

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2022.0046

武慧敏,吕爱锋,张文翔.巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):459-467.
WU H M,LYU A F,ZHANG W X. Response of hydrologic drought to meteorological drought in the Bayin River basin[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):459-467. (in Chinese)

巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应

武慧敏¹,吕爱锋^{2,3},张文翔¹

(1. 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,云南师范大学地理学部,昆明 650500;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:通过巴音河流域 1961—2019 年逐月降水量和径流量数据计算标准化降水指数和标准化径流指数,进而对巴音河流域气象和水文干旱的演变以及突变进行分析,并探析流域水文干旱对气象干旱的响应。结果表明,1961—2019 年巴音河流域气象干旱与水文干旱呈减缓态势,流域降水增多,有变湿趋势,气象干旱湿润化表现尤为显著。巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应表现出时滞性,在 1、3、6、12 个月的时间尺度下,12 个月的气象干旱指标与水文干旱指标相关性最强,水文干旱滞后于气象干旱 1~2 个月;水文干旱对气象干旱的季节性响应在春、夏、秋、冬分别滞后 5、6、9、8 个月,在春夏的滞后时间短于秋冬的滞后时间。

关键词:水文干旱;气象干旱;标准化降水指数;标准化径流指数;巴音河流域

中图分类号:TV213;P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



干旱是一种反复发生且具有严重影响的灾害,与其他类型的灾害相比其波及范围广,影响时间长,是迄今为止代价最高的自然灾害^[1]。干旱由一个地区长期降水不足引起,是典型的与水资源不足相关的异常气候事件^[2],会对农业和社会经济系统产生重大影响并导致广泛的社会、经济和环境挑战^[3-5]。如 2014 年美国加州的干旱事件造成了 22 亿美元的损失^[6]。根据水循环不同环节中水分影响对象的差异,一般将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱^[7],不同类型干旱的发生在时间上具有递进关系^[8]。气象干旱是其他干旱类型的根源,在干旱灾害传播链中起关键作用^[9]。水文干旱的发生与气象干旱相比较慢,其持续时间也比气象干旱要长,气象干旱的发生一般难以控制,但是水文干旱的影响可以通过一定的措施来避免或降低^[10]。

国内外学者利用各类气象干旱指标如标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)、帕默尔干旱指数、标准化降水蒸散指数以及水文干旱指标如标准径流指数(standardized runoff index, SRI)、帕默尔水文干旱指数、径流干旱指数和地表供水指数等分别对气象干旱与水文干旱进行研究。其中:何福力等^[11]基于标准化降水指数对黄河流域 50 年干旱演变进行分析;翟家齐等^[12]利用标准化水资源指数对海河北系的干旱特征进行刻画;赵安周等^[13]采用帕默尔干旱指数对渭河流域干旱时空分布进行研究;Hong 等^[14]利用径流干旱指数评估了长江上游水文干旱的不确定性。

综合来看,目前的干旱研究主要侧重于分析流域特定类型干旱的特征及其空间分布,多数研究在分析过程中仅选用单个干旱指数对研究区干旱状况进行讨论,不能对流域存在多种干旱类型的情况进

收稿日期:2021-11-16 修回日期:2022-03-11 网络出版时间:2022-03-25

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220324.1423.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(41671026);青海省重大科技专项(2019-SF-A4-1);青海省自然科学基金(2019-ZJ-7020)

作者简介:武慧敏(1996—),女,山西太原人,主要从事水资源与干旱传播研究。E-mail:3302888651@qq.com

通信作者:张文翔(1979—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事地球化学与环境变化研究。E-mail:wenzhangzhang@yynu.edu.cn

行探讨,针对不同类型干旱传播过程的研究还是较为缺乏。本文主要从识别和统计气象干旱与水文干旱、评估干旱的趋势,探索 SPI 和 SRI 之间的关系,研究气象和水文干旱之间的传播时间以及气象干旱向水文干旱传播可能的影响及驱动因素。研究结果对区域干旱管理和水资源规划以及干旱风险的综合防控具有重要参考价值。

1 研究区概况

巴音河流域地处柴达木盆地东北部德令哈市,位于 $36^{\circ}53' \sim 38^{\circ}11'N, 96^{\circ}29' \sim 98^{\circ}08'E$ 之间,发源于祁连山支脉野牛脊山,流域总面积达 $17\,608\text{ km}^2$,河流长约 320 km ,海拔为 $5\,000\text{ m}$ ^[15]。

属于高原荒漠半荒漠气候区,夏季温暖干燥,最热月平均气温为 $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端高温可达 $33.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均温为 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;日照丰富,年日照时长为 $3\,127.9\text{ h}$,年蒸发量 $2\,102.1\text{ mm}$;无霜期约为 $84 \sim 99\text{ d}$ ^[16]。水资源极度缺乏,年平均降雨量 182.3 mm 。流域地势北高南低,地区降雨差异性较大,北部高山区的降雨 200 mm 以上,而南部平原区降雨量只有 $50 \sim 150\text{ mm}$ 。巴音河是流域最大的内陆河,是该区域居民生活生产以及生态用水的主要来源,径流对该地区的影响尤为重要。随着全球气候变暖以及流域内人类活动的影响,巴音河流域干旱问题日益突显,湖泊及湿地面积降低,地下水水位上升等一系列问题相继诱发^[17]。

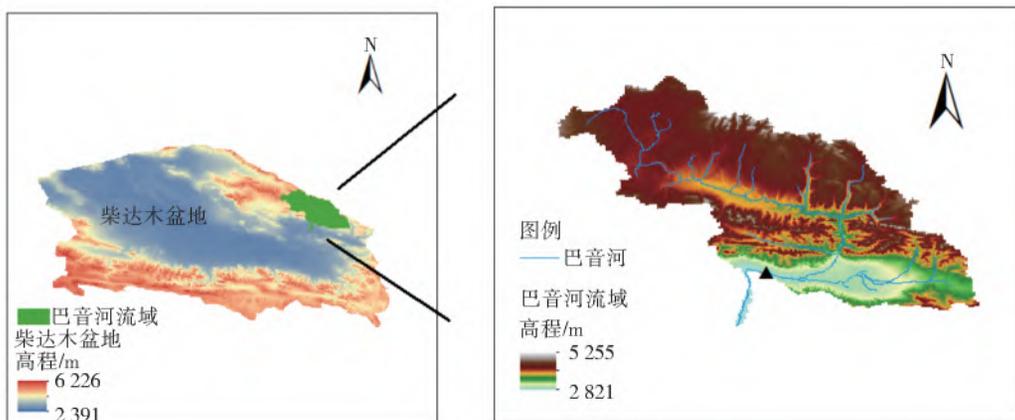


图 1 巴音河流域水系图

Fig. 1 Water system of the Bayin River basin

2 研究方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 SPI 与 SRI

SPI 是 Mckee 等^[18]在 1993 年提出的,SPI 计算简单,且具有多种时间尺度,是干旱研究中广泛采用的指标。SPI 反映降雨量出现的机会率,当 SPI 为正值时表示降雨量偏多,而当 SPI 出现负值时表示降雨量偏少。可以通过 SPI 负值的大小来确定干旱的严重程度,SPI 的值越小代表干旱严重程度越高。SPI 的计算公式可参考文献^[19]。

SRI 在 2008 年由 Shukla 等^[20]提出,该指数参照标准化降水指数的概念,可以表示流域径流量出现的机会率,当出现正值时说明径流量偏多,当出现负值时说明该时段径流量偏少。该指数不仅计算简单,还可以进行不同时间尺度分析,并在地势复杂、水文资料缺乏地区具有适用性。SRI 的具体计算方法与 SPI 类似^[21],SPI 与 SRI 等级划分见

表 1^[22]。

表 1 干旱指数等级划分

Tab. 1 Classification of drought indices

SPI/SRI	干旱等级
≤ -2	特旱
$> -2 \sim \leq -1.5$	重旱
$> -1.5 \sim \leq -1.0$	中旱
$> -1.0 \sim \leq -0.5$	轻旱
> -0.5	无旱

2.1.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法^[23]可以识别一组数据的变化趋势及其突变情况。Mann-Kendall 检验法的优势在于不受时间序列中异常值的干扰,序列不必具有相同的概率分布,只需满足水文数据偏态,在水资源领域应用广泛^[24]。Mann-Kendall 趋势检验法的计算过程已有学者^[25]进行过详细的阐述。Z 满足标准正态分布:若 $Z > 0$,则定义序列为上升趋势;若 $Z < 0$ 时,序列则为下降趋势。对于给定的显著

性水平 α , 若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则说明序列上升或下降趋势显著。

2.2 研究数据

巴音河流域气象水文站点匮乏, 且流域地势北高南低, 流域各支流自北向南沿途交汇, 最终在南部海拔较低的德令哈地区汇合后流出研究区, 作为流域出口的德令哈站点汇集了流域内众多支流, 其径流量由流域内所有支流的径流构成。因此, 在气象水文站点缺乏的巴音河流域, 德令哈站可以较好地代表整个流域的水文状况。降水数据选用德令哈气象站 1961—2019 年逐月降水数据, 径流数据选用德令哈水文站逐月径流数据, 覆盖了 1961 年至 2019 共 59 年的数据, 时间周期较长, 可以表示巴音河流域较长一段时期干旱的变化趋势, 反映的干旱状态比较稳定性, 计算的数据在代表整个流域时合理性较强。

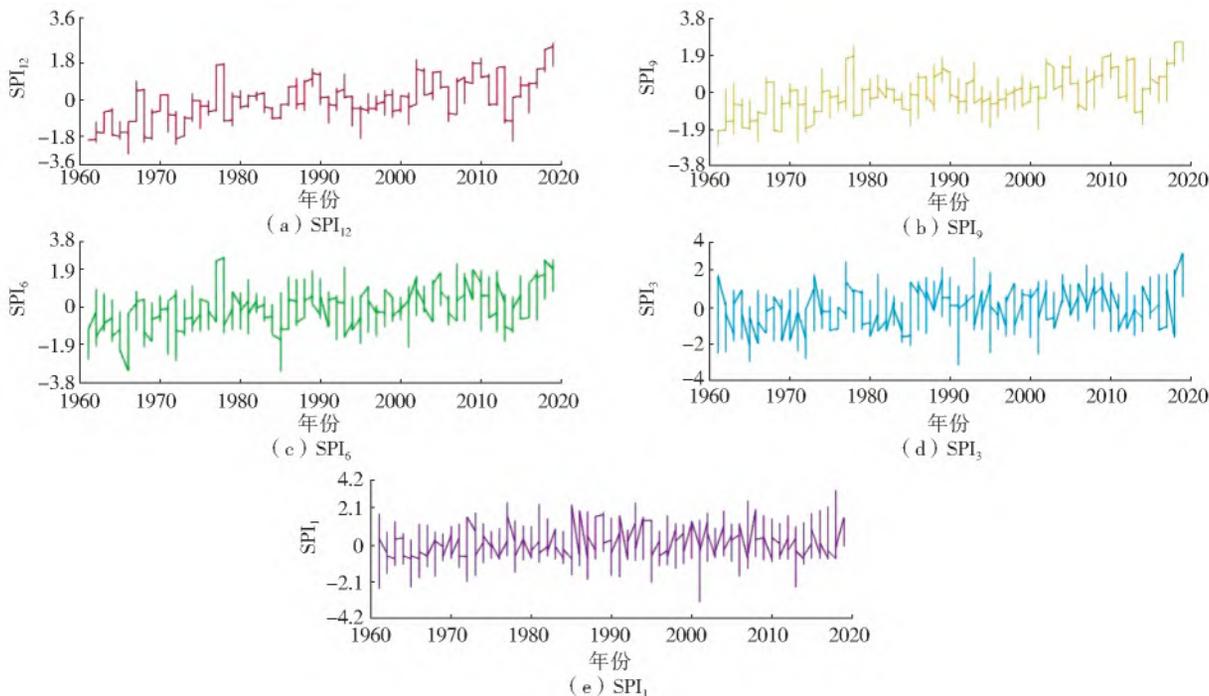


图2 巴音河流域气象干旱指标变化过程

Fig. 2 The change process of meteorological drought index in the Bayin River basin

结果显示, 流域不同时间尺度下的 SPI 值都有明显差异, 但干旱趋势大致相同。月尺度 (SPI₁) 的波动最强, 随着时间尺度的增大, 波动起伏减缓。其中: 巴音河流域 SPI 在 20 世纪 60 年代普遍在 -1 至 -2 之间, 呈中度到重度干旱状态, 巴音河流域水资源在这一时期处于缺乏状态, 旱情较为严重; 20 世纪 70 年代 SPI 值除 1977 年干旱指数为正值外, 其余大部分年份都为负值, 处于干旱频发状态; 在 20 世纪 80 年代和 90 年代, 干旱与湿润交替出现, 干旱指数 SPI 值显示这段时间发生的大部分干旱程度较轻,

3 结果分析

3.1 气象干旱特征

3.1.1 气象干旱的时间变化特征

基于流域 1961—2019 年逐月降水量进行气象干旱分析, 不同时间尺度的标准化降水指数表征意义有差别: 1 个月尺度的 SPI 值受到每月降水变化影响, 可以较好地反映气象干湿变化情况; 3 个月尺度的 SPI 值会受季节性降水变化影响; 6 个月和 9 个月的 SPI 值可以反应中期及中长期降水变化下的气象干旱状况; 12 个月的 SPI 值则表示长期的气象干旱情况, 受到年平均降水的影响。研究采用 1、3、6、9、12 个月共 5 种时间尺度计算 SPI, 可以很好地代表短期、中期及长期降水对气象干旱的影响 (“SPI₁”表示 1 月尺度 SPI, 以此类推)。巴音河流域气象干旱指标变化过程见图 2。

仅在 1995 年发生了较为严重的干旱。对于整个巴音河流域, 2002 年以后 SPI 干旱指数大于 0 的年份明显增多, 这说明进入 21 世纪巴音河流域降水呈增多趋势, 处于较为湿润的状态。巴音河流域湿润化的趋势与全球变暖引起的气温升高及蒸发加剧关系密切, 水循环速度加快使降水量也呈上升趋势^[26]。此外, 还有一些研究表明大气环流是西北地区干湿变化的重要原因: Peng 等^[27]认为亚洲副热带西风急流的南向位移引起西北地区上空正涡度平流发生异常, 造成气旋上升运动, 使区域降水增多; Li 等^[28]则认

为北美副热带高压以及西伯利亚高压是引起西北地区降水量增多的主要因素。

3.1.2 气象干旱趋势特征

巴音河流域气象干旱变化趋势采用 Mann-Kendall 检验法分析。依据德令哈气象站 1961—2019 年的月降水数据来计算 SPI, 进而计算检验统计量 Z 并进行趋势分析。若:判定趋势在 90% 的显著性水平上显著则需所得结果的绝对值大于 1.64; 所得结果的绝对值大于 1.96, 则定义为在 95% 的显著性水平上的趋势为显著。计算为负值说明为变干趋势, 正值则代表变湿趋势。

巴音河流域 SPI_1 的检验统计量 $Z=5.2114$, 在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下, $|Z| > Z_{1-\alpha/2} = 1.64$ 。结果见图 3, 其中: 标准化降水指数 SPI_1 的检验统计量 Z 值为正值, 整体呈现变湿趋势, 并且标准化降水指数 SPI_1 的检验统计量 Z 值超过了 1.64, 表明变湿趋势明显; 进一步对巴音河流域 SPI 序列进行 Mann-Kendall 突变检测, 在 1961—2019 年间, 大多数年份的 SPI_1 序列的 UF 值大于 0, UF 曲线整体呈波动上升趋势, UF、UB 曲线于 1985 年相交,

发生显著突变, 干旱指数为正值的年份明显增多。

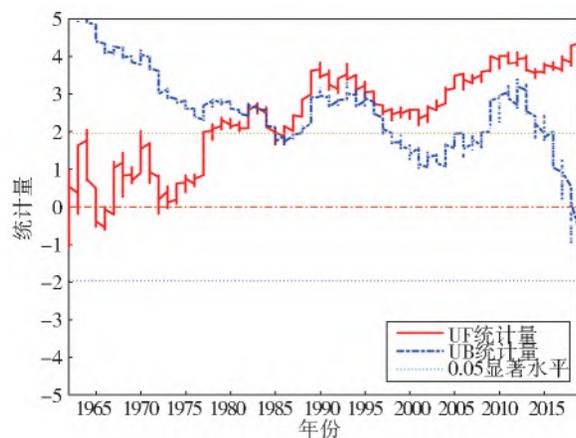


图 3 巴音河流域 SPI 序列 Mann-Kendall 突变检测
Fig. 3 SPI sequence Mann-Kendall mutation detection in the Bayin River basin

3.2 水文干旱特征

3.2.1 水文干旱的时间变化特征

基于 1961—2019 年逐月径流量进行水文干旱分析, 同样使用 1、3、6、9、12 个月共 5 种时间尺度计算 SRI。巴音河流域水文干旱指标变化过程见图 4。

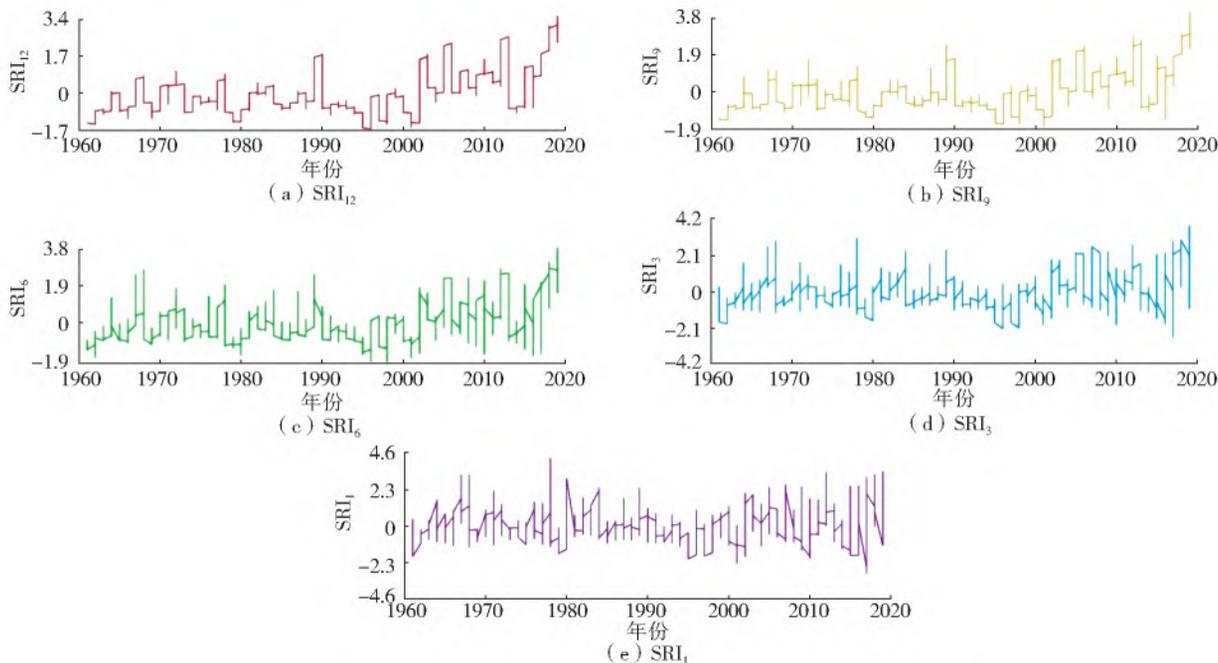


图 4 巴音河流域水文干旱指标变化过程

Fig. 4 The change process of hydrological drought index in the Bayin River basin

所得结果具有与气象干旱相似的特征, 不同时间尺度下的 SRI 值波动幅度明显不同, 但干旱趋势大致相同。SRI₁ 的波动最强, 表现出时间尺度越小, SRI 对水文干旱的反应越强烈。分析 SRI 可得: 巴音河流域在 20 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代呈现旱涝交替现象, 但干旱年份居多; 20 世纪 90 年代区域总体表现为干旱频发; 20 世纪 90 年代到 21 世

纪初期 SRI 值普遍在 -1 ~ -2, 呈中度到重度干旱状态。这段时间内, 巴音河流域干旱持续时间长, 旱情较为严重。整个巴音河流域在进入 21 世纪后干旱指数 SRI 大多数年份为正值, 表示这段时期巴音河流域水资源较为丰富, 处于湿润状态, 干旱呈减弱态势。

3.2.2 水文干旱趋势特征

对巴音河流域 SRI₁ 进行 Mann-Kendall 趋势检

验分析得到 SPI_1 的检验统计量 $Z = 1.3595$, 在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下, $|Z| > Z_{1-\alpha/2} = 1.64$, 结果见图 5。标准化径流指数 SRI_1 的检验统计量 Z 值为正值, 整体呈现变湿趋势, 然而标准化径流指数 SRI_1 的检验统计量 Z 值小于 1.64, 表明径流指数虽然有变湿的趋势, 但这种趋势并不明显。对 1961—2019 年间的水文干旱指数 SRI_1 做突变检验, 由图 5 可知 UF、UB 曲线波动幅度较大, 没有明显的上升趋势, 进一步使用 Pettitt 突变点检验, 结果显示序列的突变年份为 2002 年, 表示从 2002 年开始序列值显著上升, 变湿趋势加剧。21 世纪后流域径流量增多, 水文干旱减缓: 一方面, 流域水循环加快, 降水增多使得径流量也有一定程度的增多; 另一方面, 全球变暖造成冰川消融, 雪线升高, 高山冰雪融水对径流量的增加也有一定的贡献。

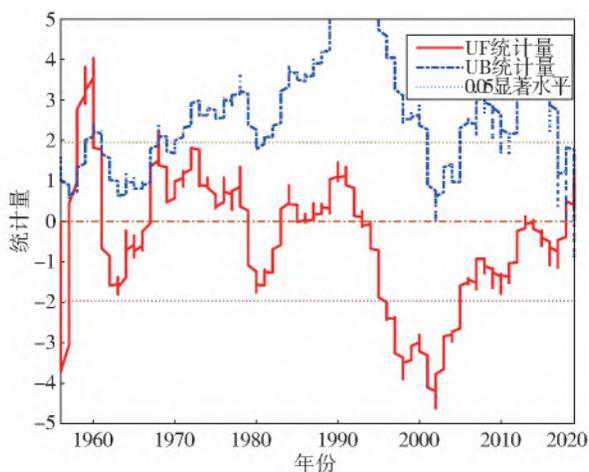


图 5 巴音河流域 SRI 序列 Mann-Kendall 突变检测
Fig. 5 SRI sequence Mann-Kendall mutation detection in the Bayin River basin

3.3 水文干旱对气象干旱的响应

3.3.1 水文与气象干旱时滞互相关分析

对不同时间尺度巴音河流域的 SPI 和 SRI 做相关性分析, 计算结果见表 2。不同时间尺度的相关系数分别为 0.22、0.30、0.47 和 0.66, 气象干旱指数和水文干旱指数随着时间尺度的增大其相关性逐渐增强, 12 个月尺度的相关性最强。

表 2 巴音河流域不同时间尺度的 SPI 与 SRI 的相关性
Tab. 2 The correlation between SPI and SRI on different time scales in the Bayin River basin

时间尺度/月	1	3	6	12
相关系数	0.22	0.30	0.47	0.66

对 1961—2019 年 SPI_{12} 与 SRI_{12} 序列取同期、滞后 1 个月、滞后 2 个月……11 个月的时间梯度, 计算相关系数并进行相关性分析, 取最大相关系数所对应

的时间梯度作为 SPI 与 SRI 的滞后时间。研究表明, 同期至滞后 11 个月的序列相关系数分别是 0.659、0.682、0.682、0.672、0.656、0.639、0.621、0.600、0.577、0.552、0.523 和 0.480, 最大相关系数出现在滞后 1~2 个月, 表明巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应在滞后 1~2 个月的时候最为敏感。

3.3.2 水文干旱与气象干旱对比分析

将 SPI_{12} 与 SRI_{12} 进行对比分析, 1961—2019 年发生水文干旱时长 191 个月, 发生气象干旱时长 231 个月, 表明发生水文干旱的可能性与气象干旱相比较小, 若气象干旱严重程度较低, 水文干旱可能不会发生, 且水文干旱相对于气象干旱具有延迟特征。

由图 6 可以看出, 1961—1975 年期间气象干旱的发生频率以及发生的严重程度均大于水文干旱, 气象干旱多为中旱到重旱, 水文干旱多为轻旱。其中: 1966、1972 年气象干旱曾达到特旱程度, 而水文干旱最大程度为中旱等级; 1975—2002 年气象干旱和水文干旱的严重等级均有所降低, 且这段时期水文干旱的发生频率及严重程度都要大于气象干旱, 水文干旱持续时间较长; 2002—2019 年这段时间气象干旱和水文干旱很少发生, 湿润程度显著增加, 仅在 2006 和 2014 年发生中度气象干旱, 在 2015 年发生轻度水文干旱。

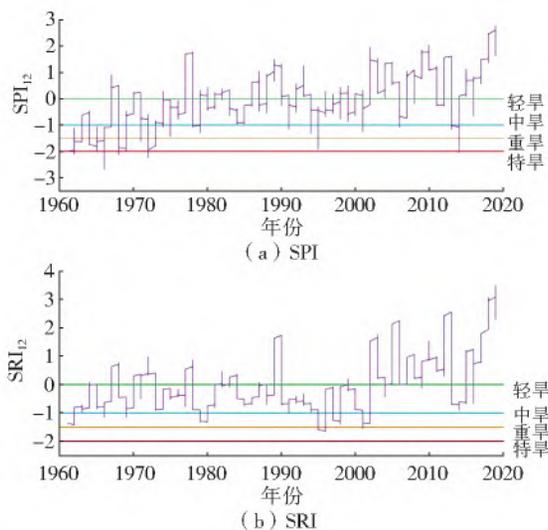


图 6 巴音河流域 12 个月尺度 SPI 与 SRI 序列的比较
Fig. 6 Comparison of 12-month scale SPI and SRI sequence in Bayin River basin

3.3.3 水文干旱对气象干旱的季节性响应

结合巴音河流域季节特征与 SPI_n 和 SRI_1 之间的相关性对干旱传播的季节性进行分析。根据图 7 反映的结果: 春季(3—5 月) SRI 与 SPI_5 相关性最强 ($r = 0.24$), 春季气温回升, 冰雪消融, 增加的地表水下渗形成土壤水、潜流和地下水, 加之春季植物生

长,用水需求上升,使产生径流的水量减少,水文干旱的响应时间为 5 个月;夏季(6—8 月)SRI 与 SPI₆ 相关性显著($r=0.72$),夏季高温炎热,蒸散发加剧,植被蒸腾作用增强了水量消耗,夏季农业生产的用水量,加之径流的变化主要依赖于降水,气象干旱更加容易引起水文干旱的发生,这与相关性热图反映的夏季 6 个月的传播时间也有一致性;秋季(9—11 月)SRI 与 SPI₉ 相关性显著($r=0.64$),秋季温度开始降低,流域的蒸散发量也减少,随着浅层土壤中储存的水分逐渐被耗尽,导致流域水文干旱对气象干旱的响应延迟;冬季(12 月—2 月)SRI 与 SPI₈ 相关性较强($r=0.33$),冬季由于积雪的产生,冬季的蒸发量最小,降水对径流的影响减弱,使气象干旱向水文干旱的传播时间相对较长。

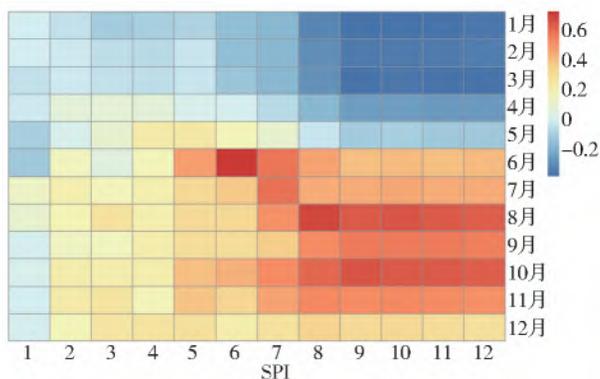


图 7 巴音河流域不同时间尺度 SPI 与 SRI₁ 序列的相关性
Fig. 7 Correlation between SPI and SRI₁ sequence in different time scales in Bayin River basin

综上, SPI_n 与 SRI₁ 在雨季的相关性强度明显高于旱季。巴音河流域降水集中于雨季,对河流流量的补充具有重要影响;而在旱季,随着气温的降低,蒸散发也随之减弱,使得水循环过程放缓,干旱传播的时间延长。表 3 中 SPI_n 和 SRI₁ 的最大相关系数反映的气象干旱向水文干旱的传播时长与流域的季节特性具有一致性,水文干旱对气象干旱的响应在春季和夏季短于在秋季和冬季的响应时间。

表 3 巴音河流域不同季节气象干旱向水文干旱的传播时间
Tab. 3 The spread time of meteorological drought to hydrological drought in different seasons in the Bayin River basin

季节	春季	夏季	秋季	冬季
传播时间/月	5	6	9	8
相关系数	0.24	0.72	0.64	0.33

4 讨论与结论

在指标的选取上, SPI 被普遍应用于干旱分析中,具有较强的可靠性。此外, SPI 与其他干旱指数

相比计算虽简单,但却在干旱预警和干旱灾害控制方面具有很好的效果^[29]。SRI 是一种标准化的指数,区域偏差被最小化,可以表征流域的水文特征,并且可以计算不同时间尺度的水文干旱状况,能够反映由于季节变化而引起的干旱滞后问题^[22]。已有研究^[30]表明德令哈地区的气候表现出暖湿化趋势,这与本研究的结论具有一致性,气温升高引起高山冰雪融化,使巴音河流域的径流量呈现上升趋势。西北地区的黑河^[31]、疏勒河^[32]等流域上游的径流量从 20 世纪 50 年代起均呈增加趋势,巴音河流域的径流量也具有相似的变化趋势,径流量的增多可能与西北地区在近些年的暖湿化趋势相关^[33]。文广超等^[34]研究了巴音河流域气候变化和人类活动对上游径流量的影响,通过累积量斜率变化率方法,在不考虑其他因素影响时降水量对年径流量增加的贡献率达到 83.06%,而人类活动对年径流量增加的贡献率占 16.94%,表明人类活动对巴音河上游年径流变化的影响相对较小。

研究采用 SPI 和 SRI 对巴音河流域 1961—2019 年气象干旱和水文干旱的演变特征及其趋势进行分析,并对水文干旱对气象干旱的响应进行探析得到:流域 20 世纪 60 年代的气象干旱形势最为严峻,总体表现出中度-重度干旱;1985 年气象干旱发生突变,之后流域湿润年份明显增多,流域水文干旱在 20 世纪 90 年代较为严重,呈现出中度-重度干旱状态;21 世纪以来流域极少发生水文干旱。Mann-Kendall 趋势检验结果显示流域水文干旱的突变点为 2002 年,从 2002 年开始呈现水文湿润状态的年份增多。巴音河流域水文干旱与气象干旱在 12 个月尺度上相关性最强,对 12 个月尺度的气象干旱指数与水文干旱指数进行时滞互相关分析,得到水文干旱滞后于气象干旱 1~2 个月;水文干旱对气象干旱的季节性响应表现出雨季的相关性强度高于旱季,水文干旱在春季对气象干旱的响应最为迅速,水文干旱对气象干旱的响应在春夏季快于秋冬季。

考虑到气温的持续上升,未来蒸散发等必将成为不可忽略的部分,而 SPI、SRI 并未将这些考虑进去。另外,随着水利工程的逐步完善与运行,未来人类活动的影响也将加剧对流域水循环的影响。因此,从生态和社会经济角度选择综合干旱指数进行多因子综合分析,对日益复杂的水文过程进行合理模拟,以提供更完善的干旱风险评价,将成为流域水文研究的重要方向之一。

参考文献(References):

[1] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought con-

- cepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1): 202-216. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [2] PARK S, LM J, JANG E, et al. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 157-169. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.040.
- [3] HAO Z, AGHAKOUCHAK A. A nonparametric multivariate multiindex drought monitoring framework[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(1): 89-101. DOI:10.1075/JHM-D-12-0160.1.
- [4] YU M X, LI Q F, HAYES M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; 1951-2010? [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 545-558. DOI:10.1002/joc.3701.
- [5] VAN LOON A F, LAAHA G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 3-14. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.059.
- [6] GRIFFIN D, ANCHUKAITIS K J. How unusual is the 2012-2014 California drought? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24): 9017-9023. DOI: 10.1002/2014GL062433.
- [7] WANG W, ERTSEN M W, SVOBODA M D, et al. Propagation of drought: From meteorological drought to agricultural and hydrological drought[J]. *Advances in Meteorology*, 2016, 2016: 1-5. DOI: 10.1155/2016/6547209.
- [8] ANAIS B, PERE Q. Evaluation of drought representation and propagation in regional climate model simulations across Spain[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(12): 5111-5131. DOI: 10.5194/hess-23-5111-2019.
- [9] 罗纲,阮甜,陈财,等. 农业干旱与气象干旱关联性:以淮河蚌埠闸以上地区为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 977-991. (LUO G, RUAN T, CHEN C, et al. Agricultural drought and its association with meteorological drought: A case study of the Huaihe River basin above the Bengbu Sluice, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 977-991. (in Chinese)) DOI:10.1007/s00704-021-03671-4.
- [10] BARKER L J, HANNAFORD J, CHIVERTON A, et al. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(6): 2483-2505. DOI:10.5194/hess-20-2483-2016.
- [11] 何福力,胡彩虹,王纪军,等. 基于标准化降水、径流指数的黄河流域近50年气象水文干旱演变分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(3): 69-75. (HE F L, HU C H, WANG J J, et al. Analysis of meteorological and hydrological drought in the Yellow River basin during the past 50 years based on SPI and SDI[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3): 69-75. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2015.03.014.
- [12] 翟家齐,蒋桂芹,裴源生,等. 基于标准水资源指数(SWRD)的流域水文干旱评估:以海河北系为例[J]. *水利学报*, 2015, 46(6): 687-698. (ZHAI J Q, JIANG G Q, PEI Y S, et al. Hydrological drought assessment in the river basin based on Standard Water Resources Index(SWRI): A case study on the northern Haihe River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(6): 687-698. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20140844.
- [13] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等. 基于SWAT模型的渭河流域干旱时空分布[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(9): 1156-1166. (ZHAO A Z, LIU X F, ZHU X F, et al. Spatiotemporal patterns of droughts based on SWAT model for the Weihe River basin[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(9): 1156-1166. (in Chinese)) DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.09.008.
- [14] HONG X J, GUO S L, ZHOU Y L, et al. Uncertainties in assessing hydrological drought using streamflow drought index for the upper Yangtze River basin[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(4): 1235-1247. DOI: 10.1007/s00477-014-0949-5.
- [15] 甘小莉,郝玉培,翟永洪,等. 巴音河流域植被与水文动态变化研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 323-326. (GAN X L, HAO Y P, ZHAI Y H, et al. Study on dynamic change of vegetation and hydrology in Bayin River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 323-326. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.02.060.
- [16] 严应存,校瑞香,肖建设,等. 青海省巴音河流域LUCC遥感调查及驱动分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(1): 276-283. (YAN Y C, XIAO R X, XIAO J S, et al. Remote sensing monitoring and driving factor analysis on Land Use and Land Cover Changes of Bayin River basin in Qinghai Province[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(1): 276-283. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;ZGSS.0.2012-01-041.
- [17] 文广超,王文科,段磊,等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 734-743. (WEN G C, WANG W K, DUAN L, et al. Quantitatively evaluating exchanging relationship between riverwater and groundwater in Bayin River basin of northwest China using hydrochemistry and stable isotope[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 734-743. (in Chinese))

- DOI:CNKI;SUN;GHDL. 0. 2018-04-008.
- [18] 张强,高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. 科技导报,2004(7):21-24. (ZHANG Q, GAO G. The spatial and temporal features of drought and flood disasters in the past 50 years and monitoring and warning services in China [J]. Science & Technology Review, 2004 (7): 21-24. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;KJDB. 0. 2004-07-006.
- [19] 马岚. 气象干旱向水文干旱传播的动态变化及其驱动力研究[D]. 西安:西安理工大学,2019. (MA L. Dynamic change of propagation from meteorological drought to hydrological drought and the driving forces [D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [20] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (2): 226-236. DOI:10. 1029/2007GL032487.
- [21] 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. (WU J F, CHEN X W, GAO L, et al. Construction and recognition of regional hydrological drought index based on standardized runoff index [J]. Mountain Research, 2016, 34 (3): 282-289. (in Chinese)) DOI:10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 000129.
- [22] 赵茹欣,赵雪花. 基于标准径流指数法的汾河上游水文干旱等级划分研究[J]. 水电能源科学,2014,32 (9): 11-14. (ZHAO R X, ZHAO X H. Dividing hydrologic drought degree of upstream of Fenhe River based on standardized runoff index [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9):11-14. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY. 0. 2014-09-003.
- [23] BURN D H, HAG ELNUR M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255 (1): 107-122. DOI: 10. 1016/S0022-1694 (01)00514-5.
- [24] 章诞武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展,2013,24 (4): 490-496. (ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advance in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2013. 04. 019.
- [25] 张海荣,周建中,曾小凡,等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. 水文,2015,35 (6): 90-96. (ZHANG H R, ZHOU J Z, ZENG X F, et al. Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(6): 90-96. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SWZZ. 0. 2015-06-017.
- [26] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002 (3):219-226. (SHI Y F, SHEN Y P, HU R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002(3): 219-226. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;BCDT. 0. 2002-03-000.
- [27] PENG D, ZHOU T. Why was the arid and semiarid northwest China getting wetter in the recent decades [J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(17): 9060-9075. DOI:10. 1002/2016JD026424.
- [28] LI B, CHEN Y, CHEN Z, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010 [J]. Atmospheric Research, 2016, 167: 275-284. DOI:10. 1016/j. atmosres. 2015. 08. 017.
- [29] LIU L, YANG H, CHRISTOPHER N, et al. Hydroclimatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: A case study in Blue River basin, Oklahoma [J]. Springer, 2012, 26: 2761-2779. DOI: 10. 1007/s11269-012-0044-y.
- [30] 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. (SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23 (2): 152-164. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;DSJJ. 0. 2003-02-004.
- [31] 程建忠,陆志翔,邹松兵,等. 黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J]. 冰川冻土,2017, 39 (1): 123-129. (CHENG J Z, LU Z X, ZOU S B, et al. Variation of the runoff in the upper and middle reaches of the main Heihe River and its causes [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 123-129. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0015.
- [32] 李计生,胡兴林,黄维东,等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土,2015, 37 (3):803-810. (LI J S, HU X L, HUANG W D, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River basin, Hexi Corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 803-810. (in Chinese)) DOI:10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2015. 0089.
- [33] LI B F, CHEN Y N, CHEN Z S, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010? [J]. Atmospheric Research, 2016, 167: 275-284. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2015. 08. 017.
- [34] 文广超,王文科,段磊,等. 青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J]. 冰川冻土,2018,40(1):136-144. (WEN G C, WANG W K, DUAN L, et al. Response of runoff to climate change

and human activity in the upper reaches of the Bayin River, Qaidam basin, Qinghai Province[J]. Journal of

Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 136-144. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; BCDT. 0. 2018-01-017.

Response of hydrologic drought to meteorological drought in the Bayin River basin

WU Huimin¹, LYU Aifeng^{2,3}, ZHANG Wenxiang¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Drought is considered to be the most costly natural disaster, and it is repetitive. This disaster has a serious impact on agricultural production and life. Compared with other types of disasters, it has a wide range, long impacted, large losses, and spreading trends. Since 1990s, drought in China has become more serious and frequent. According to the differences of water-affected objects in different links of the water cycle, drought is generally divided into meteorological drought, hydrological drought, agricultural drought, and socio-economic drought. The occurrence of different types of drought has a progressive relationship in time. Meteorological drought is the root of other drought types and plays a key role in the transmission chain of drought disasters. The occurrence of hydrological drought is slower than that of meteorological drought, and its duration is longer than meteorological drought. The occurrence of meteorological drought is generally difficult to control, but the impact of hydrological drought can be avoided or reduced through certain measures. In the research on the transmission of different types of drought, the analysis of the characteristics and spatial distribution of specific types of drought in the basin are focused on. In the analysis process, a single drought index is selected to discuss the drought situation.

Losses are caused by the evolution of different types of drought. In order to reduce the occurrence of such phenomena, meteorological drought and hydrological drought will be analyzed by calculating the standardized precipitation index (SPI) and standardized runoff index (SRI) for the monthly precipitation and monthly runoff of Delingha station from 1961 to 2019. The Mann-Kendall test will be used to evaluate drought trends. The propagation time between meteorological drought and hydrological drought and the seasonal response of hydrological drought to meteorological drought will be studied in this paper to explore the possible influence and driving factors of meteorological drought on the spread of hydrological drought.

The results show that there are obvious differences in the standardized precipitation index (SPI) values at different time scales, but the drought trend is roughly the same. The fluctuation of the monthly scale (SPI₁) is the strongest, and the fluctuation slows down with the increase of the time scale. The results of SRI have similar characteristics to meteorological drought. The fluctuation range of SRI value under different time scales is different, but the drought trend is roughly the same. The fluctuation of SRI₁ is the strongest, which shows that the smaller the time scale, the stronger the SRI response to hydrological drought. From 1961 to 2019, the meteorological drought and hydrological drought in Bayin River basin showed a slowing trend, the precipitation in the basin increased and tended to basin become wet. The meteorological drought situation in the basin was the most severe in the 1960s, showing moderate to severe drought on the whole. There was a sudden change in meteorological drought in 1985, and then the wet years in the basin increased significantly. The hydrological drought in the basin was more serious in the 1990s, showing a moderate to severe drought state. Hydrological drought has rarely occurred in the basin since the 21st century. Mann Kendall trend test results show that the abrupt change point of hydrological drought in the basin is 2002, and the number of years showing a hydrological humid state has increased since 2002. The correlation between hydrological drought and meteorological drought in the Bayin River basin is the strongest on the 12-month scale. The time lag cross-correlation analysis of meteorological drought index and hydrological drought index on the 12-month scale shows that the response of hydrological drought to meteorological drought in Bayin River basin shows time lag, and the hydrological drought lags behind the meteorological drought for 1-2 months. The seasonal response of hydrological drought to meteorological drought shows that the correlation intensity of the rainy season is higher than that of the dry season. Hydrological drought responds most rapidly to meteorological drought in spring. The response of hydrological drought to meteorological drought in spring and summer is faster than that in autumn and winter. The seasonal response of hydrological drought to meteorological drought lags 5, 6, 9, and 8 months in spring, summer, autumn and winter. On the whole, The lag time in spring and summer is shorter than that in autumn and winter.

This shows that timely detection and corresponding measures in the meteorological drought stage can effectively prevent the further development of meteorological drought into hydrological drought. Because the hydrological drought in Bayin River basin responds quickly to meteorological drought in spring and summer, more attention should be paid to the drought state of the basin in the rainy season. Although the Bayin River basin shows a wetting trend during the study period, the prevention and control of drought in the Bayin River basin are still worthy of attention in the northwest inland area with a lack of water resources. In the context of global warming, considering the continuous rise of temperature, evapotranspiration will become an important part of the future. In addition, with the gradual improvement and operation of water conservancy projects, the impact of future human activities will also aggravate the impact of the water cycle in the convective domain. Therefore, it will become one of the important directions of watershed hydrological research to select the comprehensive drought index from the perspective of ecology and social economy, carry out multi-factor comprehensive analysis, and reasonably simulate the increasingly complex hydrological process to provide a more perfect drought risk assessment.

Key words: hydrological drought; meteorological drought; standardized precipitation index; standardized runoff index; Bayin River basin