于特殊的地理条件和气候特征,石羊河全流域及流域东、中和西部年及四季干旱发生频次总体都是中旱和重旱频次最多,年中

表5 石羊河流域全年及四季气候因素变化趋势系数

Table 5 Trend coefficients of annual and seasonal climatic factors in Shiyang River Basin

时间	平均气温	最高气温	最低气温	降水量	蒸发量
年	0.47**	0.60**	0.57**	0.67	0.19**
春季	0.09**	0.07**	0.12**	0.18	0.23
夏季	0.10**	0.07**	0.15**	0.43	0.97
秋季	0.13**	0.11**	0.13**	-0.00	0.63
冬季	0.15**	0.35**	0.17**	0.06	0.47

**表示通过了0.01信度检验,*表示通过了0.05信度检验。

表6 石羊河流域全年及四季气候因子与标准化流量指数SDI值相关系数

Table 6 Annual and seasonal correlation coefficients between SDI and climatic factors in Shiyang River Basin

时间	平均气温	最高气温	最低气温	降水量	蒸发量
年	-0.011	-0.081	0.141	0.626**	-0.625**
春季	-0.085	-0.226	0.082	0.544**	-0.548**
夏季	-0.212	-0.412**	0.049	0.606**	-0.618**
秋季	0.153	0.143	0.392**	0.586**	-0.656**
冬季	0.245	0.345**	0.308**	0.224	0.094

**表示通过了0.01信度检验,*表示通过了0.05信度检验。

旱、重旱和特旱发生频率73%~82%，春、夏、秋和冬季发生频率分别为72%~81%、70%~75%、72%~79%和65%~72%，其中春季干旱发生频率最高，冬季干旱发生频率最低；从流域不同地段看，水文干旱发生的频率流域东部最高，年及四季中旱、重旱和特旱发生频率达72%~82%。

通过与历史干旱事件记载对比发现，构建的SDI临界值识别出的主要水文干旱事件和实际干旱事件基本一致，干旱等级也较一致，说明使用SDI能够较好地监测到石羊河流域干旱年份及干旱等级。

石羊河流域年降水量增加幅度大于气温升高和蒸发量增加的趋势幅度，且年降水量和SDI值的相关性最大，所以水文干旱SDI值随着年降水量的增加呈增加趋势，即水文干旱总体上呈减弱趋势。

参考文献:

- [1] 张强. 华北地区干旱指数的确定及其应用[J]. 灾害学, 1998, 13(4): 34-38.
- [2] 黄会平. 1949-2007全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 94-98.
- [3] 王素萍, 李耀辉, 冯建英, 等. 1961-2012年甘肃省干湿变化特征及其影响因子[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1624-1632.
- [4] 王莺, 李耀辉, 胡田田. 基于SPI指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 244-253.
- [5] 柏庆顺, 颜鹏程, 蔡迪花, 等. 近56 a中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 722-728.
- [6] 马鹏里, 韩兰英, 张旭东, 等. 气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 209-215.
- [7] Wu H, Hayes M J, Wilhite D A, et al. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(4): 505-520.
- [8] Wu H, Svoboda M D, Hayes M J, et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 65-79.
- [9] Bai Y, Xu H, Ling H. Drought-flood variation and its correlation with runoff in there headstreams of Tarim River, Xinjiang, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1297-1309.
- [10] Yan D H, Han D M, Wang G, et al. The evolution analysis of flood and drought in Huai River Basin of China based on monthly precipitation characteristics [J]. Natural Hazards, 2014, 73(2): 849-858.
- [11] 王芝兰, 王劲松, 李耀辉, 等. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3): 839-847.
- [12] 韩兰英, 张强, 赵红岩, 等. 甘肃省农业干旱灾害损失特征及其对气候变暖的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 767-776.
- [13] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 中国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 26(6): 3-7.
- [14] Heim J, Richard R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [15] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions [J]. Water International, 1985, 10(3): 111-120.
- [16] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 1-10.
- [17] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望 [J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848.
- [18] Van Loon A F, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526(7): 3-14.
- [19] Wu J, Chen X, Yao H, et al. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551(8): 495-507.
- [20] 董前进, 谢平. 水文干旱研究进展 [J]. 水文, 2014, 34(4): 1-7.
- [21] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域干旱特征及干旱指数计算方法初探 [J]. 气象, 2006, 32(1): 24-29.
- [22] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000-2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118.
- [23] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.

- [24] 冯建英,李栋梁. 甘肃省河西内陆河流量长期变化特征[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 478-484.
- [25] 李玲萍,刘明春. 石羊河流域出山口河流流量的变化趋势及特性分析[J]. 水土保持学报, 2011, 27(1): 58-63.
- [26] 刘明春,李玲萍,史志娟,等. 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应:以西营河为例[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 193-198.
- [27] 王劲松,冯建英. 甘肃省河西地区径流量干旱指数初探[J]. 气象, 2000, 26(6): 3-7.
- [28] Husak G J, Michaelsen J, Funk C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(7): 935-944.
- [29] 王亚文. 变化环境下无定河流域水文干旱演变规律及驱动机制分析[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [30] 段洪玲. 关于游程分布的一些研究及应用[D]. 沈阳:东北大学, 2006.
- [31] Hassan I H, Mdemu M V, Shemdoe R S, et al. Drought pattern along the coastal forest zone of Tanzania[J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2014, 4(3): 369-384.
- [32] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1): 202-216.
- [33] Hirabayashi Y, Kanae S, Emori S, et al. Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate[J]. Hydrological Sciences Journal—Journal Des Sciences Hydrologiques, 2008, 53(4): 754-772.
- [34] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山及河西走廊地表干湿变化的时空分布[J]. 地球科学, 2010, 35(2): 268-276.

Characteristics of hydrological drought based on standardized flow index in Shiyang River Basin of China

Li Lingping^{1,2}, Lu Taishan³, Liu Mingchun², Hu Lili¹, Wang Suping¹

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Jinta River Water Resources Management Office, Water Bureau of Liangzhou District of Wuwei, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: Based on the monthly flow data of eight hydrological stations and meteorological data of four meteorological stations in Shiyang River Basin from 1961 to 2017, this paper uses the standardized flow index and run theory to obtain the characteristic indexes of drought events, and analyze the evolution of hydrological drought duration, drought severity, drought intensity, drought time series and drought frequency in Shiyang River Basin. Furthermore, affecting factors of precipitation, temperature, and evaporation indices were also analyzed. The results show that: In the past 57 years, the changes of drought duration, drought severity and drought intensity are not consistent in Shiyang River Basin. The hydrological drought duration is the longest in 1970s and the shortest in 1980s in Shiyang River Basin, and the drought severity is the strongest in 1990s and the weakest in 1980s, and the drought intensity is the strongest in 1960s and the weakest in 1980s. The annual *SDI* shows an increasing trend in Shiyang River Basin and its middle and western regions, with the greatest increase in the western region and a small increase in the central region, while the annual *SDI* shows a decreasing trend in the eastern part of the basin. The frequency of the most are moderate and severe drought in Shiyang River, and the frequency of seasonal hydrological drought is the highest in spring and the frequency of winter drought is the lowest. The frequency of hydrological drought is the highest in the eastern of the basin. The majority of hydrological drought events and grades over the past 57 years in Shiyang River Basin can be identified well on the basis of *SDI*. The threshold of *SDI* is more sensitive to reflect great hydrological drought events and grades, and the result from *SDI* is more reasonable. There is a negative correlation between *SDI* and annual evaporation, maximum temperature, minimum temperature in Shiyang River Basin, while is a positive correlation between *SDI* and annual precipitation, mean temperature.

Key words: Shiyang River Basin; standardized flow index; threshold; hydrological drought