

水文干旱与气象干旱临界转变条件的判定及响应关系

王志霞, 穆振侠, 陈翠彦

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 水文干旱与气象干旱的响应关系对于建立健全干旱监测预报系统具有重要意义。基于区域水文干旱指数(*SHI*)与标准化降水指数(*SPI*),结合游程理论和非线性关系模型分析喀什河流域水文干旱与气象干旱的特征、响应关系及驱动因素。结果表明:水文干旱的年平均干旱历时和干旱烈度大于气象干旱,且随着*SPI*和*SHI*时间尺度的增加,识别出的干旱历时和干旱烈度也有所增加。基于三参数($\log 3 P1$)对数函数(Logarithm)模型可以更好地表征两者的响应关系。在3个月尺度下,气象干旱历时至少为1.10个月且干旱的烈度至少为0.83时,将诱发水文干旱;在6个月尺度下,气象干旱历时至少为1.60个月且干旱的烈度至少为0.91时,易发生水文干旱。

关键词: 水文干旱; 气象干旱; 干旱指数; 非线性关系模型; 临界转变条件; 响应关系

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0119-07

Judgment of critical transition conditions and the response relationship of hydrological and meteorological droughts

WANG Zhixia, MU Zhenxia, CHEN Cuiyan

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Exploring the response relationship between hydrological and meteorological droughts is of great significance for establishing a sound drought monitoring and forecasting system. Drought characteristics were extracted using a combination of the regional hydrological drought index (*SHI*) and standardized precipitation index (*SPI*), then the response relationship and driving factors of hydrological droughts and meteorological droughts in Kashi River Basin were analyzed by nonlinear function model and runs theory. The results indicate that the average annual drought duration and magnitude of hydrological droughts were greater than that of meteorological droughts, and with the increase of *SPI* and *SHI* time scale, the identified drought duration and magnitude also increased. The logarithmic function model with three parameters can be used to better characterize the response relationship between hydrological and meteorological droughts. According to this model, when the meteorological drought last no less than 1.10 months and the drought magnitude is no less than 0.83, the hydrological drought will be induced at 3-month scale. When the meteorological drought last no less than 1.60 months and the drought magnitude is no less than 0.91, the hydrological drought will easily occur at 6-month scale.

Key words: hydrological drought; meteorological drought; drought index; nonlinear function model; critical transition condition; response relationship

1 研究背景

干旱是一种反复出现的自然现象,在时空范围内广泛传播,会对区域水文循环和水量平衡产生重

要的、不利社会经济发展的影响。IPCC 第四和第五次评估报告指出,近百年来全球地表气温将上升 $0.3 \sim 4.8^{\circ}\text{C}$,全球降水空间格局将在21世纪发生相应的变化,如果全球气温继续上升,干旱发生频率和强

收稿日期:2019-11-29; 修回日期:2020-02-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51969029、51469034、51569031);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01A16);新疆农业大学水利工程重点学科研究项目(SLXK2018-02)

作者简介:王志霞(1989-),女,新疆伊犁州,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。

通讯作者:穆振侠(1980-),男,山东省莒县,博士,教授,硕士生导师,主要从事水文水资源研究。

度会出现增加趋势^[1-3]。同时,据世界气象组织统计,气象灾害造成的损失占自然灾害损失总额的 85% 以上,其中,约 50% 的气象灾害是由干旱引起^[4],已严重威胁了人类生存、粮食安全以及区域的可持续发展。20 世纪末,不同类型干旱在中国频发,尤其以降水少、蒸发量大、水资源缺乏的内陆干旱地区偏多^[5-7]。因此,对该区域干旱进行及时监测、分析和评估研究,将有助于提高对干旱风险的认识,也有助于加强干旱灾害的防治工作。

气象干旱形成较早,水文干旱滞后于气象干旱,两种干旱产生的时间差、形成的相关潜在条件和不同变量的空间变异性,对于定量描述两种干旱的响应关系产生了一定的限制^[8-11]。因此,如何定量描述气象干旱与水文干旱间的响应关系,对于准确理解干旱演变特点、了解不同种类干旱之间的联系以及对水文干旱的预报具有重要意义。

目前,国内外学者研究水文干旱对气象干旱响应的关系方法包括多变量联合分布法、概率统计方法和线性或非线性模型等方法。多变量联合分布法主要采用理论或经验方法联合水文、气象要素来构建多变量干旱指标进行干旱评价^[12]。理论方法适用于基于线性组合的多变量干旱指数,如线性组合干旱指数 (*LDI*)^[13];经验方法适用于基于百分位数或(概率)经验估计的任何多变量干旱指数,如多元标准化干旱指数 (*MSDI*)^[14-15]、总干旱指数 (*ADI*)^[16]。概率统计方法是利用水文气象干旱变量来理解干旱响应过程,包括响应速率、响应概率、持续时间和烈度等,多以条件概率理论^[17]和贝叶斯模型^[18]为主,该方法的缺点是计算较为复杂且侧重于预测水文干旱发生的概率。线性或非线性模型方法是利用线性或非线性模型来研究水文与气象干旱在持续时间、严重程度和烈度方面的关系,但线性模型并没有完全考虑复杂环境背景下的干旱传播机制,特别是不能适应人类活动引起的水文变化过程,而采用非线性模型可较好地弥补这一缺陷^[19],Wu 等^[20]发现对数函数适用于解释水文与气象干旱之间的关系。

本文以喀什河流域为研究区,采用标准化降水指数 (*SPI*)^[21]和区域水文干旱指数 (*SHI*)^[22]分别代表气象干旱和水文干旱,结合游程理论、考虑响应时间和干旱烈度,采用对数函数建立水文干旱对气象干旱响应关系的非线性模型,从不同时间尺度探究气象干旱转变为水文干旱的临界条件,并综合考

虑各方面因素分析研究区水文干旱与气象干旱变化的驱动因素,以期为研究区干旱预警提供理论依据。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

喀什河流域位于天山西段以南,地理坐标为 $81^{\circ}40' \sim 85^{\circ}10'E$, $43^{\circ}25' \sim 44^{\circ}15'N$ 。河流全长为 304 km,乌拉斯台水文断面以上的集水面积为 9 541 km²,地势由东向西逐渐降低,流域高程在 1 364 m ~ 4 584 m。河流以冰川融雪水及雨水补给为主,年最大、最小径流量分别为 396.0、18.8 m³/s,最高、最低气温分别为 36.5、-13.7℃。

2.2 数据来源

收集 1960 - 2014 年乌拉斯台水文站逐月径流数据及 1960 - 2005 年降水数据,考虑到 2005 年后乌拉斯台站降水数据停测,为保证研究区数据的完整性和一致性,借助邻近尼勒克气象站 1960 - 2014 年逐月降水数据进行插补展延,水文数据来源于《新疆水文年鉴》,气象数据来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>)。

3 研究方法

3.1 干旱指标

SPI 指数只需要降水数据,计算简单,具有多时间尺度的优点,且为世界气象组织推荐的气象干旱计算指标。*SHI* 指数是基于标准化径流指数 (*SRI*)^[23]进行计算,该方法综合考虑了水文、气象双因素特征,弥补了指数因素较单一的这一缺陷,可根据研究区水文、气象等多因素重新进行干旱等级划分。因此,本文采用 *SPI* 指数衡量气象干旱, *SHI* 指数衡量水文干旱,干旱等级标准见表 1。

SHI 指数计算内容包括:(1) 基于 *SRI* 指数计算得到 *SRI* 序列频率分布直方图,并采用正态分布函数对 *SRI* 指数频率分布进行拟合(以 K-S 方法对拟合效果进行检验,本研究 K-S 检验结果为 0.87,通过 0.05 的显著性检验),进而得到累积频率分布曲线,结果见图 1 所示。(2) 采用径流距平百分比 (*Pa*)^[24]和降水距平百分比 (*P*)^[25],获取 *SHI* 指数发生特旱、重旱、中旱、轻旱、无旱等级的频率分别为 9.17%、22.36%、13.96%、12.33%、42.17%,进而获取 *SHI* 指数干旱等级的累积频率为 9.17%、31.53%、45.49%、57.83%、100%,从而得到 *SHI* 指数干旱等级临界值,见表 1。

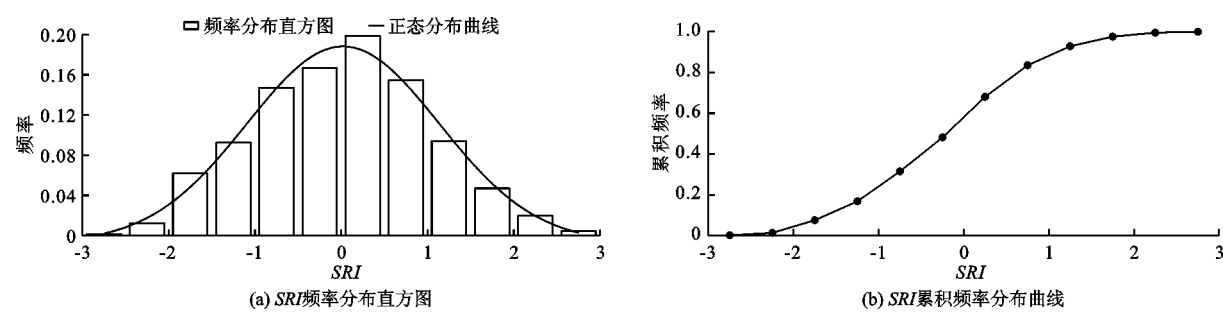


图 1 SRI 频率分布直方图和频率分布曲线

表 1 干旱等级划分表

干旱等级	SPI 值	SHI 值
1. 无旱	$-0.5 < SPI$	$-0.02 < SHI$
2. 轻旱	$-1 < SPI \leq -0.5$	$-0.35 < SHI \leq -0.02$
3. 中旱	$-1.5 < SPI \leq -1$	$-0.75 < SHI \leq -0.35$
4. 重旱	$-2 < SPI \leq -1.5$	$-1.67 < SHI \leq -0.75$
5. 特旱	$SPI \leq -2.0$	$SHI \leq -1.67$

3.2 干旱要素的识别

基于游程理论^[26],以计算出的干旱指数为基础,从干旱指数序列中分离出干旱事件的干旱历时(D)和干旱烈度(M)2个特征变量。以干旱等级划分标准(表1)设定3个截断水平 R_0 、 R_1 和 R_2 (R 表示干旱指数 SPI 或 SHI),其中对于 SPI 指数而言, R_0 、 R_1 和 R_2 分别为0、-0.5、-1,对于 SHI 指数而言, R_0 、 R_1 和 R_2 分别为0、-0.02、-0.35。干旱历时 D 为干旱起始至结束的时段数,干旱烈度 M 为干旱开始至结束时间内干旱指数值小于阈值 R_1 时段的 R_1 与指数值之差的累积和^[27]。

3.3 水文-气象临界关系模型的确定

通过比较拟合函数与干旱特征要素点(干旱历时或干旱烈度)的对应程度,确定水文干旱与气象干旱要素序列服从的最佳分布,作为水文-气象临界关系的非线性函数模型,并通过相对误差(RE)来验证模型的准确度。

4 结果与分析

4.1 研究区典型水文干旱与气象干旱事件的识别

4.1.1 水文-气象干旱要素的识别 考虑该区域为季节性干旱,基于研究区3个月尺度的 SHI 和 SPI (分别表示为 $SHI3$ 和 $SPI3$)及6个月尺度的 SHI 和 SPI (分别表示为 $SHI6$ 和 $SPI6$),采用游程理论识别1960-2014年喀什河流域发生水文干旱与气象干旱的事件,并通过《气象灾害大典》^[28]筛选出与

历史干旱相符的典型干旱事件。表2和3分别为3个月和6个月尺度的1960-2014年研究区典型气象和水文干旱事件特征要素识别。由表2和3可知, SPI 与 SHI 在3个月、6个月尺度下所识别的干旱事件分别为23、17次,56 a间 $SPI3$ 与 $SHI3$ 的干旱历时最长分别为18个月(持续时间从1974年1月至1976年3月,干旱烈度为7.4)、17个月(持续时间从1974年1月至1975年7月,干旱烈度为12.17), $SPI6$ 与 $SHI6$ 的干旱历时最长分别为16个月(持续时间从1962年3月至1963年9月,干旱烈度为16.05)、15个月(持续时间从1962年6月至1963年8月,干旱烈度为10.36)。总体来说,干旱持续时间越长的干旱年份,干旱烈度也越大,据相关文献[28-29]记载,1962-1963、1974-1975年发生不同程度干旱,对新疆农牧业生产和经济发展产生了极大的影响,这进一步佐证了干旱历时长和干旱烈度大的干旱事件所引起的灾害后果不容忽视。

气象干旱和水文干旱均有明显的时段性,干旱历时的长短和干旱烈度的大小在不同年代上有所差异。在20世纪60年代,干旱频繁发生,几乎每两年发生一次,干旱持续时间最长,干旱烈度最大。在20世纪70年代和21世纪初,干旱历时较短,干旱烈度相对较小。20世纪80年代,干旱频繁发生,但其烈度相对较小。在20世纪90年代,干旱持续的时间相对较短,但其程度相对较高。相对于气象干旱而言,水文干旱具有一定的滞后性。气象干旱多开始于春季,结束于夏季,这是由于气象干旱是降水和蒸发增加而引起的,当夏季降水增加或蒸发减小使其之间的均衡关系得到恢复时,则气象干旱结束;水文干旱多呈现出始于春末、结束于夏季或夏季开始、秋末结束,这是由于水文干旱是地表水和地下水的短缺引起的,春季雨水和秋末融雪径流的增加,增强了水文过程,缓解了地表水和地下水收支不平衡的状态,水文干旱得以缓解或结束。这与于晓彤^[30]分析子牙河流域气象干旱对水文干旱的影响研究结果一致。

表2 1960—2014 年研究区典型气象干旱和水文干旱事件特征要素识别(3 个月尺度)

序号	气象干旱 ($SPI3$)			水文干旱 ($SHI3$)		
	时间/(年-月)	干旱历时 D /月	干旱烈度 M	时间/(年-月)	干旱历时 D /月	干旱烈度 M
1	1961-04—1961-08	5	3.92	1961-05—1961-09	5	4.47
2	1961-12—1963-03	15	12.66	1962-04—1963-10	15	11.00
3	1965-01—1965-07	7	7.07	1965-01—1965-11	11	10.28
4	1967-03—1967-07	5	3.10	1967-07—1967-11	5	4.10
5	1967-11—1968-10	9	8.24	1968-06—1968-12	7	7.74
6	1974-01—1976-03	18	7.40	1974-01—1975-07	17	12.17
7	1976-07—1976-09	3	1.08	1976-07—1976-09	3	2.00
8	1977-04—1977-09	6	3.53	1977-07—1977-12	6	3.25
9	1978-09—1978-11	3	2.98	1978-03—1978-05	3	2.46
10	1982-01—1982-06	5	1.09	1982-06—1982-08	3	1.43
11	1982-11—1983-04	6	4.00	1982-12—1983-05	6	6.45
12	1983-08—1983-12	5	3.87	1983-08—1983-12	5	3.81
13	1985-06—1985-09	3	1.38	1985-06—1985-07	2	1.39
14	1986-08—1986-11	4	1.54	1986-06—1986-08	3	2.24
15	1988-12—1989-05	6	2.68	1989-04—1989-09	6	4.66
16	1990-08—1990-10	3	0.98	1990-08—1990-10	3	2.48
17	1991-04—1991-05	2	1.81	1991-04—1991-08	5	2.91
18	1991-09—1992-03	6	4.41	1992-03—1992-09	7	7.46
19	1995-02—1996-01	9	10.20	1995-04—1996-03	12	9.00
20	1997-04—1997-12	9	10.66	1997-07—1998-05	11	9.54
21	2008-01—2008-04	4	2.45	2008-01—2008-04	4	3.46
22	2008-07—2008-10	4	1.83	2008-11—2009-01	3	1.90
23	2014-04—2014-09	6	4.33	2014-01—2014-07	7	4.42

表3 1960—2014 年研究区典型气象干旱和水文干旱事件特征要素识别(6 个月尺度)

序号	气象干旱 ($SPI6$)			水文干旱 ($SHI6$)		
	时间/(年-月)	干旱历时 D /月	干旱烈度 M	时间/(年-月)	干旱历时 D /月	干旱烈度 M
1	1961-01—1961-10	8	5.14	1961-05—1961-12	8	6.11
2	1962-03—1963-09	16	16.05	1962-06—1963-08	15	10.36
3	1965-02—1965-10	9	7.51	1965-03—1965-12	10	8.28
4	1967-02—1967-07	5	2.02	1967-07—1967-12	6	2.91
5	1968-06—1968-12	7	4.36	1968-06—1968-12	7	5.17
6	1974-01—1976-05	12	5.96	1974-05—1975-05	13	9.85
7	1975-12—1976-03	4	1.25	1976-07—1976-10	4	1.29
8	1977-04—1977-12	9	4.73	1977-07—1978-03	9	5.13
9	1982-04—1983-04	9	4.64	1982-06—1983-05	12	5.45
10	1985-06—1985-10	5	1.56	1985-03—1985-07	5	3.99
11	1989-03—1989-07	4	1.82	1989-04—1989-07	4	2.9
12	1991-05—1992-03	11	6.58	1991-04—1992-02	12	5.76
13	1995-02—1995-12	10	7.72	1995-04—1995-12	9	6.58
14	1997-06—1997-12	7	9.92	1997-09—1998-05	9	7.19
15	2008-03—2008-06	4	2.87	2008-01—2008-04	4	5.11
16	2008-08—2008-12	4	1.12	2008-06—2008-08	3	0.80
17	2014-02—2014-09	9	6.36	2014-01—2014-09	9	6.21

4.1.2 不同时间尺度的干旱要素变化分析 图 2 为不同时间尺度 SPI 与 SHI 干旱历时和烈度的变化趋势图。

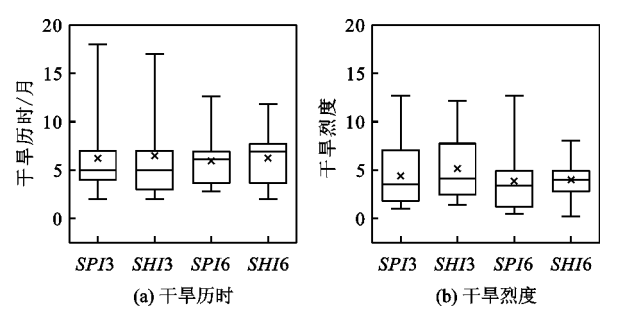


图 2 研究区不同时间尺度 SPI 与 SHI 干旱历时和烈度的变化趋势

由图 2 可知:(1)随着 SHI 和 SPI 时间尺度的增加,识别出的干旱历时有所增大,相应的干旱烈度也相应的增加,但干旱烈度增加幅度略小于干旱历时,这与孙洋洋^[31]分析渭河流域水文干旱与气象干旱的关系结果一致。(2)水文干旱的年平均干旱历时和干旱烈度大于气象干旱,这与蒋桂芹^[32]分析的结论相一致,出现这一特征的可能原因是喀什河流域以降雨和冰雪融水为主,河川径流量对于降水的变

化更为敏感^[33-34];穆振侠等^[35]通过分析喀什河流域土地利用的变化发现,研究区草地面积比重较大,主要分布在喀什河中下游区域,降水的截留、土壤下渗水量的增多及蒸腾作用增强等环节,在一定的时空尺度范围内影响了流域产流量的变化,较大可能诱发水文干旱。

4.2 研究区水文-气象干旱的临界关系

4.2.1 水文-气象干旱临界关系模型的构建 根据 3 个月和 6 个月尺度干旱特征统计样本集(表 2 和 3),通过非线性函数法建立水文干旱对气象干旱的响应关系(图 3)。在 3 个月尺度上,以前 13 场干旱事件用于模型的构建,剩余场次干旱事件用于模型验证;在 6 个月尺度上,以前 9 场干旱事件用于模型的构建,剩余场次干旱事件用于模型验证。研究发现对数函数(logarithm)中三参数($\log 3P1$)的非线性函数模型与干旱特征拟合效果最好。因此,采用对数函数三参数非线性函数模型用于水文干旱对气象干旱的响应关系的探究。具体如下:

$$y = a + b \ln(x + c) \tag{1}$$

式中: y 为水文干旱历时(月)或烈度; x 为气象干旱历时(月)或烈度; a 、 b 、 c 均为系数。

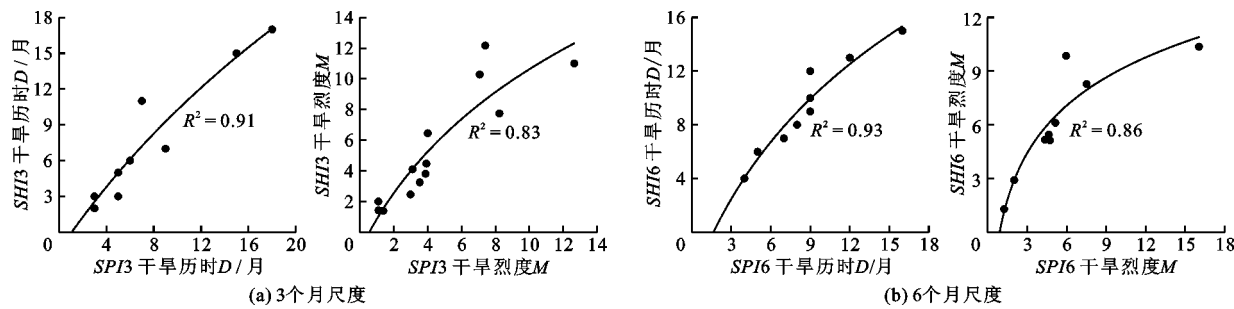


图 3 研究区不同时间尺度水文-气象干旱特征要素拟合曲线

表 4 为不同时间尺度水文-气象的非线性临界关系。由表 4 可知, $SPI3$ 与 $SHI3$ 的干旱历时、干旱烈度的相关系数分别为 0.95、0.91; $SPI6$ 与 $SHI6$ 的干旱历时、干旱烈度的相关系数分别为 0.96、0.93, 均通过 0.05 显著水平检验。分析认为,水文干旱和气象干旱关系密切,两者的干旱历时相关性最好,其次是干旱烈度;随着干旱时间尺度的增加,干旱历时和干旱烈度的相关系数均有所增加,当干旱历时和干旱烈度从 3 个月增加到 6 个月尺度时,其相关系数分别增加了 0.01、0.02。

4.2.2 水文-气象干旱临界关系模型的验证 图 4 为验证期水文干旱特征要素的模拟值与实际值的对比关系。由图 4 可知,除 3 个月尺度第 16 场干旱

事件的干旱烈度和第 17 场干旱事件的干旱历时以及 6 个月尺度第 10 场干旱事件的干旱烈度相对误差较大以外,其余水文干旱的 RE 值一般小于 30%。总体上实测值与模拟值吻合较好,可作为水文与气象干旱关系的可靠表征。

表 4 研究区不同时间尺度水文-气象的临界关系

时间尺度	干旱特征要素	相关系数(R)	临界关系
3 个月	干旱历时	0.95	$y = -84.28 + 28.03 \ln(x + 19.14)$
	干旱烈度	0.91	$y = -16.20 + 10.04 \ln(x + 4.48)$
6 个月	干旱历时	0.96	$y = -25.09 + 13.29 \ln(x + 4.96)$
	干旱烈度	0.93	$y = -0.01 + 3.92 \ln(x + 0.09)$

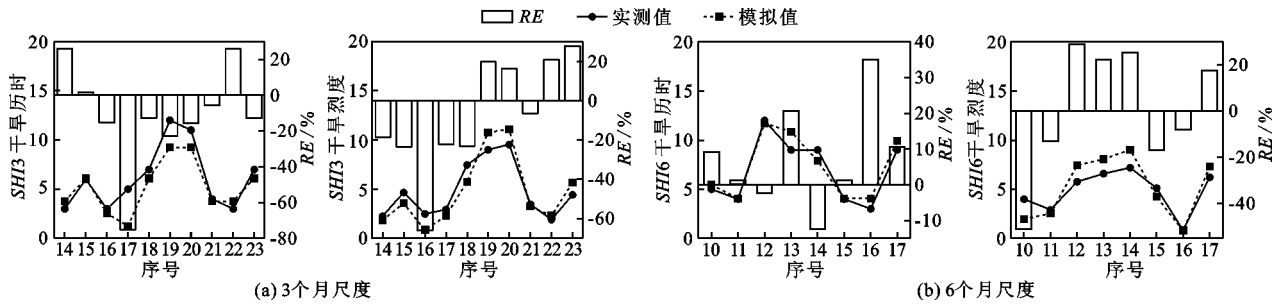


图4 研究区不同时间尺度水文干旱特征实测值与模拟值对比

4.3 研究区水文-气象干旱临界转变条件的判定

当水文干旱历时和烈度为0时,可将气象干旱的历时和烈度定义为水文干旱的临界转变条件。表5为不同尺度气象干旱历时和烈度的临界转变条件。由表5可知,在3个月尺度下,气象干旱历时至少为1.10个月且干旱烈度至少为0.83时,将诱发水文干旱开始发生;在6个月尺度下,气象干旱历时至少为1.60个月且干旱烈度至少为0.91时,将诱发水文干旱。综合分析,气象干旱向水文干旱传播的机制在时间上不是静止的,不同时间尺度水文对气象干旱响应模式存在显著的变异性。

表5 不同时间尺度临界转变条件

时间尺度	干旱特征要素	临界转变条件
3个月尺度	干旱历时	1.10
	干旱烈度	0.83
6个月尺度	干旱历时	1.60
	干旱烈度	0.91

5 结论和展望

(1)气象干旱和水文干旱均有明显的时段性。20世纪60年代干旱历时最长且烈度最大;在20世纪70年代和21世纪初干旱历时较短且烈度较小;20世纪80年代干旱频发但烈度较小;20世纪90年代历时较短但烈度较大。

(2)水文干旱的年平均干旱历时和干旱烈度大于气象干旱,且随着SHI和SPI时间尺度的增加,识别出的干旱历时有增大,相应的每次干旱烈度也有所增加,但干旱烈度增加幅度比干旱历时略小。

(3)水文干旱与气象干旱存在明显的非线性关系,采用对数函数(logarithm)中三参数(log 3P1)作为临界关系模型可以得到水文干旱与气象干旱的临界转变条件。SHI在3个月和6个月时间尺度上对SPI有较好的响应关系,具有较强的季节性和明显

的时间差异性。在3个月尺度下,气象干旱历时至少为1.10个月且干旱烈度至少为0.83,将诱发水文干旱;在6个月尺度下,气象干旱历时至少为1.60个月且干旱烈度至少为0.91,易诱发水文干旱。

考虑到水文干旱与气象干旱表征的复杂性、影响的多因素性,两者的关系既存在一定的联系又存在较大的不确定性,受多重因素的制约。本研究仅从干旱历时和烈度角度建立了水文-气象干旱统计模型,探究两者的关系。随着卫星、遥感、再分析数据等可用外源数据的出现,以及人们对于不同类型干旱认识的深入,精确地定量表征水文与气象干旱将成为可能,这也将有助于进一步明确水文干旱与气象干旱的关系;随着具有物理机制的水文-气象关系模型在干旱研究方面的应用也将有助于推动干旱的研究,这些也是本研究需继续深入的方面。

参考文献:

- [1] ROY S S, JR R C B. Trends in extreme daily precipitation indices in India[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 24(4):457-466.
- [2] LENG Guoyong, TANG QiuHong, RAYBURG S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China [J]. Global and Planetary Change, 2015, 126:23-34.
- [3] WANG Zhaoli, ZHONG Ruida, LAI Chengguang, et al. Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249:149-162.
- [4] OBASI G O P. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994, 75(9):1655-1662.
- [5] 咎大为. 黑河流域1967-2009年气象干旱时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3):92-99.
- [6] 郭梦, 张奇莹, 钱会, 等. 基于SPEI干旱指数的陕西

- 省干旱时空分布特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3):127-132+138.
- [7] 王晨,黄馨,黄晓军. 西北地区城市干旱脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):114-121.
- [8] HISDAL H, TALLAKSEN L M. Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: A case study for Denmark[J]. Journal of Hydrology, 2003, 281(3):230-247.
- [9] ZHAO Panpan, LÜ Haishen, WANG Wenchuan, et al. From meteorological droughts to hydrological droughts: A case study of the Weihe River Basin, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(11):364.
- [10] MO K C. Model-based drought indices over the United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(6):1212-1230.
- [11] MISHRA V, CHERKAUER K A. Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7-8):1030-1045.
- [12] HAO Zengchao, HAO Fanghua, SINGH V P, et al. A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices[J]. Advances in Water Resources, 2016, 92:240-247.
- [13] MO K C, LETTENMAIER D P. Objective drought classification using multiple land surface models[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(3):990-1010.
- [14] DASH S S, SAHOO B, RAGHUWANSHI N S. A SWAT-Copula based approach for monitoring and assessment of drought propagation in an irrigation command[J]. Ecological Engineering, 2019, 127:417-430.
- [15] 张迎,黄生志,黄强,等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. 水利学报, 2018, 49(6):703-714.
- [16] KEYANTASH J A, DRACUP J A. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage[J]. Water Resources Research, 2004, 40(9):333-341.
- [17] SHIN J Y, CHEN Si, JOOHEON L, et al. Investigation of drought propagation in South Korea using drought index and conditional probability [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2018, 29(2):231-241.
- [18] SATTAR M N, LEE J Y, SHIN J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea [J]. Water Resources Management, 2019, 33(7):2439-2452.
- [19] WANDERS N, WADA Y. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526:208-220.
- [20] WU Jiefeng, CHEN Xingwei, YAO Huaxia, et al. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551:495-507.
- [21] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The Relationship of drought frequency and duration to time scales [R]. Boston: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993:17-22.
- [22] 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.
- [23] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2):41-46.
- [24] 曹永旺,延军平,李敏敏,等. 晋陕峡谷区气候变化与旱涝灾害响应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4):113-118.
- [25] 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, 2017.
- [26] ENDT P M, PATTEN D M, BUECHNER W W, et al. An Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [J]. Journal of Hydrology, 1969, 7(3):353.
- [27] 周玉良,周平,金菊良,等. 基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J]. 水利学报, 2014, 45(9):1038-1047.
- [28] 史光玉. 中国气象灾害大典(新疆卷)[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [29] 江远安,赵逸舟,陈颖,等. 干旱指数 CI 的确定及其在新疆的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2):18-20.
- [30] 于晓彤. 子牙河流域气象干旱特征及对水文干旱的影响[D]. 北京:中国地质大学, 2018.
- [31] 孙洋洋. 渭河流域气象与水文干旱时空演变特征[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [32] 蒋桂芹. 干旱驱动机制与评估方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
- [33] 周育琳,穆振侠. 天山西部山区融雪年径流水文特性分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6):10-13+34.
- [34] 尹梓渊,穆振侠,汤瑞,等. 天山西部地区汛期径流变化规律分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5):95-100.
- [35] 穆振侠,于宴民. 天山西部山区土地利用/土地覆被时空变化特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(6):112-118.