

# 标准化径流指数在阿克苏河水文干旱特征识别中的应用

周洪华, 王云倩, 方功焕, 叶朝霞, 李卫红

(中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 阿克苏河位于丝绸之路经济带重要通道, 是典型的中亚跨境河流, 阿克苏丰富的水资源成为沿岸各国争夺的焦点。针对阿克苏河未来水资源评估和管理的迫切需要, 以阿克苏河干流月径流为数据基础, 结合径流距平百分比, 采用标准化径流指数(Standardized Runoff Index, *SRI*) 辨识阿克苏河水文干旱事件, 并验证了水文干旱识别的合理性。结果表明: *SRI* 丰枯等级划分临界值在阿克苏河能够有效地识别水文干旱事件及其干旱等级, *SRI* 趋势分析发现未来阿克苏河春、夏季洪水和冬旱现象的可能性在逐渐增大, 水资源季节差异将越来越明显, 这将是未来水资源合理利用和管理的一个新挑战。

**关键词:** 径流; 水文干旱; *SRI*; 干旱识别; 阿克苏河

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0006-06

## Application of standardized runoff index on hydrological drought characteristics identification in Aksu River

ZHOU Honghua, WANG Yunqian, FANG Gonghuan, YE Zhaoxia, LI Weihong

(State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,

Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In view of the urgent needs of water resources assessment and management in the Aksu River in future, the study tried to discuss the possibility of using the standardized runoff index (*SRI*) to identify the hydrological drought events in the Aksu River. By Combining with the percentage of runoff anomaly, the critical value of the hydrological drought grade was determined by the *SRI*. The results showed that the *SRI* can effectively identify the hydrological drought events of the Aksu River, and the trends of *SRI* under different seasons showed that the possibility of the flood in spring, summer and drought in winter in the Aksu River was gradually increasing, which would increase the risk for water resource utilization and management.

**Key words:** runoff; hydrological drought; standardized runoff index(*SRI*); drought identification; Aksu River

## 1 研究背景

阿克苏河位于丝绸之路经济带重要通道, 是典型的中亚跨境河流, 其丰富的水资源正成为沿岸各国争夺的焦点<sup>[1]</sup>; 同时, 阿克苏河也是西北干旱区最大内陆河——塔里木河的主要源流, 占塔里木河地表径流的约 70% ~ 80%<sup>[2]</sup>, 不仅是维持塔里木河流域生态走廊的最重要水源, 也维系着新疆最大灌区阿克苏灌区的 1000 多万亩农田和 150 万人的生

产和生活安全。目前, 围绕阿克苏河流域洪水灾害已进行了一系列的深入研究, 且关于极端水文事件大多是从气温和降水角度进行研究<sup>[3-5]</sup>或从文史资料中寻获<sup>[6]</sup>, 而从径流角度识别水文干旱及其变化特征的研究相对比较薄弱, 这将不利于未来阿克苏河的水资源评估、预测和管理。因为以径流量为干旱指标的水文干旱, 晚于气象干旱和农业干旱, 作为水文极值现象, 是气象、农业干旱的延续与发展, 因此被认为是最彻底的干旱<sup>[7]</sup>; 旱灾还是影响阿克苏

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-11-05

基金项目: 新疆自然科学基金项目(2017D01A79)

作者简介: 周洪华(1979-), 女, 四川遂宁人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为干旱区生态水文过程。

通讯作者: 李卫红(1958-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为水文水资源。

地区农业产量的重要因素之一<sup>[8]</sup>,一旦发生将对水资源系统平衡和社会经济造成不可估量的影响。由于标准化径流指数(Standardized Runoff Index, *SRI*)具有可进行多时间尺度分析(1、3、6、12个月等)、适用于资料缺乏、地形复杂的区域,且计算方法简单等优点,广泛被应用于国内外水文干旱识别研究<sup>[9-16]</sup>。因此,本文采用*SRI*指数分析阿克苏河有连续径流监测数据以来(1958-2015)的径流丰枯演变过程,探寻采用*SRI*辨识阿克苏河水文干旱事件的可能性,以期为阿克苏河未来水资源评估和合理利用与管理提供科学方法和理论依据。

## 2 研究区概况和研究方法

### 2.1 研究区概况

阿克苏河发源于天山中段西部南麓,由源自吉尔吉斯斯坦的托什干河和库玛力克河两大支流在阿克苏市境内西大桥汇合而成,干流总长132 km(图1)。阿克苏河由高山区冰川融水、积雪融水和降水共同补给,对气候变化响应敏感,是中纬度高山区最具代表性的河流。阿克苏河流域总面积约为 $5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中外国面积为 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,国内面积约为 $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地理坐标介于 $40^\circ 17' \sim 42^\circ 27' \text{ N}$ 、 $75^\circ 35' \sim 80^\circ 59' \text{ E}$ 之间<sup>[17]</sup>。该流域属温带大陆性干旱气候,多年平均气温为 $9.2 \sim 11.5^\circ \text{C}$ ,海拔4 100 m以上的区域终年在 $0^\circ \text{C}$ 以下;多年平均年降水量为64 mm,降水量随海拔梯度增加,最大降水量在海拔2 300 m以上的中高山带;多年平均潜在蒸发量为1 890 mm<sup>[17-19]</sup>。流域山地垂直地貌分带明显,地势西北高、东南低。由于阿克苏河径流的产流区位于山区,受人类活动影响较少,径流形成主要受山区复杂气候条件如气温、降水和潜在蒸发的影响<sup>[18-19]</sup>。

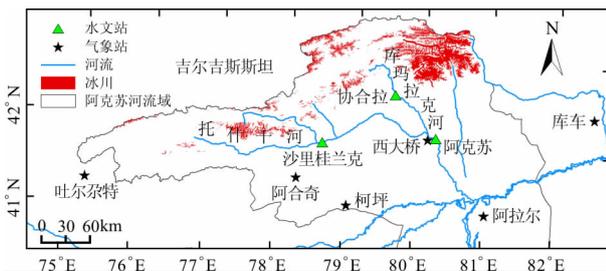


图1 研究区示意图

### 2.2 数据来源与研究方法

本文所采用的阿克苏河1958-2015年月径流量为其两源流汇合口-西大桥水文站的实测数据,

由新疆塔里木河流域阿克苏管理局提供。

采用标准化径流指数(*SRI*)进行阿克苏水文干旱识别。与标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, *SPI*)计算方法类似,即确定一定时间内径流适合的概率分布类型后,进行正态标准化得到*SRI*。计算方法如下<sup>[14]</sup>:

假设某一时间段的径流量 $x$ 满足 $T$ 分布概率密度函数 $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{1}{\gamma T(\beta)} x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\gamma}} \quad (1)$$

式中: $\gamma, \beta$ 分别为形状和尺度参数, $x > 0, \gamma > 0, \beta > 0, \gamma, \beta$ 可用极大似然法计算。

一定时间尺度的径流量 $x$ 的累积率:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2)$$

对 $T$ 分布概率进行正态标准化得到:

$$SRI = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{((d_3 t + d_2)t + d_1)t + 1.0} \quad (3)$$

$$t = \sqrt{2 \ln(F)}$$

当 $F > 0.5$ 时, $S = 1$ ;当 $F \leq 0.5$ 时, $S = -1$ ,其中 $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。

采用Mann-Kendall(M-K)非参数检验法检验时间序列值的突变<sup>[18]</sup>;采用小波分析检验时间序列值的变化周期<sup>[17]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 径流特征与水文干旱等级临界值划分

基于阿克苏河流域干流西大桥水文站的月径流量数据,采用径流距平和*SRI*分析阿克苏河干流1958-2015年的年际间径流时间序列变化(图2(a))。近57年来,阿克苏河干流径流在时间序列上整体呈增加趋势,其中以1994年为突变点,阿克苏河年径流出现了从偏枯到偏丰的显著跃变,其中1957-1993年径流量平均距平为 $-14.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年径流处于相对较枯阶段,而1994-2015年径流量平均距平为 $22.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年径流处于相对较丰阶段。阿克苏河年径流产生跃变的原因可能是其径流的主要来源为冰川积雪和山区降水,由于近20年来气候变化引发了流域高山区冰川积雪快速消融,导致了阿克苏两源流-托什干河和库玛拉克河年径流的增加<sup>[17-18]</sup>,从而造成阿克苏河干流近年来持续呈现偏丰现象。

阿克苏河干流年内径流分布变异较大,呈现单

峰变化趋势(图2(b)),其中1-5月和10-12月径流量均处于偏枯状态,年内径流量主要聚集分布在6-9月,年内径流最大值出现在7-8月份,约占全年径流量的47.90%。有研究表明7-8月也是阿克苏河源区降水量最大的月份<sup>[18]</sup>,这证实阿克苏河干流7-8月的径流主要受中山带降雨影响。同时,从图2(b)也可看出,5-6月是年内径流量增幅最大的月份,而有研究显示此时期的山区年内气温增幅也最大且均超过0℃<sup>[18]</sup>,这表明5-6月的径流增加主要是伴随着气温的升高冰雪融水消融加快导致的。根据多年平均径流量的丰枯等级分类标准<sup>[14]</sup>,对阿克苏河干流1958-2015年间的径流资料计算得到各等级所占百分比,根据计算结果,特旱、重旱、中旱、轻旱、正常、轻涝、中涝、中涝和重涝出现的概率分别2%、7%、10%、9%、41%、12%、9%、7%、3%,依次累加得到干旱等级的累积频率为2%、9%、19%、28%、69%、81%、90%、97%和100%。基于SRI计算结果,绘制SRI序列频率分布直方图(图3(a)),并拟合其正态分布情况(K-S检验结果为0.0102,  $P < 0.01$ ),获取SRI值序列累积频率

曲线(图3(b))。结合径流距平百分比的干旱等级累积频率所对应的SRI值获得SRI干旱等级临界值(表1)。推导出的SRI旱涝等级划分标准与目前在水文干旱监测与评价中应用比较广泛的径流Z指数(RZI)的符合度也非常高<sup>[13]</sup>,因此本文推导出的SRI旱涝分级标准具有合理性。

表1 SRI丰枯等级划分临界值

丰枯等级	干旱2类型	SRI累积频率/%	SRI范围	RZI范围
1	特涝	>97	$\geq 2$	$\geq 2$
2	重涝	90~97	(2,1.5)	(2,1.5)
3	中涝	81~90	(1.5,1)	(1.5,1)
4	轻涝	69~81	(1,0.5)	(1,0.5)
5	正常	28~69	(0.5,-0.5)	(0.5,-0.5)
6	轻旱	19~28	(-0.5,-1)	(-0.5,-1)
7	中旱	9~19	(-1,-1.5)	(-1,-1.5)
8	重旱	2~9	(-1.5,-2)	(-1.5,-2)
9	特旱	<2	$\leq -2$	$\leq -2$

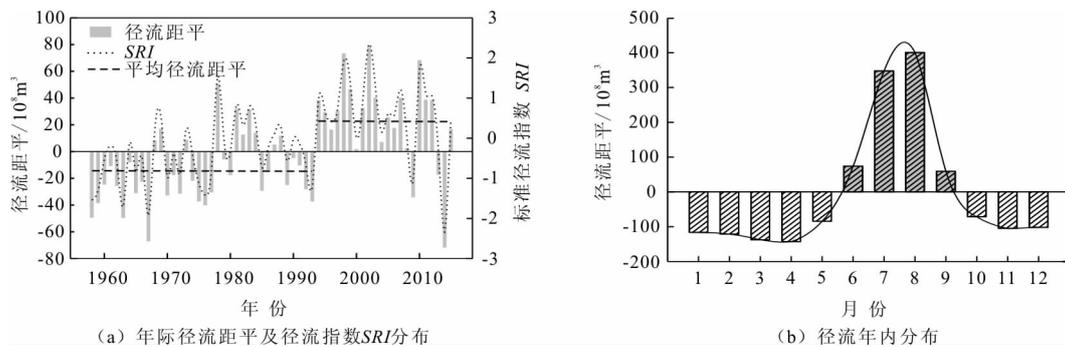


图2 阿克苏河干流1958-2015年年际径流距平、径流指数及径流年内分布

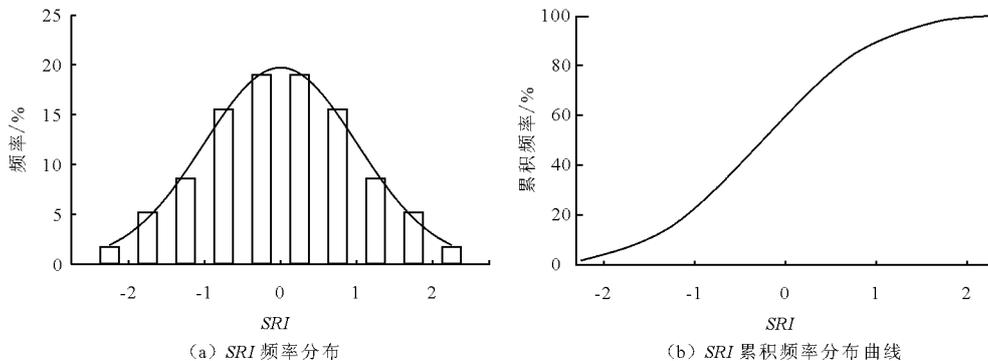


图3 SRI频率分布图和累积频率分布曲线

### 3.2 SRI对水文干旱的识别

考虑到阿克苏河流域干旱和洪涝事件的记载多有季节性,将阿克苏河流域划分为四个季节:春季3

-5月,夏季6-8月,秋季9-11月,冬季12-次年2月。为此采用3个月时间尺度的SRI对阿克苏河干流水文干旱情况进一步进行分析。分别将3个月

时间尺度下的 5、8、11 月和次年 2 月 *SRI* 值作为春季、夏季、秋季和冬季的 *SRI* 序列值。根据 *SRI* 干旱等级临界值,获取阿克苏河干流 1958 - 2015 年来春、夏、秋、冬四季干旱等级分布状况(图 4)。从图 4 可看出,1994 年前,尤其是 20 世纪 60 年代和 70 年代,春季、夏季和秋季阿克苏河干流的水文干旱较为频繁,1964 - 1966 年和 1973 - 1977 年甚至出现春季连旱,1961 - 1962 年和 1975 - 1977 年出现夏季连旱,1974 - 1976 年出现秋季连旱。1958 - 1993 年,春季、夏季、秋季和冬季发生水文干旱的频率分别 41.67%、44.44%、36.11% 和 8.33%,且重旱程度及其以上的干旱在春、夏、秋季发生的频率均为 8.33%,高于冬季的 5.56%。1994 - 2015 年,春、夏、秋、冬季发生水文干旱的频率分别为 13.64%、9.09%、22.73% 和 68.18%。从干旱发生的年份来看,春季发生重旱及其以上程度干旱的年份为 1958、1964、1966 和 2014 年,夏季发生重旱及其以

上程度干旱的年份为 1959、1963、1972 和 2014 年,秋季发生重旱及其以上程度干旱的年份为 1968、1974、1985 和 2014 年,冬季发生重旱及其以上程度的干旱年份为 1965、1985、2013 和 2014 年。

进一步将 *SRI* 识别的重度及其以上干旱与《中国气象灾害大典(新疆卷)》记载的 1958 - 2000 年的实际干旱事件和《2014 年新疆气候公报及影响评价》以及网络记载的干旱事件进行了比较(表 2)。从表 2 中可以看出,文献记载的经阿克苏河流域的重大干旱事 *SRI* 都识别到了。但还有一些年份 *SRI* 识别为重度及其以上干旱的年份,文献资料并未记载到,尤其是 1963 - 1966 年,这可能是由于干旱现象的复杂性及记载的干旱类别不明确,判别干旱事件的方法不同造成的。但从已识别到的干旱年份和等级来看,*SRI* 对阿克苏河的水文干旱识别还是具有一定的合理性。

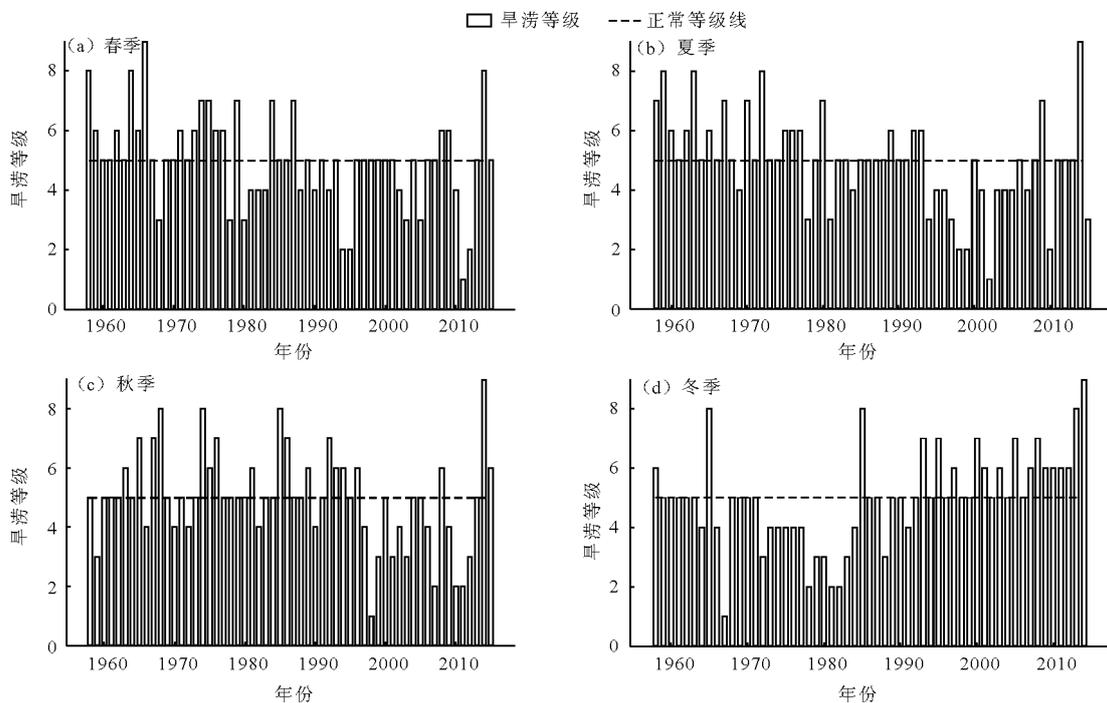


图 4 1958 - 2015 年不同季节干旱等级变化趋势

### 3.3 阿克苏河干流水文干旱趋势分析

1958 - 2015 年间阿克苏河干流 *SRI* 序列值变化趋势呈现由  $(-1, 0)$  到  $(0, 0.5)$  转变,即由轻旱转向正常至轻涝趋势,突变时间在 20 世纪 90 年代;小波分析显示,阿克苏河干流 *SRI* 旱涝的主周期为 9 a (图 5)。此 *SRI* 趋势研究结果与气候干旱指数计算分析得到的结果一致,如李思诺<sup>[20]</sup>以综合气象干旱指数(Copula 函数)计算发现,阿克苏河径流形成区

的山区近 51 年来干旱程度趋于缓解,近 10 年来,干旱程度亦有所缓解,阿克苏市和乌什县绿洲区内干旱形势也有所缓解;张玉虎等<sup>[21]</sup>提出阿克苏河流域南部干旱风险大于北部,以阿克苏市为中心,经阿克苏河(含两源流)流经的县市 - 包括阿合奇、乌什、阿克苏、温宿等,干旱风险均较小。这些研究结果证实了西北地区农业旱灾集中在 20 世纪 90 年代前,以 50、60、70 和 90 年代最为典型,21 世纪后西北气

候为偏涝期,干旱将有所减轻<sup>[22]</sup>这一结论。同时此 *SRI* 趋势分析也与刘新华等<sup>[17]</sup>采用 *Z* 指数法分析阿克苏河两源流—托什干河和库玛力克河的丰枯变化趋势基本一致。

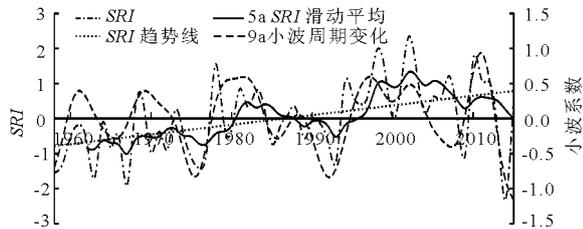


图5 1958—2015年阿克苏河 *SRI* 变化趋势和周期变化

进一步分解春季、夏季、秋季和冬季的 *SRI* 序列

值可以看出(图6),春季、夏季和秋季阿克苏河干流 *SRI* 均呈现增加的趋势,尤其是春季和夏季 *SRI* 值由  $(-1, -0.5)$  向  $(0.5, 1)$  转变,表明径流量在春季和夏季有从轻旱至轻涝转变的趋势;秋季 *SRI* 值由  $(-0.5, 0)$  向  $(0, 0.5)$  转变,表明径流量在秋季趋于正常,并略有趋于偏涝的趋势。

春、夏、秋三季节的 *SRI* 序列值变化趋势与年 *SRI* 序列值变化趋势一致,均在由旱转涝,转变的时间都在20世纪90年代。这进一步验证了阿克苏河主要受气温和降水驱动,全球气候变化导致了阿克苏河源区降水和冰雪融水的增加,进而显著增加了春、夏季径流<sup>[18-19,22]</sup>。

表2 *SRI* 水文干旱识别与实际重要干旱事件对比

年份	<i>SRI</i> 对水文干旱的识别	文献记载的阿克苏河源流及干流流经区域重要干旱事件
1958	春季重旱	
1959	夏季重旱	阿瓦提县到7月底还有3万亩玉米未交头水,死亡2005亩;棉花死亡660亩;水稻死亡1695亩;晚秋作物60%未浇水,死亡20%。
1963	夏季重旱	
1964	春季重旱	
1965	冬季重旱	阿克苏地区3.8万多亩作物枯萎
1966	春季特旱	
1968	秋季重旱	阿瓦提县阿伊库勒公社玉米减产约50%
1972	夏季重旱	
1974	秋季重旱	阿克苏乌什县,托什干河来水仅为历年同期20%;5万亩小麦受灾,水稻推迟播种,少种1~5万亩
1979	春季中旱	阿克苏市4、5月正值春播季节出现严重春旱,水稻仅完成播种任务的三分之一;阿瓦提春棉花播种前缺水无灌溉,缺苗减产
1985	秋、冬季重旱	阿克苏市春播种植面积减至2.88万亩,粮食作物播种面积减少近万亩
1993	夏、秋、冬季中旱	阿克苏地区,库车、拜城、乌什县等的60万头牲畜需到30km以外的地方去喝水,沙雅县粮食减产约650t,棉花减产约1680t
2013	冬季重旱	2013年冬季,阿克苏地区山区干旱少雪。(摘自 <a href="http://news.ifeng.com/gundong/detail_2014_04/02/35413187_0.shtml">http://news.ifeng.com/gundong/detail_2014_04/02/35413187_0.shtml</a> )
2014	春季重旱,夏、秋、冬季特旱	2014年全疆干旱灾害重度发生,造成直接经济损失近28.9亿元(人民币),居历史同期第一位。受灾人口约40.8万人,农作物受灾面积约20.08万公顷

然而,冬季 *SRI* 序列值变化趋势与春、夏、秋季 *SRI* 正好相反,呈现明显下降的趋势, *SRI* 值由  $(1, 0)$  向  $(0, -1)$  转变,表明径流量在冬季有从轻涝转变为轻旱的趋势。冬季径流的减少可能是因为山区冬季气温提前降低,托什干河冬季气温甚至以

$0.54^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  的趋势下降,降水被雨雪取代,加之气温低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,积雪不能融化导致的<sup>[18]</sup>。

阿克苏河流域是全球气候变化响应最敏感的区域之一,全球气候变暖背景下,阿克苏河山区的降水和冰川融雪格局将进一步改变<sup>[1,23]</sup>,这种春夏季洪

水和冬季干旱的径流差异将可能进一步增大,这可能将成为阿克苏河在应对未来全球气候变化下水资

源管理面临的一个新挑战。

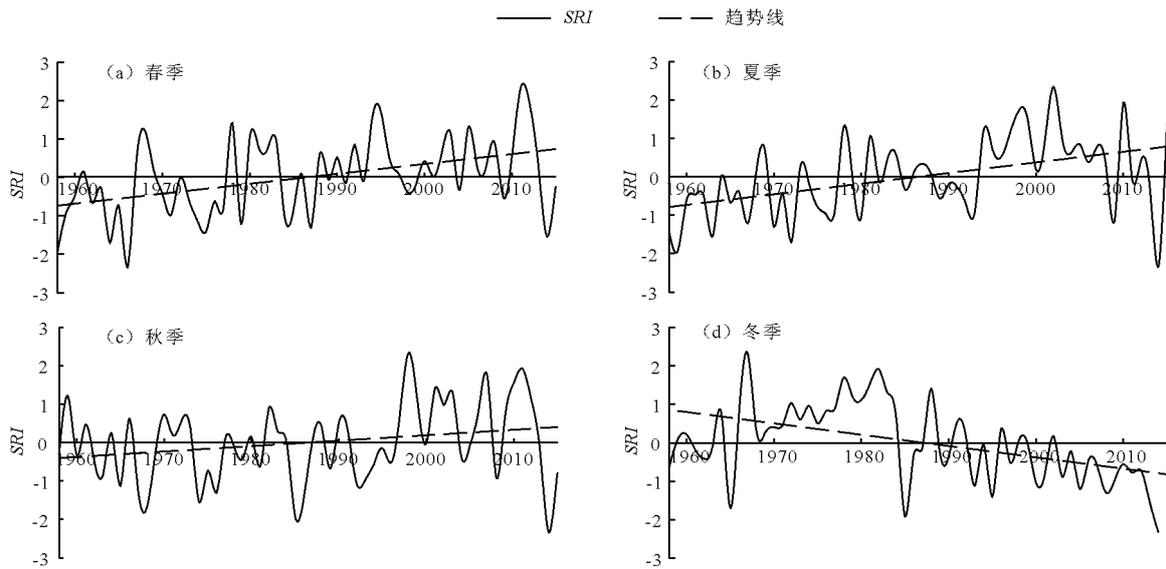


图 6 1958 - 2015 年不同季节 SRI 变化趋势

## 4 结 论

(1) 基于标准化径流指数 (SRI) 计算方法, 结合径流距平百分比, 推导的阿克苏河 SRI 干旱等级临界值, 所识别的水文干旱与实际干旱事件基本一致。表明 SRI 可以在阿克苏河应用, SRI 水文干旱等级临界值的划分是合理的, 能有效地监测流域内水文干旱事件。

(2) 阿克苏河干流不同季节的 SRI 变化趋势是不同的, 在春季、夏季阿克苏河干流呈现出明显的增湿趋势, 秋季阿克苏河干流呈现略增湿趋势, 而冬季阿克苏河干流呈现明显的增干趋势。这些结果表明, 阿克苏河 1993 年后年径流量的增加主要是因为春季冰川积雪融化和夏季降水增加所引起的, 且未来会出现春、夏季洪水和冬旱现象的可能性在逐渐增大。在全球气候变化背景下, 阿克苏河水资源季节差异可能还将逐渐增大, 阿克苏河流域水资源管理部门应及早提出相应管理措施和对策, 以避免未来水资源调度不当阻碍流域社会 - 经济和生态的有序发展。

### 参考文献:

[1] CHEN Y N, LI Z, LI W H, et al. Water and ecological security: dealing with hydroclimatic challenges at the heart of China's Silk Road [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 881 - 891.  
[2] CHEN Y N, TAKEUCHI K, XU C C et al. Regional climate change and its effects on river runoff in the Tarim Basin, Chi-

na [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(10): 2207 - 2216.  
[3] 叶柏松, 赵成义, 姜逢清, 等. 近 300a 来塔里木河流域旱涝灾害特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36: 173 - 182.  
[4] ZHANG Q, GU X H, SINGH V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China: Changes, causes and implications [J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44 - 55.  
[5] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1 - 9.  
[6] 孙桂丽, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆极端水文事件的时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 119 - 125.  
[7] 耿鸿江, 沈必成. 水文干旱的定义及其意义[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 91 - 94.  
[8] 闫慧洁, 张艳波. 自然灾害对阿克苏地区农业影响的分析[J]. 新疆农垦科技, 2016(2): 53 - 54.  
[9] 陈子燊, 刘占明, 黄强. 西江水文干旱历时与强度的遭遇概率分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 576 - 582.  
[10] 孙鹏, 张强, 白云岗, 等. 基于马尔科夫模型的新疆水文气象干旱研究[J]. 地理研究, 2014, 33(9): 1647 - 1657.  
[11] TRAMBAUER P, MASKEY S, WERNER M. Identification and simulation of space - time variability of past hydrological drought events in the Limpopo River basin, southern Africa [J]. Hydrology and Earth System Sciences [J]. 2014, 18(8): 2925 - 2942.  
[12] VU M T, RAGHAVAN V S, LIONG S Y. Ensemble climate projection for hydro - meteorological drought over a river basin in Central Highland, Vietnam [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19.

(下转第 18 页)

- namics of the River Danube, Austria[J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(2): 238 - 252.
- [50] BATTIN T J. Hydrodynamics is a major determinant of streambed biofilm activity: from the sediment to the reach scale[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6): 1308 - 1319.
- [51] SUTTLE K B, POWER M E, MCNEELY L C. How fine sediment in riverbeds impairs growth and survival of juvenile salmonids[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 969 - 974.
- [52] NYHOLM N. A simulation model for phytoplankton growth and nutrient cycling in eutrophic, shallow lakes[J]. *Ecological Modelling*, 1978, 4(2): 279 - 310.
- [53] JØRGENSEN S E. Structural dynamic model[J]. *Ecological Modelling*, 1986, 31(1): 1 - 9.
- [54] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 346 - 354.
- [55] 牛志广, 王秀俊, 陈彦熹. 湖泊的水生态模型[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 217 - 225.
- [56] 陈彧, 钱新, 张玉超. 生态动力学模型在太湖水质模拟中的应用[J]. *环境保护科学*, 2010, 36(4): 6 - 9.
- [57] 胡志新, 胡维平, 张发兵, 等. 太湖梅梁湾生态系统健康状况周年变化的评价研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 763 - 767.
- [58] 刘永, 周丰, 郭怀成, 等. 基于管理目标的湖泊生态系统动力学[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3434 - 3441.
- [59] 刘玉生, 唐宗武. 滇池富营养化生态动力学模型及其应用[J]. *环境科学研究*, 1991(6): 1 - 8.
- [60] 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 等. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2514 - 2520.
- [61] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550 - 559.
- [62] WOOD P. Ecohydrology: processes, models and case studies[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(12): 2655 - 2656.
- [63] BENKE A C, CHAUBEY I, WARD G M, et al. Flood pulse dynamics of an unregulated river floodplain in the south-eastern U. S coastal plain [J]. *Ecology*, 2000, 81(10): 2730 - 2741.

(上接第 11 页)

- [13] 邵进, 李毅, 宋松柏. 标准化径流指数计算的新方法及其应用[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 79 - 87.
- [14] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 基于标准化径流指数的区域水文干旱指数构建与识别[J]. *山地学报*, 2016, 34(3): 282 - 289.
- [15] KHEDUN C P, CHOWDHARY H, MISHRA A K, et al. Analysis of drought severity and duration based on runoff derived from the Noah Land Surface Model [R]. *Symposium on Data - Driven Approaches to Droughts*, 2011.
- [16] KESKIN F, SORMAN A U. Assessment of the dry and wet period severity with hydrometeorological index [J]. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2010, 2(2): 29 - 39.
- [17] 刘新华, 徐海量, 凌洪波, 等. 阿克苏河流域径流量与降水量丰枯变化和相关性研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 741 - 750.
- [18] 陈青青, 陈超群, 杨志勇, 等. 阿克苏河径流演变及其对气候变化的响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 88 - 99.
- [19] 柏铃, 陈忠升, 王充, 等. 西北干旱区阿克苏河径流对气候波动的多尺度响应[J]. *地理科学*, 2017, 37(5): 799 - 806.
- [20] 李思诺. 变化环境下阿克苏河流域干旱演变特征分析[D]. 河北工程大学, 2015.
- [21] 张玉虎, 刘凯力, 陈秋华, 等. 区域气象干旱特征多变量 Copula 分析——以阿克苏河流域为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(12): 1480 - 1487.
- [22] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152 - 164.
- [23] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 1 - 9.