

南小河沟流域干旱特征

李蓝君¹, 宋孝玉¹, 王光社², 李怀有³, 李焱林³

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 3. 黄委会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

摘要: 黄土高原地区生态环境脆弱, 干旱的发生严重影响该地区农业生产和经济发展。选用 1970—2012 年南小河沟流域的降雨资料, 使用标准化降雨指数(SPI)对干旱进行描述。对该流域内年及季节尺度 SPI 序列进行 Mann-Kendall 检验, 并对所建立的不同时间尺度的季节性交乘趋势模型进行验证。结果表明: 流域内出现干旱的频率为 48.84%, 年际 SPI 变化剧烈, 整体向干旱化方向发展。春季干旱有明显的分阶段特征; 夏季干旱变化趋势不显著; 除 1975 年以外, 秋季干旱变化趋势也不显著; 冬季的干旱程度变化比较稳定, 主要集中在无旱和轻旱等级之间。季节性交乘趋势模型在年干旱以及秋、冬季干旱评估中效果良好, 干旱等级预测合格率均达到 71.43%, 模型在对干旱等级的分析出现错估时, 有向中旱水平辐射的强烈趋势。

关键词: 干旱; 标准化降雨指数(SPI); 变化特征; 模型验证; Mann-Kendall 检验

中图分类号: S165+.2 **文献标志码:** A

Drought characteristics in Nanxiaohegou basin

LI Lan-jun¹, SONG Xiao-yu¹, WANG Guang-she², LI Huai-you³, LI Yao-lin³

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China;

3. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: The ecological environment is fragile in the Loess Plateau, and the occurrence of the drought can seriously affect the agricultural production and economic development in the region. The rainfall data of 1970—2012 years in the Nanxiaohegou basin were selected, and the drought level was described by the standardized precipitation index (SPI). Mann-Kendall test was performed on the annual and seasonal scale SPI sequence and the seasonal cross multiply trend model was used to verify the drought on annual and seasonal scale. The results are as follows: the frequency of drought in the basin was 48.84%, the annual variation of SPI was severe, and in a direction towards the development of drought. Spring drought had obvious stage characteristics, the degree of summer drought was not significant, the trend of drought in autumn was not significant except for the year of 1975 and the degree of drought in winter was relatively stable, mainly concentrated in the non-drought and light-drought levels. The seasonal cross multiply trend model had good effect in annual, autumn and winter drought assessment, the pass rate all reached 71.43% and it also had a strong tendency to estimate the other drought level to the moderate level when a prediction error occurred.

Keywords: drought; standardized precipitation index (SPI); change characteristics; model validation; Mann-Kendall test

干旱是一定区域范围内由于无降水或降水偏少而引起的气象灾害, 具有发生频率高, 影响范围广等特点^[1-2]。现阶段, 在全球气候暖干化发展趋势的

影响下, 我国干旱问题日趋突显, 已经成为影响区域农业生产与经济发展的主要自然灾害^[2-3]。因此, 在气候变化背景下研究流域尺度的干旱变化特征,

收稿日期: 2016-09-02 修回日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171034); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(2013JC18); 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(14JS059); 2016 陕西省水利科技计划项目(2016slkj-11)

作者简介: 李蓝君(1992—), 男, 甘肃白银人, 硕士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: li_lanjuan@126.com。

通信作者: 宋孝玉(1971—), 女, 陕西安康人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源方向的研究。E-mail: songxy@xaut.edu.cn。

并对其进行分析与预测已经成为水文气象学领域探讨的热点问题,这对指导区域抗旱减灾,制定地区水利规划等都具有十分重要的理论与实际意义^[2-4]。

黄土高原地区生态环境脆弱,气候条件变化剧烈,降雨量稀少且年际、年内分配极不均匀,这使得区域内水资源短缺,干旱灾害频发,区域植被生长与农业生产面临着严峻的挑战。虽然现有研究已经对黄土高原地区的干旱特征进行了一定的研究^[5-7],但均存在覆盖范围大,站点资料代表性不足以及未能考虑黄土沟壑区特殊地理特征等问题。并且,对于黄土高原地区,特别是黄土沟壑区短期干旱水平预测进行验证的相关研究较少^[5-6]。因此,分析黄土沟壑区的干旱特征,并对干旱预测模型进行研究,对于减少灾害损失,优化流域水资源配置,调整农业种植结构等都具有极其重要的意义。

甘肃省庆阳市西峰区境内的南小河流域为黄土沟壑区的典型小流域,其降雨以及干旱特征的变化具有较强的代表性。因此,本文选用南小河流域内实测资料,利用标准化降雨指数(*SPI*)分析该流域干旱特征,并对所建立年及季节尺度的干旱预测模型进行验证,以期为流域内的抗旱减灾与农业生产活动提供指导,并为黄土沟壑区的综合持续发展提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与资料来源

南小河流域位于甘肃省庆阳市西峰区(N35°41′~35°44′,E107°30′~107°37′),是黄河水利委员会西峰水保站于1951年建立的黄土沟壑区典型原型观测小流域,已积累了大量的降雨、径流、泥沙、土壤含水量、气象等实测数据。流域面积为36.5 km²,流域内多年平均降水量为545.8 mm,主要集中在6—9月,并且大多以暴雨形式发生。流域地质构造单一,主要土壤类型为黄绵土,抗蚀性差,易发生水土流失。流域内植被群落较为单一,以刺槐、侧柏、油松、山杏以及苜蓿等为主。由于降雨较少且年内年际分配不均,蒸发量大,流域内干旱灾害时常发生。

研究所需日降雨资料源于流域内董庄沟、杨家沟、下寺肴、十八亩台、范家沟、路家堡和花果山水库等7个观测站(图1)1970—2012年实测资料(1970年以前大多只对汛期降雨量进行观测且资料缺失比较严重),流域内降雨量由泰森多边形法计算获得。在处理降雨数据时,部分站点缺测资料使用最近站点资料代替;对于个别的全流域缺测资料使用庆阳

西峰站同期资料,利用相关分析进行插补,西峰站数据来自于国家气象数据网。

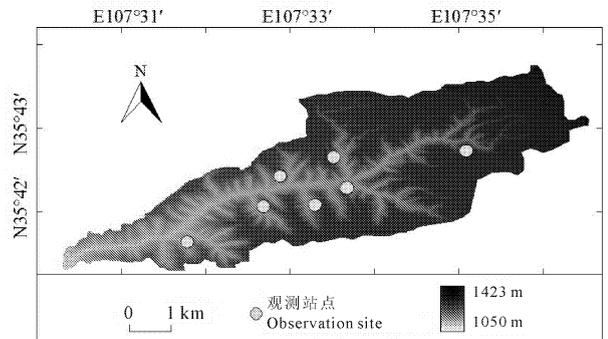


图1 南小河流域位置及站点分布

Fig.1 The location of the Nanxiaohogou basin and the distribution of observation site

1.2 研究方法

1.2.1 干旱描述方法 本文使用西北及黄土高原地区干旱分析中应用良好^[8-10]、中国国家标准化管理委员会制定的气象干旱等级^[11]中推荐的方法——标准化降雨指数(*SPI*)法对干旱等级进行划分,即:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (1)$$

式中,*SPI*为标准化降雨指数; $t = \sqrt{\ln(1/F^2)}$; *F*为降雨的 Γ 分布概率。当 $F > 0.5$ 时,取 $S = 1$,当 $F \leq 0.5$ 时,取 $S = -1$ 。 $c_0 = 2.515517$; $c_1 = 0.802853$; $c_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189268$; $d_3 = 0.001308$ 为经验参数。

利用式(1)计算出的*SPI*值,参考标准化降雨指数(*SPI*)值干旱等级划分表,对研究区不同时间尺度干旱以及降雨进行分等级描述,表1、表2分别为年及季节尺度不同干旱等级与降雨区间分布。

表1 年尺度不同干旱等级与降雨区间分布

Table 1 Distribution of different drought levels and rainfall range in year scale

分级 Classification	干旱等级 Drought level	<i>SPI</i> 值 The value of <i>SPI</i>	年降雨量 Annual rainfall /mm
1	轻旱 Light drought	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$515.1 < P \leq 546.8$
2	中旱 Moderate drought	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$451.5 < P \leq 515.1$
3	重旱 Severe drought	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$387.8 < P \leq 451.5$
4	特旱 Special drought	$-SPI \leq -2.0$	$P \leq 387.8$

表 2 季节尺度不同干旱等级与降雨区间分布

Table.2 Distribution of different levels of drought and rainfall in the four seasons

分级 Classification	干旱等级 Drought level	SPI 值 The value of SPI	春季降雨量 Spring rainfall	夏季降雨量 Summer rainfall	秋季降雨量 Autumn rainfall	冬季降雨量 Winter rainfall
1	轻旱 Light drought	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$90.2 < P \leq 101.5$	$267.1 < P \leq 287.3$	$123.0 < P \leq 137.2$	$19.5 < P \leq 22.8$
2	中旱 Moderate drought	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$67.6 < P \leq 90.2$	$227.0 < P \leq 267.1$	$94.6 < P \leq 123.0$	$12.9 < P \leq 19.5$
3	重旱 Severe drought	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$45.1 < P \leq 67.6$	$186.8 < P \leq 227.0$	$66.2 < P \leq 94.6$	$6.4 < P \leq 12.9$
4	特旱 Special drought	$-SPI \leq -2.0$	$P \leq 45.1$	$P \leq 186.8$	$P \leq 66.2$	$P \leq 6.4$

1.2.2 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验法(以下简称 M-K 检验)是一种非参数检验方法,最初由 Mann 于 1945 年提出,并由 Kendall 于 1975 年对其进行改进,由于其不受样本及其分布的影响,因此在水文学领域时间序列的趋势分析及突变检验中运用十分广泛^[12]。

1.2.3 季节性交乘趋势模型 现阶段干旱预测主要采用对数线性模型、马尔科夫模型以及灰色系统模型等^[13-15]。然而,以上模型在实际应用中均存在明显不足。低维对数线性模型预测精度较差,维数增加虽然可以增加预测精度,但会使得建模以及求解过程变复杂。由于近期干旱程度更倾向于重现,因此马尔科夫模型在短时段内的预测精度不高^[16]。灰色系统 GM(1,1)模型需要将无规律性初始数据累加,得到累计数列后进行建模,这一过程弱化了原始过程的随机性^[17]。鉴于此,本文引入季节性交乘趋势模型^[18],根据南小河口流域的年及各季节降雨量进行建模与参数优化,并进一步以 SPI 为标准对模型输出结果做出分析,该模型同时考虑了趋势的消长变化以及周期性成分对于模型输出的影响,因此可望在季节性变化序列的预测中取得较好成果。季节性交乘趋势模型的建立过程如下:

设有 T 个历史数据, M 为其变化周期,将 T 个历史数据按周期分成 N 组,构成一 $N \times M$ 型矩阵,然后按照以下步骤计算:

(1) 计算 t 这一时段的平均季节性水平 \bar{a}_t ,

$$\bar{a}_t = \bar{a}_0 + \bar{b}_0 t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中, \bar{b}_0 为线性趋势方程的初始截斜率, \bar{a}_0 为 $t = 0$ 的周期平均期望值。分别由经验公式 $\bar{b}_0 = \frac{\bar{x}_N - \bar{x}_1}{T - M}$ 以及 $\bar{a}_0 = \bar{x}_1 - \left(\text{int} \frac{M}{2} + 0.5\right) \bar{b}_0$ 计算,其中 \bar{x}_1 与 \bar{x}_N 为第 1 以及第 N 个周期的序列平均值, int 表示取整运算。

(2) 按照式(3)与式(4)分别计算 t 时段的季节比以及各周期内各时段的平均季节比:

$$\tilde{r}_t = \frac{x_t}{a_t} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$\bar{r}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{r}_{i+jM} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

(3) 对 \bar{r}_i 序列进行标准化,得到 \hat{r}_t 序列,并利用 $\hat{a}_0 = \bar{a}_0$ 和 $\hat{b}_0 = \bar{b}_0$,按照式(5)的递推关系进行参数演算:

$$\begin{aligned} \hat{a}_t &= \alpha \left(\frac{x_t}{\hat{r}_t} \right) + (1 - \alpha)(\hat{a}_{t-1} + \hat{b}_{t-1}) \\ \hat{b}_t &= \beta(\hat{a}_t - \hat{a}_{t-1}) + (1 - \beta)\hat{b}_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots, T \\ \hat{r}_{t+M} &= \beta \left(\frac{x_t}{\hat{a}_t} \right) + (1 - \beta)\hat{r}_t \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: α, β 为平滑参数,均位于区间(0,1)内,使用单纯形加速法进行优化,根据均方差拟合误差最小的原则确定。

(4) 按照式(6)计算周期内季节比平均值,并按照式(7)对周期内季节平均比进行规范化处理,使其均值为 1。

$$v_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \hat{r}_{(j-1)M+i} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$\gamma_{(j-1)M+i} = \hat{r}_{(j-1)M+i} / v_i \quad j = 2, 3, \dots, N+1; i = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

经过以上步骤,则建立了预报模型,得到参数 \hat{a}_T, \hat{b}_T 以及 $\hat{\gamma}_{T+1}, \hat{\gamma}_{T+2}, \hat{\gamma}_{T+M}$ 的估计值,并根据公式(8)可对时段 T 的未来第 τ 个时段进行预测:

$$\hat{x}_T(\tau) = (\hat{a}_T + \hat{b}_T \tau) \gamma_{T+\tau} \quad \tau = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

建模过程中使用的周期项参数由 Mexican hat 小波分析^[19]确定。分析时设定开始取样点为 1, 取样间隔为 1, 等高线条数为 30, 在去除 1 a 的周期后(程序默认的最明显周期),选取均方差最大值对应的周期为季节性交乘趋势模型所需的周期项参数。而对于平滑参数的选取、预测时段 $\tau \geq M$ 以及所剩数据未能组成一个周期等特殊情况的建模过程详见相关参考文献^[18,20]。

2 结果与分析

2.1 年 SPI 变化趋势及突变检验

由年 SPI 变化曲线(图 2)可以看出,南小河口流域内 SPI 值在 1973—1979 年间变化较小,而在

1985—1994 年间变化则十分剧烈。整体来看, *SPI* 变化主要在 $-1.5 \sim 1.5$ 之间, 流域内出现干旱 ($SPI \leq -0.5$) 的概率为 48.84%, 其中, 出现特旱、重旱、中旱与轻旱的概率分别为 11.63%, 11.63%, 20.93% 与 4.65%。趋势线方程为 $y = -0.010x + 20.26 (R^2 = 0.006)$, 表明该流域整体上在向干旱化方向发展, 这与张建兴等^[5]的研究结论相一致。

对南小河流域的年 *SPI* 进行 M-K 检验(图 3a), 可以看出, 正序列曲线 UF 在 1995 年以后均小于 0, 但曲线序列位于 0.05 显著性水平信度线范围内, 说明该时段内 *SPI* 值不具有明显的减小趋势。正序列曲线 UF 与反序列曲线 UB 有 8 个交点, 即 1972 年、1974 年、1980 年、1982 年、1983 年、1984 年、1985 以及 1989 年, 且交点均位于信度线范围内, 因此, 这些年份为年 *SPI* 可能突变点。进一步使用滑

动 t 检验对可能突变点进行检验(图 3b), 可以看出, 在研究时段内, 当设置子序列为 3 a 时, 统计序列均没有超过 0.05 显著性水平, 说明在研究时段内年 *SPI* 值没有发生突变。

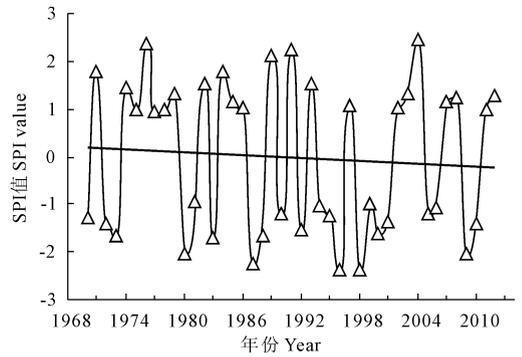


图 2 南小河流域年 *SPI* 年际变化

Fig.2 Annual variation of *SPI* in Nanxiaohegou basin

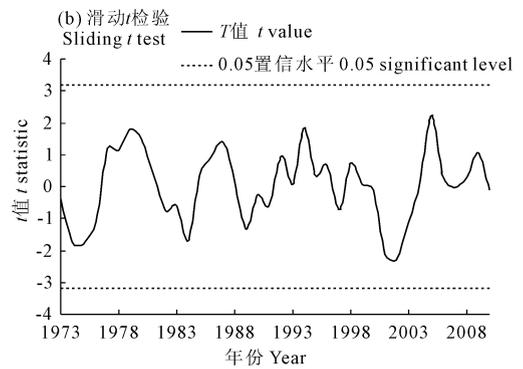
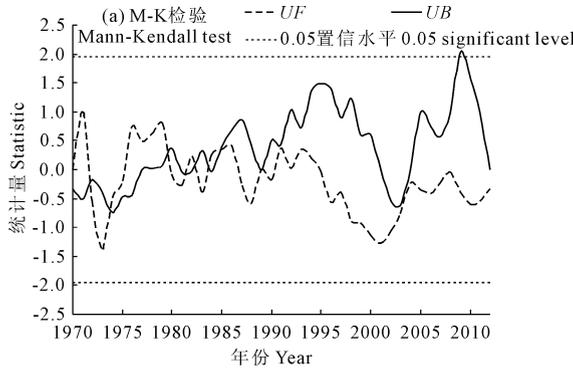


图 3 南小河流域年 *SPI* 突变检验

Fig.3 Mutation test of annual *SPI* in Nanxiaohegou basin

2.2 各季节 *SPI* 变化趋势

对流域内春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11)以及冬季(12月—次年2月)分别进行 M-K 检验。由图 4 可以看出, 不同季节 *SPI* 的变化趋势不同, 并且各季节 *SPI* 突变点的分布不同。对春季 *SPI* 进行 M-K 检验的结果显示(图 4a), UF 统计量只在 1972 年、1974—1975 年、1985 年以及 1988—1994 年大于 0, 并且曲线序列位于 0.05 显著性水平信度线范围内, 说明在这段时间内春季干旱程度减弱趋势不显著; 1995 年后各年 UF 统计量均小于 0, 但 UF 曲线始终位于 0.05 显著性水平信度线范围内, 表明该时段内干旱化趋势并不显著。春季干旱有明显的分阶段特征, 这与姚玉璧等^[21]的研究结论一致。从夏季 *SPI* 值的 M-K 检验可以看出(图 4b), UF 统计量仅在 1980—1982 年间大于 0, 曲线始终位于 0.05 显著性水平信度线内, 表明该时段内干旱程度减弱趋势不显著; UF 统计值在 1983 年以后均小于 0, UF 曲线同样位于 0.05 显著性水平信度线

内, 表明 1983 年以后干旱化趋势不显著; 流域内夏季干旱程度变化趋势不显著, 与马琼等^[7]的研究结果相一致。对秋季 *SPI* 进行 M-K 检验(图 4c)可以发现: UF 统计量在 1973—1978 年、1983 年、1985 年、以及 2005—2012 年大于 0, 曲线始终位于 0.05 显著性水平信度线内, 表示这些时段内干旱程度减小趋势不显著; UF 曲线在 1975 年超过 0.05 置信水平信度线, 表明 1975 年 *SPI* 值增大显著, 该年秋季干旱程度显著减小^[22]。冬季 M-K 检验的结果(图 4d)显示: 1978—1989 年、1992 年、1995 年以及 1998—2012 年 UF 统计量均小于 0, 但曲线序列未超过 0.05 显著性水平信度线, 表明在这些时段内冬季干旱化程度不显著; UF 统计量在 1975 年大于 0 且超过 0.05 显著性水平信度线, 表明 1975 年冬季干旱程度显著减小; 冬季 UF 统计量有 61.90% 在 $-0.5 \sim 0.5$ 范围内波动, 有 73.80% 在 $-0.7 \sim 0.7$ 范围内波动, 主要变换范围在无旱与轻旱等级之间, 这表明该区域冬季干旱的整体变化趋势不显著, 干旱程度变化较小^[5]。

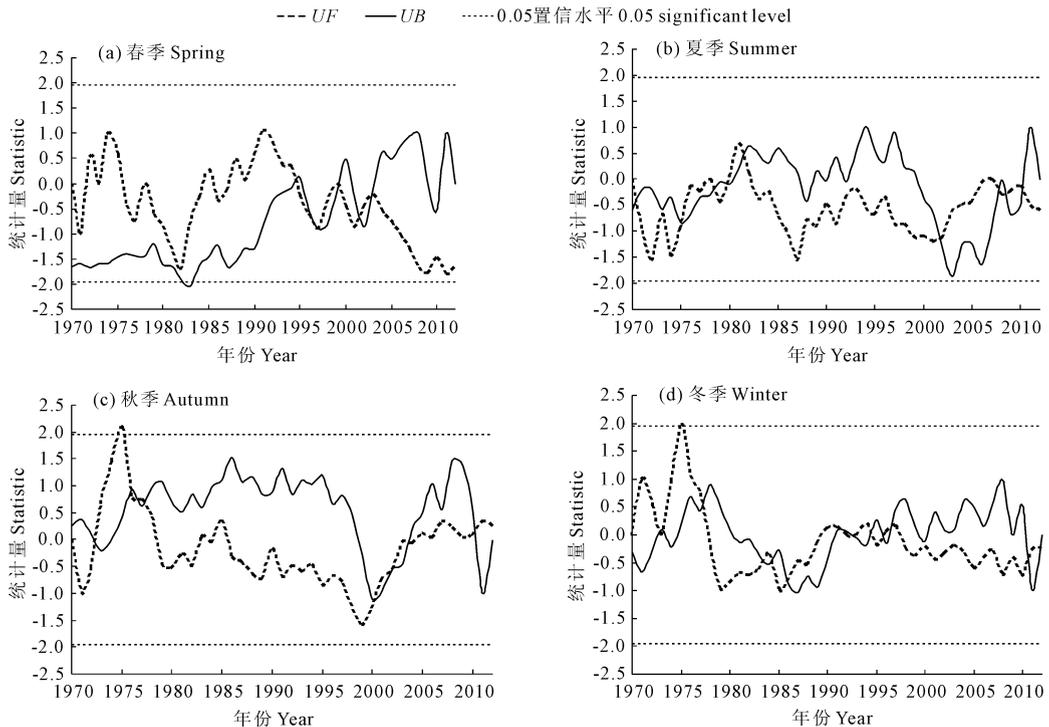


图 4 南小河流域各季节 SPI 变化趋势分析

Fig. 4 Trend analysis of SPI in different seasons in Nanxiaohogou basin

2.3 季节性交乘趋势模型的应用

分别使用流域内 1970—2005 年全年和各季节降雨资料对季节性交乘模型进行参数估计与率定,使用 2006—2012 年降雨资料对模型输出结果进行验证,验证时采用降雨量相对误差以及干旱程度评估合格率作为标准。

2.3.1 季节性交乘趋势模型在年干旱预测中的应用与检验 使用 1970—2005 年全年降雨量资料,根

据 Mexican hat 小波分析的结果,以 9 年为周期进行季节性交乘趋势模型建模,最终得到以下的预报模型:

$$X_{\text{年}}(\tau) = (524.944 - 1.168 \times \tau)\gamma \quad (9)$$

式中, τ 为时间间隔(年); γ 为季节比。

使用式(9)确定的模型对 2006—2012 年降雨情况进行输出,并与实测资料进行对比来验证模型的适用性(表 3)。

表 3 季节性交乘趋势模型在年干旱评估中的验证

Table 3 Verification of seasonal cross multiply trend model in annual drought assessment

项目 Item	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
输出值 Output value/mm	529.70*	556.60	420.00	469.10	578.80**	596.60	459.30
实测值 Measured value/mm	577.10	586.30	391.30	459.60	541.70	595.50	481.40
相对误差 Relative error/%	-8.21	-5.07	7.33	2.07	6.85	0.19	-4.59

注: * 模型高估了干旱等级; ** 模型低估了干旱等级。下同。

Note: * The model overestimated the drought level; ** The model underestimated the drought level. The same below.

由表 3 可以看出,在对年降雨量进行评估时,模型输出结果的绝对误差分布在 $-47.4 \sim 37.1$ mm 之间,相对误差分布在 $-8.21\% \sim 7.34\%$ 之间,模型输出结果整体效果良好。模型对于重旱年(2008 年)和轻旱年(2010)的输出结果偏大,而在中旱年(2009 年、2012 年)则即可能偏大也可能偏小。根据模型输出结果对其干旱等级进行划分,结果表明:2006—2012 年当中,模型输出结果在除 2006 与 2010 年以

外的其余年份干旱程度与实际相同,干旱等级预测合格率达到 71.43%。模型在 2006 年高估了当年的干旱程度,在 2010 年则低估了当年的干旱程度。

3.3.2 季节性交乘趋势模型在季节干旱预测中的应用与检验 根据 1970—2005 年各季节降雨量资料,使用 Mexican hat 小波分析各季节降雨周期,根据均方差最大的原理确定春、夏、秋、冬季的周期分别为 6 年、12 年、9 年与 21 年,其中冬季降雨的 21 年周期

由于未能出现完整波形,需要长系列数据进行验证,因此,其降雨周期采用第二主周期,其周期为 7 年。最终,分别以 6 年,12 年,9 年与 7 年为春季、夏季、秋季与冬季降雨的周期进行季节性交乘趋势模型建模,得到以下的预报模型:

$$X_{\text{春}}(\tau) = (105.159 - 0.046 \times \tau)\gamma_1$$

$$X_{\text{夏}}(\tau) = (255.218 - 1.519 \times \tau)\gamma_2$$

$$X_{\text{秋}}(\tau) = (129.059 - 0.805 \times \tau)\gamma_3 \quad (10)$$

$$X_{\text{冬}}(\tau) = (20.925 - 0.392 \times \tau)\gamma_4$$

式中, τ 为时间间隔(年); γ_1 为各季节不同周期的季节比。

使用式(10)确定的模型输出 2006—2012 年各季节降雨情况,并与实测资料进行对比来验证模型的适用性(表 4)。

表 4 季节性交乘趋势模型在各季节干旱评估中的验证

Table 4 Verification of seasonal cross multiply trend model in seasonal drought assessment

季节 Season	项目 Item	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
春季 Spring	输出值 Output value/mm	75.90	72.40**	58.20**	73.60	103.20	66.20	89.80*
	实测值 Measured value/mm	69.70	59.70	42.30	76.30	124.90	47.90	108.20
	相对误差 Relative error/%	8.90	21.27	37.59	-3.54	-17.37	38.20	-17.01
夏季 Summer	输出值 Output value/mm	334.90	267.40	235.30**	249.30	245.40*	239.70**	263.50
	实测值 Measured value/mm	377.60	286.40	214.30	264.20	287.40	201.30	248.40
	相对误差 Relative error/%	-11.31	-6.63	9.80	-5.64	-14.61	19.08	6.08
秋季 Autumn	输出值 Output value/mm	80.50	179.50	112.00	121.90**	116.20	248.50	139.90**
	实测值 Measured value/mm	93.00	214.60	108.30	92.80	110.10	320.00	116.40
	相对误差 Relative error/%	-13.44	-16.36	3.42	31.36	5.54	-22.34	20.19
冬季 Winter	输出值 Output value/mm	23.40	23.00	17.60*	23.10	24.40**	36.90	19.80
	实测值 Measured value/mm	25.50	24.60	24.40	34.30	16.50	76.50	22.30
	相对误差 Relative error/%	-8.24	-6.50	-27.87	-32.65	47.88	-51.76	-11.21

以各季节降雨量模型输出结果的相对对误差来看,由模型输出的 2006—2012 各年春、夏、秋、冬各季节降雨量的相对误差分别分布在 $-17.37\% \sim 38.20\%$ 、 $-14.61\% \sim 19.08\%$ 、 $-22.34\% \sim 31.36\%$ 与 $-51.76\% \sim 47.88\%$ 之间,整体来看,模型在输出夏季降雨量时的相对误差最小,而在输出冬季降雨量时的相对误差最大。春、夏、秋、冬各季节的多年平均降雨量分别为 100.3, 280.5, 139.6 mm 与 24.0 mm,而模型输出结果在各季节的绝对误差分别分布在 $-21.7 \sim 18.3$ 、 $-42.7 \sim 38.4$ 、 $-71.5 \sim 29.1$ mm 与 $-39.6 \sim 7.9$ mm 之间,秋季与冬季模型输出结果绝对误差变化幅度较大且其不对称程度明显大于春季与夏季。

在对干旱等级进行评估时,模型春、夏、秋、冬季的通过率分别达到 57.14%、57.14%、71.43% 以及 71.43%。模型在春季与夏季干旱等级评估中的通过率不高。在 2006—2012 年 4 个季节共 28 个输出值当中,有 10 个出现了对于干旱等级的错误估计,其中高估干旱等级的有 3 个,占 30.00%,低估干旱等级的有 7 个,占到 70.00%。模型在 2007 年春季、2008 年夏季、2009 年秋季以及 2011 年夏季将重旱水平错估为中旱水平,而在 2008 年冬季、2010 年夏

季以及 2012 年春季,将无旱水平错估为中旱水平,以上 7 个特征值占到错估总数的 70.00%,说明模型在对降雨量进行输出,进而对干旱等级的分析出现错估时,有向中旱水平辐射的强烈趋势。

3 讨论

目前,对干旱程度进行描述时,有多种干旱指数可供选择^[9,23-25]。各干旱指数在对干旱进行描述时依靠的干旱机理和统计规律有所不同;受到气候特征与地理分布的影响,同一干旱指标应用于不同区域时,其干旱程度阈值分布也不尽相同^[23]。本文使用标准化降雨指数(SPI)对干旱程度进行描述,是由于该方法是国家标准化管理委员会制定的气象干旱等级^[11]中所推荐,该计算过程相对简单,因而得到了广泛的应用。然而,现有研究在对不同区域的干旱程度进行描述时,大多采用了推荐标准中的干旱程度阈值,并未对其进行修正,因此,在对干旱程度进行估计时,可能会有错估的情况发生^[8-10]。因此,结合多种干旱指标对流域尺度干旱进行综合评价,并根据南小河流域实际干旱情况对 SPI 指数不同干旱程度的阈值进行修正,进而更加准确的对干旱程度进行描述,将是日后研究的重

点。

在使用季节性交乘趋势模型进行建模与参数率定时,模型所需的周期项参数由 Mexican hat 小波函数^[19]分析求得。为了在不同时间尺度上进行比较,在选择周期项参数时,各时间尺度均依据均方差最大的原理选择了降雨序列最明显的周期作为输入模型的周期(冬季周期由于未出现完整波形而选择其第二主周期为模型输入参数),而未对其它可能存在的周期进行分析。分析可能存在的不同周期对于季节性交乘趋势模型的影响,并进一步分析不同周期对于干旱评估结果的影响,需要继续深入研究。

4 结 论

本文使用黄土高原沟壑区南小河流域 1970—2012 年降雨资料,利用标准化降雨指数(SPI)对干旱等级进行划分,通过对年以及季节 SPI 进行 Mann-Kendall 检验以及使用季节趋势模型对年及季节干旱进行评估,得出以下主要结论:

1) 流域内年 SPI 变化剧烈,整体向干旱化方向发展。特旱、重旱、中旱与轻旱的概率分别为 11.63%,11.63%,20.93%与 4.65%。

2) 不同季节 SPI 的变化趋势不同。春季干旱有明显的分阶段特征;夏季干旱变化趋势不显著;除 1975 年以外,秋季干旱变化趋势也不显著;冬季干旱的整体变化趋势不显著,干旱程度变化比较稳定。

3) 季节性交乘趋势模型在对年降雨量进行输出时,相对误差分布在 -8.21%~7.34%之间,干旱等级评估合格率达到 71.43%,模型整体对于干旱评估效果良好。

4) 季节性交乘趋势模型在对春、夏、秋、冬各季降雨量进行输出时,相对误差分别分布在 -17.37%~38.20%、-14.61%~19.08%、-22.34%~31.36%与 -51.76%~47.88%之间,干旱等级评估合格率分别达到 57.14%、57.14%、71.43%以及 71.43%,对干旱等级的评估出现错估时,有向中旱水平辐射的强烈趋势。

参 考 文 献:

[1] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central united states[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998,79(12):2693-2714.

[2] 晚 华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.

[3] 李伟光,易 雪,侯美亭,等.基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J].中国生态农业学报,2012,20(5):643-649.

[4] 包云轩,孟翠丽,申双和,等.基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J].地理学报,2011,66(5):599-608.

[5] 张建兴,马孝义,赵文举,等.黄土高原地区干旱长期变化趋势及预测[J].干旱地区农业研究,2006,26(3):1-6.

[6] 张调风,张 勃,王小敏,等.基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析——以甘肃省黄土高原区为例[J].生态环境学报,2012,21(1):13-20.

[7] 马 琼,张 勃,王 东,等.1960—2012 年甘肃黄土高原干旱时空变化特征分析——基于标准化降水蒸散指数[J].资源科学,2014,36(9):1834-1841.

[8] 任徐龙,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.

[9] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,等.1960—2010 年甘肃省不同气候区 SPI 与 Z 指数的年及春季变化特征[J].生态学杂志,2013,32(3):704-711.

[10] 孙智辉,王志亮,曹雪梅,等.基于标准化降雨指数的陕西黄土高原地区 1971—2010 年干旱变化特征[J].中国沙漠,2013,33(5):1560-1567.

[11] 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.GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.

[12] 蔡 霞,蔡 琳,李春华,等.晋北地区降水量时空变化及突变分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):247-254.

[13] Paulo A A, Ferreira E, Coelho C A, et al. Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning[J]. Agricultural Water Management, 2005,77:59-81.

[14] 王彦集,刘俊民,王鹏新.基于加权马尔可夫模型的标准化降水指数干旱预测研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(5):198-203.

[15] 夏 露,宋孝玉,马细霞.新乡市近 60 年降水序列变化规律及干旱预测[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):14-18.

[16] 冯 平,胡 荣,李建柱.基于三维对数线性模型的气象干旱等级预测研究[J].水利学报,2014,45(5):505-512.

[17] 杨华龙,刘金霞,郑 斌.灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用[J].数学的实践与认识,2011,41(23):39-46.

[18] 郑小丽,杜莉丽.基于季节性模型的长期降水预测及预报检验[J].安徽农业科学,2013,41(28):11454-11455.

[19] 余世鹏,杨劲松,王相平.滨海滩涂地区降水变化的多尺度周期特征分析与趋势预测[J].中国农业气象,2013,34(4):377-383.

[20] 郑宗成,王振堂.实用预测方法 BASIC 程序库[M].广州:中山大学出版社,1984:165-169.

[21] 姚玉璧,王劲松,王 莺.黄土高原春季干旱时空分异特征[J].高原气象,2015,34(1):30-38.

[22] 王媛媛,张 勃.基于标准化降水指数的近 40a 陇东地区旱涝时空特征[J].自然资源学报,2012,27(12):2135-2144.

[23] 孙智辉,王治亮,曹雪梅,等.3 种干旱指标在陕西黄土高原的应用对比分析[J].中国农学通报,2014,30(20):308-315.

[24] 尹萌毅,赵西社,刘新生,等.几种干旱评估指标在黄土高原的应用对比分析[J].安徽农业科技,2012,40(7):4190-4193.

[25] 杨世刚,杨德保,赵桂香,等.三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J].高原气象,2011,30(5):1406-1414.