

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.008

人类活动影响下塔里木河流域气象干旱 向水文干旱传播的规律

薛联青^{1,2}, 白青月¹, 刘远洪¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031)

摘要: 为了解人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律, 基于标准化降水指数 (SPI) 和径流干旱指数 (SDI) 分析了气象、水文干旱的变化特征, 探讨了人类活动对气象干旱向水文干旱传播规律的影响。研究表明: 源流区气象、水文干旱均呈减弱趋势, 干流气象干旱呈减弱趋势, 水文干旱与之相反; 随时间尺度增大, 干旱历时延长; 源流区气象、水文干旱以及干流气象干旱的发生频率受人类活动影响后 (1993 年后) 均降低, 仅干流水文干旱的发生频率升高; 受人类活动影响后, 源流区不同季节气象干旱向水文干旱的传播时间均变长, 干流干旱传播时间除春季外均缩短; 源流区干旱传播时间延长与气候变化有关, 而干流干旱传播时间缩短主要是受人类活动的影响。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 干旱传播时间; 标准化降水指数; 径流干旱指数; 塔里木河流域

中图分类号: P338+.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)01-0057-06

Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities // XUE Lianqing^{1,2}, BAI Qingyue¹, LIU Yuanhong¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China)

Abstract: In order to understand the propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities, the variation characteristics of meteorological and hydrological drought were analyzed based on the standardized precipitation index (SPI) and streamflow drought index (SDI), and the impact of human activities on the propagation law from meteorological drought to hydrological drought was discussed. The results show that the meteorological and hydrological drought in the source region both show a weakening trend. While in the mainstream region, the meteorological drought shows a weakening trend and the hydrological drought is the opposite. As the time scale increases, the drought duration increases. After being affected by human activities (after 1993), the occurrence frequency of meteorological and hydrological drought in the source region as well as the meteorological drought in the mainstream region all decrease only with the occurrence frequency of hydrological drought in the mainstream region increasing. After being affected by human activities, the propagation time from meteorological drought to hydrological drought in different seasons in the source region becomes longer, but the drought propagation time in the mainstream region is shortened except in spring. The extension of drought propagation time in the source region is related to climate change, while the shortened drought propagation time in the mainstream region is mainly affected by human activities.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; drought propagation time; standardized precipitation index; streamflow drought index; Tarim River Basin

塔里木河是中国境内最长的内陆河, 在地理位置、气候环境、地形条件以及人类活动等多重因素作用下, 干旱已成为塔里木河流域最主要、最常见的一

种自然灾害, 对该地区社会经济和生活产生了极大的危害^[1-2], 因此研究塔里木河干旱传播规律对于加强干旱管理以及水文干旱预警具有重要意义。干

基金项目: 国家自然科学基金 (51779074)

作者简介: 薛联青 (1973—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

旱可分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 种类型,其中,气象干旱与降水不足有关^[3],而河流径流量、湖泊和水库蓄水量的减少则会导致水文干旱的产生^[4]。从一种干旱类型转化到另一种干旱类型时,水分循环与能量转化伴随该过程持续进行,水分缺失信号在不同类型干旱之间的转移称为干旱传播^[5]。通常,由于缺乏降水而引起的气象干旱首先出现,在这种情况下,流域地表径流和地下径流缺乏降水的补充,同时,蒸发等水分循环和人类活动、社会生产等过程会对水分进行持续消耗,最终导致地表及地下水位低于正常值,水文干旱由此产生^[6]。

目前对于气象干旱向水文干旱传播的研究主要集中于水文干旱对气象干旱的响应时间。吴杰峰等^[7]利用对数函数构建了干旱特征响应关系的经验模型,得到晋江流域气象干旱向水文干旱传播的临界条件为气象历时 1.45 月、烈度 0.8。李运刚等^[8]基于标准化降水蒸散指数(standard precipitation evapotranspiration index, SPEI)和径流干旱指数(streamflow drought index, SDI)得出流域水文干旱滞后于气象干旱 1~8 月,流域气象干旱是水文干旱的主要驱动力。气象干旱向水文干旱的传播时间往往受到气候变化和人类活动等诸多因素的影响,目前对于干旱传播时间的驱动因子研究较少。Zhou 等^[9]基于时滞相关分析方法探究了水文干旱对气象干旱的反应延迟时间,结果表明气候和土地利用变化是影响气象干旱向水文干旱传播的主要因素。以上研究初步探讨了气象干旱向水文干旱传播时间的影响因素,但人类活动对干旱传播的驱动作用研究较少,在人类活动干扰强烈的地区,揭示干旱传播的机理具有更加重要的意义。

本文基于标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和 SDI 对塔里木河流域气象、水文干旱的时空演变规律进行分析,探究气象干旱向水文干旱传播的规律,进一步揭示人类活动对干旱传播规律的影响,以期为塔里木河流域干旱管理提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

塔里木河流域(图 1)位于塔里木盆地北部,地处天山、昆仑山和阿尔金山之间,是世界上最大的内陆河流域之一,地理坐标为 73°10'E~94°5'E、34°55'N~43°8'N。塔里木河流域地域辽阔,地势落差较大,作为温带干旱大陆性气候的典型代表区域,降水少,蒸发强,早晚温差较大,同时植被覆盖度低,

生态环境较为脆弱^[10]。随着社会的发展,人类活动对于塔里木河流域的影响日益显著。人口的迅速增长以及社会经济的快速发展使得水资源的需求量不断增加,城市扩张、农田开垦、灌溉引水、水利工程建设等人类活动持续影响着流域的水文过程。

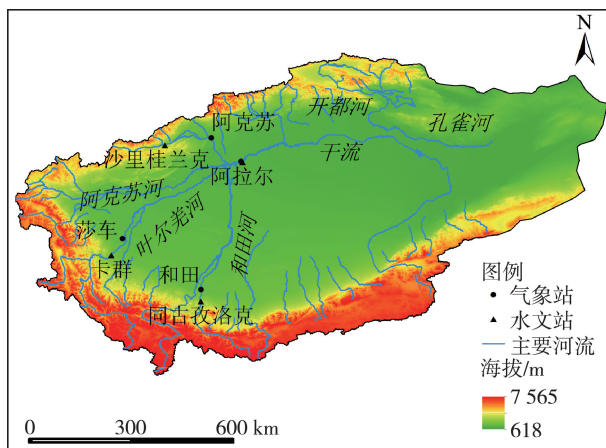


图 1 塔里木河流域示意图

Fig. 1 Sketch map of Tarim River Basin

基于源区阿克苏河的沙里桂兰克水文站、和田河的同古孜洛克水文站和叶尔羌河的卡群水文站 3 个出山口控制站以及干流控制站阿拉尔水文站共 4 个主要水文控制站的径流数据计算径流 SDI, 4 个水文站 1960—2017 年的月径流量资料来源于塔里木河流域管理局,阿克苏河的阿克苏气象站、叶尔羌河的莎车气象站、和田河和田气象站以及干流的阿拉尔气象站同期的月降水量数据来源于中国气象科学数据共享服务网,用于计算气象干旱指数。

1.2 研究方法

1.2.1 干旱指数计算

SPI 仅以降水量数据为输入,不需要其他数据,且计算原理简单,因而广泛应用于气象干旱的评价,多个时间尺度的 SPI 值能够表征不同时期的干旱情况^[11]。SDI 的计算原理^[12]与 SPI 相似, SPI 与 SDI 的干旱等级划分标准^[13]如表 1 所示。

表 1 干旱等级划分标准

Table 1 Classification standard of drought grade

等级	干旱类型	SPI 值	SDI 值
1	无旱	< -0.5	< -0.5
2	轻旱	> -1.0 ~ -0.5	> -1.0 ~ -0.5
3	中旱	> -1.5 ~ -1.0	> -1.5 ~ -1.0
4	重旱	> -2.0 ~ -1.5	> -2.0 ~ -1.5
5	特旱	≤ -2.0	≤ -2.0

1.2.2 干旱传播规律分析方法

基于流量数据的 SDI 能够表征流域的水文过程,与 SPI 比较可以得到降水减少导致的水分亏缺通过水文循环转移到径流所需的时间。利用

Pearson 相关系数对 1~24 月时间尺度 SPI (SPI- n , $n=1, 2, \dots, 24$) 与 1 月时间尺度 SDI (SDI-1) 的时间序列进行交叉相关计算, 比较分析计算得到的相关系数大小, 从而得到气象干旱向水文干旱的传播时间, 具体步骤如下: ①计算流域某月 SPI- n 和 SDI-1 序列值, 得到 25 个干旱指数序列; ②分别计算 SPI- n 与 SDI-1 对应序列的 Pearson 相关系数 (由于不同时间尺度干旱指数的序列长度不同, SPI- n 的序列长度总是小于或等于 SDI-1 的序列长度), 得到 24 个 Pearson 相关系数; ③24 个 Pearson 相关系数中最大的相关系数所对应的 SPI 时间尺度即为从气象干旱到水文干旱最可能的传播时间; ④定义某季节的干旱传播时间为该季节对应 3 个月份干旱传播时间的均值, 年干旱传播时间为 12 个月份干旱传播时间的均值。

根据塔里木河流域已有研究成果^[14-15], 将 1993 年作为塔里木河流域径流突变发生的年份, 据此将研究时段划分为人类活动干扰前 (1960—1993 年)、后 (1994—2017 年) 两个时段, 人类活动干扰前流域自然条件对干旱传播影响较大, 人类活动干扰后的干旱传播是自然条件和人类活动共同作用的结果。两个时段干旱传播的差异可以反映人类活动对干旱传播的影响。

2 结果与分析

2.1 气象干旱和水文干旱的时空演变特征

对阿克苏河、和田河、叶尔羌河和干流的年尺度干旱指数序列进行 Mann-Kendall 趋势检验, 结果见表 2。由表 2 可见, 置信区间均超过 95% ($|Z| \geq 1.64$), 三源流的 SPI 和 SDI 值均呈增大趋势, 干流的 SPI 值呈显著增大趋势, 而 SDI 值呈显著减小趋势。

表 2 干旱指数 Mann-Kendall 趋势检验

Table 2 Mann-Kendall trend test of drought index

流域	Z	
	SPI 系列	SDI 系列
阿克苏河	8.73	7.25
和田河	6.33	5.66
叶尔羌河	7.29	8.40
干流	7.84	-2.88

对 1960—2017 年 4 个水文站多时间尺度 (1~12 月) 的 SPI 和 SDI 值进行计算, 结果见图 2。不同时间尺度干旱指数可表征短期及长期的干旱演变特征, 时间尺度较短时, 干湿交替频繁, 随着时间尺度增大, SPI 和 SDI 能够识别到较为连续的干旱和湿润时段, 干旱历时出现延长的现象。以和田河为例,

SPI 在 1980 年和 1985 年、SDI 在 1990 年和 1995 年左右识别到了连续的干旱时段, SPI 在 1988 年、SDI 在 1995 年左右识别到了连续的湿润时段。三源流的 SPI 变化较为一致, 表明 1960—2017 年源流区气象干旱的空间异质性较小, 但干流在 1980—1990 年和 2010 年左右与源流的干旱情况不同, 表现出区域差异。SDI 反映了 4 条河流的水文干旱具有明显的区域差异, 与 Mann-Kendall 趋势检验结果一致, 源流区水文干旱呈现减弱趋势, 而干流区呈现增强趋势, 与冯怡等^[16]和孙鹏等^[17]的研究结果相近, 说明 SPI 和 SDI 能够对塔里木河流域干旱情况进行有效识别。通过对多时间尺度 SPI 和 SDI 比较发现, 气象干旱和水文干旱虽然密切相关, 但并不同步, 二者在时间尺度上存在一定的关联性。

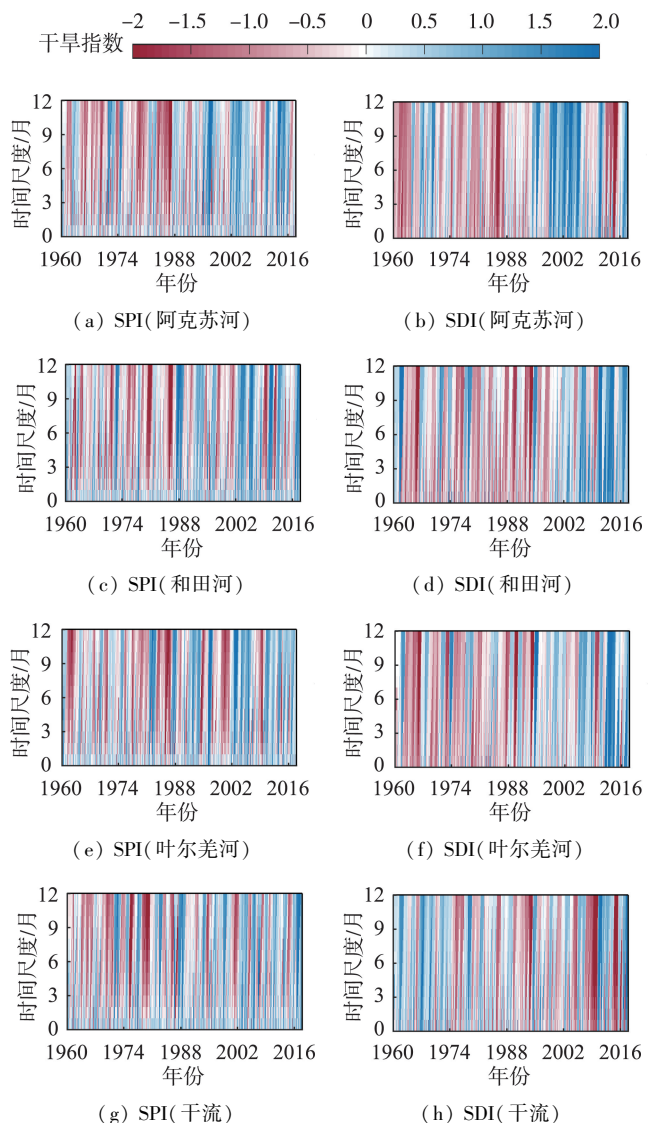


图 2 不同时间尺度的 SPI 和 SDI 变化过程

Fig. 2 Variation of SPI and SDI at different time scales

塔里木河流域在人类活动干扰前后 (即 1993 年前后) 不同干旱指数的干旱频率如表 3 所示。塔里木河流域气象干旱和水文干旱均以轻旱和中旱为主,

表3 人类活动干扰前后各流域的干旱频率

Table 3 Drought frequency of different regions before and after being affected by human activities

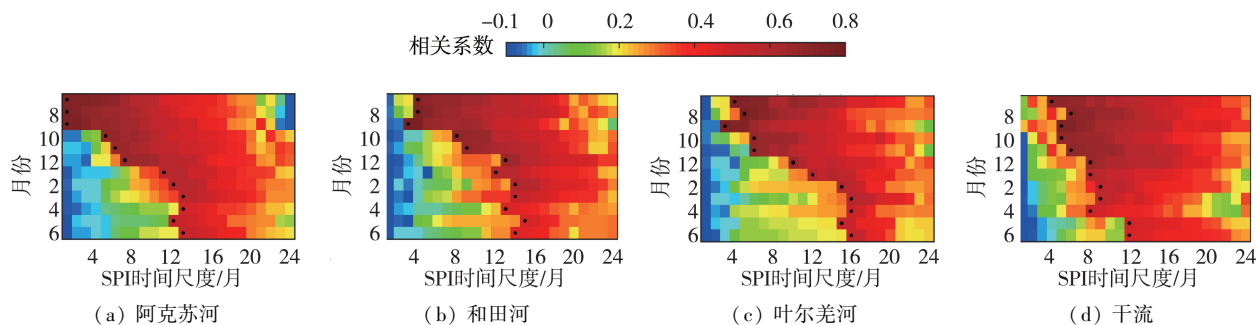
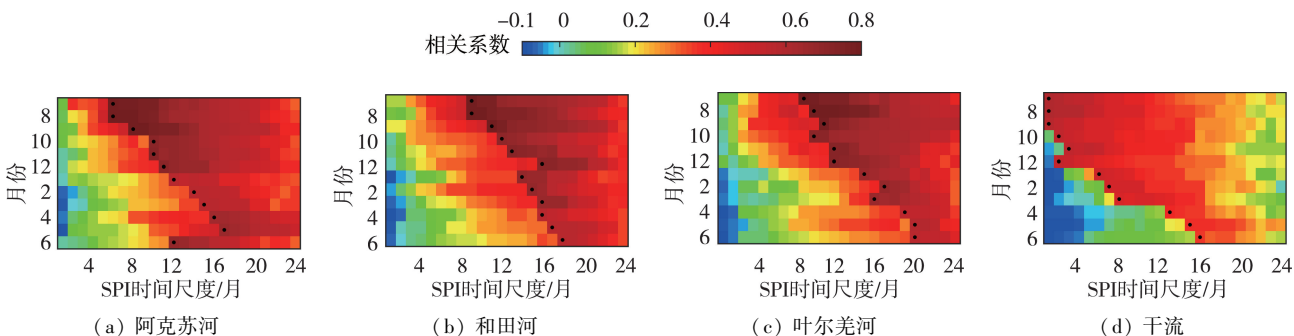
干旱指数	干旱等级	干旱频率/%							
		阿克苏河		和田河		叶尔羌河		干流	
		干扰前	干扰后	干扰前	干扰后	干扰前	干扰后	干扰前	干扰后
SPI	轻旱	21.03	10.47	18.58	11.99	18.14	13.19	17.89	13.40
	中旱	12.37	3.40	9.30	7.18	9.56	6.48	9.60	7.02
	重旱	7.36	2.24	6.02	3.16	5.49	3.47	6.21	3.19
	特旱	2.29	0.67	1.73	0.77	1.62	0.95	2.15	0.69
SDI	轻旱	30.63	9.59	23.59	10.91	23.68	9.34	10.62	17.28
	中旱	14.66	4.84	13.99	8.00	13.16	3.27	9.19	13.19
	重旱	3.32	1.80	4.06	1.41	4.64	2.21	1.08	5.97
	特旱	1.04	2.11	2.12	1.44	3.07	1.72	0.14	5.63

重旱和特旱的发生频率较低。源流区在1993年后气象干旱和水文干旱的发生频率均降低,仅阿克苏河流域水文干旱的特旱事件发生频率出现升高的现象;而干流在1993年后气象干旱事件的频率降低,水文干旱事件的频率升高。

2.2 气象干旱向水文干旱传播的规律

塔里木河流域在人类活动干扰前后SPI-*n*与对应SDI-1的相关关系如图3和图4所示(图中黑点表示各月气象干旱向水文干旱的传播时间,各点对应的相关系数已经过置信水平为90%的置信度检验)。人类活动干扰前后(图3)源流区气象干旱向水文干旱的年传播时间比干流长1~3月,发源于天山山脉的阿克苏河流域干旱的年传播时间为7~8月,发源于昆仑山脉的叶尔羌河与和田河流域干旱

的年传播时间为10~11月。塔里木河流域气象干旱向水文干旱的传播具有明显的季节特征,源流区气象干旱向水文干旱的传播时间为夏季最短(1~6月),其次是秋季(5~13月),冬季较长(11~16月),春季最长(12~16月),干流的干旱传播规律与之相似,夏、秋、冬、春季传播时间分别为5月、6月、9月和11月。气象干旱向水文干旱的传播与气候类型密切相关,干旱地区干旱传播较慢,冬季传播较夏季慢^[18]。塔里木河流域夏季降水多、温度高,能够加快径流对降水的响应时间,而冬季河道冻结,水循环减缓,径流对降水的响应时间变长,春季气温上升后,山区冰川积雪融化形成地表径流^[19],能够缓解水文干旱,延长干旱传播时间。在源流区,阿克苏河流域夏秋季水文干旱对气象干旱的响应比其他流

图3 人类活动干扰前SPI-*n*与SDI-1的相关系数Fig. 3 The correlation coefficient between SPI-*n* and SDI-1 before being affected by human activities图4 人类活动干扰后SPI-*n*与SDI-1的相关系数Fig. 4 The correlation coefficient between SPI-*n* and SDI-1 after being affected by human activities

域快3~4月,春冬季的干旱传播时间与其他流域相近。干流气象干旱向水文干旱的传播时间除夏季长于源流区1~4月外,其余季节干旱传播均比源流区短1~6月。

塔里木河流域在人类活动干扰后(图4)源流区气象干旱向水文干旱的年传播时间(11~14月)变长,干流干旱的年传播时间缩短。与人类活动干扰前相似,气象干旱向水文干旱的传播依然表现出季节性变化:源流区气象干旱向水文干旱的传播时间为夏季最短(6~11月),其次是秋季(10~14月),冬季较长(12~17月),春季最长(12~20月),干流的干旱传播时间在夏、秋、冬、春季分别为1月、2月、7月和11月。源流区的干旱传播时间在夏、秋、冬、春季分别延长了6月、4月、2月和4月,其中阿克苏河流域夏秋季水文干旱对气象干旱的响应仍然表现出比其他流域快3~4月的特点,春冬季的干旱传播时间与其他流域相近;干流干旱传播时间与源流区表现出不同的变化规律,在夏、秋、冬季分别缩短4月、4月和2月,在春季延长4月,其干旱传播时间在各个季节均短于源流区。

2.3 人类活动对干旱传播时间的影响

气象干旱向水文干旱的传播过程受许多因素的影响^[20],其中气候变化能够直接影响干旱的发展,进而影响气象干旱向水文干旱的传播^[9]。1994—2013年塔里木河源流出山口地表径流量年均增加18.44亿 m^3 ,气候变化对径流的正影响可达到62.7%^[21],且呈增大趋势。随着气候变暖,源流区山地冰川积雪呈加速消融之势^[19],对径流补充作用增强,降低了水文干旱的发生频率,源流区各个季节和干流春季的气象干旱向水文干旱的传播时间整体变长。在三源流中,阿克苏河流域的降水量最大^[21],阿克苏河流域降水不足导致的水分短缺状态更易影响径流,从而导致水文干旱,因此阿克苏河流域气象干旱向水文干旱的传播时间比其他两条源流更短。

在西北干旱区气候整体暖湿化的背景下,干流气象干旱向水文干旱的传播时间与源流区表现出不同的变化,这主要是由于土地利用和耗用水等人类活动的影响^[22]。研究表明,人类活动是干流阿拉尔水文站流量减小的主要影响因素,多年来人类活动对塔里木河干流径流量减小的贡献率一直维持在60%以上,且气候暖湿化造成的径流增加量被逐年加剧的人类活动所消耗^[23]。源流区出山口至阿拉尔水文站的区间耗用水量以0.98亿 m^3/a 的速率呈显著增加的趋势,一般认为主要是流域内人类大规模的水土资源开发所致,如耕地面积的扩张^[24]。山

前平原区随着开垦活动的增加,耕地面积从1970年的9055.42 km^2 增加到2015年的17125.53 km^2 ,通过河道引水和地下水开采的灌溉引水量持续增加,使得河道的径流量减小^[25],在发生气象干旱时,河道无法维持正常蓄水量,水分不足状态更易影响径流而发生水文干旱,缩短了气象干旱到水文干旱的传播时间,源流区出山口至阿拉尔水文站的农业活动缩短了6~11月的干旱传播时间,传播时间为4~6月。同时,城市建设用地面积扩大,使得不透水层面积增加,阻碍了水分下渗等对径流的补充作用,改变了研究区径流的水文过程,缩短了干旱的传播时间。GDP和人口与耗用水量有直接的关系^[26],1990年后,塔里木河流域人口以每年77万人的速度不断增加,GDP以年均65亿元的速度迅速增长,工业用水量和生活用水量增加,源流区区间耗用水量明显上升,人类活动对水资源的消耗量增加,干旱的发展加快。

此外,水利工程的建设和运行对流域的水文循环过程也有一定的影响^[27]。水库在雨季拦截洪峰进行蓄水,在旱季泄水用于灌溉等,会改变枯水期降水与径流的关系。水利工程对径流的调节作用能够明显缓解水文干旱,延长干旱传播时间。但是,由于人类活动的不确定性,人类活动对干旱传播的影响和干旱传播的机理仍有待进一步研究。

3 结论

a. 塔里木河流域源流区气象、水文干旱均呈减弱趋势,干流气象干旱呈减弱趋势,水文干旱与之相反;时间尺度较短时,干湿交替频繁,随时间尺度增大,SPI和SDI能够识别到较为连续的干旱和湿润时段,干旱历时出现延长的现象。

b. 塔里木河流域气象干旱和水文干旱均以轻旱和中旱为主,重旱和特旱的发生频率较低。源流区在1993年后气象干旱和水文干旱的发生频率均降低,干流在1993年后气象干旱发生频率降低,水文干旱发生频率升高。

c. 塔里木河流域气象干旱向水文干旱的传播具有明显的季节特征。受人类活动干扰后,源流区气象干旱向水文干旱的传播时间夏季最短(6~11月),其次是秋季(10~14月),冬季较长(12~17月),春季最长(12~20月);干流干旱传播规律与之相似,夏、秋、冬、春季传播时间分别为1月、2月、7月和11月。

d. 受人类活动干扰后,源流区气象干旱向水文干旱的传播时间受气候变化影响较大,随着气温升高、降水增多,冰川积雪的消融速度变快,气象干旱

向水文干旱的传播时间在各个季节均变长,在夏、秋、冬、春季分别延长了6月、4月、2月和4月。

e. 受人类活动干扰后,干流夏、秋、冬季的气象干旱向水文干旱的传播时间缩短,春季变长。干流干旱传播时间主要受人类活动的影响,同时城市建设面积的扩大和耗用水的增加也会缩短干旱传播时间。

参考文献:

[1] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等.塔里木河生态输水的累积生态响应[J].水资源保护,2019,35(5):120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5):120-126. (in Chinese))

[2] 吴志勇,程丹丹,何海,等.综合干旱指数研究进展[J].水资源保护,2021,37(1):36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):36-45. (in Chinese))

[3] 石朋,詹慧婕,瞿思敏,等.黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J].水资源保护,2022,38(3):80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):80-86. (in Chinese))

[4] 郑丽虹,刘懿,任立良,等.黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J].水资源保护,2022,38(3):87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):87-95. (in Chinese))

[5] APURV T, SIVAPALAN M, CAI Ximing. Understanding the role of climate characteristics in drought propagation [J]. Water Resources Research, 2017, 53(11): 9304-9329.

[6] 顾磊,陈杰,尹家波,等.气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J].水科学进展,2021,32(3):321-333. (GU Lei, CHEN Jie, YIN Jiabo, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3):321-333. (in Chinese))

[7] 吴杰峰,陈兴伟,高路.水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J].灾害学,2017,32(1):199-204. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1):199-204. (in Chinese))

[8] 李运刚,何娇楠,李雪.基于SPEI和SDI指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J].地理科学进展,2016,35(6):758-767. (LI Yungang, HE Jiaonan, LI Xue. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI indices [J]. Progress in Geography, 2016, 35(6):758-767. (in Chinese))

[9] ZHOU Junju, LI Qiaoqiao, WANG Lanying, et al. Impact of climate change and land-use on the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Eastern Qilian Mountains [J]. Water, 2019, 11(8):1602.

[10] 薛联青,王晶,魏光辉.基于PSR模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1):13-19. (in Chinese))

[11] 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.

[12] NALBANTIS I, TSAKIRIS G. Assessment of hydrological drought revisited [J]. Water Resources Management, 2009, 23(5):881-897.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.气象干旱等级:GB/T 20481—2017[S].北京:中国标准出版社,2006.

[14] 杨帆.塔里木河流域水文极端事件及对外界胁迫响应研究[D].南京:河海大学,2018.

[15] 凌红波,徐海量,张青青,等.新疆塔里木河三源流径流量变化趋势分析[J].地理科学,2011,31(6):728-733. (LING Hongbo, XU Hailiang, ZHANG Qingqing, et al. The annual runoff variation trends in the three headstreams of Tarim River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6):728-733. (in Chinese))

[16] 冯怡,薛联青,张洛晨.三种气象干旱指数在塔里木河流域应用的对比分析[J].水电能源科学,2018,36(9):23-26. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Luochen. Comparison and analysis of three meteorological drought indexes in the Tarim River Basin [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9):23-26. (in Chinese))

[17] 孙鹏,孙玉燕,姚蕊,等.基于标准化径流指数的水文干旱特征分析:以塔里木河为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(2):261-268. (SUN Peng, SUN Yuyan, YAO Rui, et al. Analysis on hydrological drought characteristics based on standardized runoff index: a case study in the Tarim River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2):261-268. (in Chinese))

(下转第72页)

- [26] 翟禄新,冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857. (ZHAI Luxin, FENG Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847-857. (in Chinese))
- [27] 任余龙,石彦军,王劲松,等. 1961—2009 年西北地区基于 SPI 指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 938-948. (REN Yulong, SHI Yanjun, WANG Jinsong, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Northwest China during 1961-2009 with Standardized Precipitation index[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 938-948. (in Chinese))
- [28] 任培贵,张勃,张调风,等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 182-187. (REN Peigui, ZHANG Bo, ZHANG Tiaofeng, et al. Trend analysis of meteorological drought change in Northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 182-187. (in Chinese))
- [29] 汪青春,秦宁生,张占峰,等. 青海高原近 40a 降水变化特征及其对生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007(1): 153-158. (WANG Qingchun, QIN Ningsheng, ZHANG Zhanfeng, et al. Precipitation changes and its impact on eco-environment of Qinghai Plateau for the last 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2007(1): 153-158. (in Chinese))
- [30] 徐慧,管蓓,薛艳,等. 青海省近 50 年降水集中性的时空变化特征研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 6-9. (XU Hui, GUAN Bei, XUE Yan, et al. Spatio-temporal variation of precipitation concentration in Qinghai in recent 50 years[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 6-9. (in Chinese))
- [31] 郭素荣. 1960—2010 年青海省气候变化的时空特征分析[D]. 兰州:西北师范大学, 2012.
(收稿日期:2021-10-26 编辑:王芳)

(上接第 62 页)

- [18] GEVAERT A I,VELDKAMP T I E,WARD P J. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(9): 4649-4665.
- [19] 徐丽萍,李鹏辉,李忠勤,等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946-959. (XU Liping, LI Penghui, LI Zhongqin, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang mountains[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 946-959. (in Chinese))
- [20] DING YiBo, XU JiAtun, WANG Xiaowen, et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283: 111980.
- [21] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河源流区近 50 a 径流量与气候变化关系研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 204-209. (FU Lixin, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Relation between climate change and runoff volume in the headwaters of the Tarim River during the last 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(1): 204-209. (in Chinese))
- [22] XU Yang, ZHANG Xuan, WANG Xiao, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124147.
- [23] 陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [24] 周海鹰,沈明希,陈杰,等. 塔里木河流域 60 a 来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 221-229. (ZHOU Haiying, SHEN Mingxi, CHEN Jie, et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River Basin during the last 60 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 221-229. (in Chinese))
- [25] 薛联青,杨帆,杨昌兵,等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 1-6. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 1-6. (in Chinese))
- [26] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))
- [27] 薛联青,张卉,张洛晨,等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 189-196. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3): 189-196. (in Chinese))
(收稿日期:2021-10-21 编辑:熊水斌)