

网络出版时间:2021-04-26 15:40 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.10.017
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210426.1022.002.html

基于 SWAT 的金塔河流域综合干旱指数构建及其适用性分析

梁 箴^a, 粟晓玲^{a, b}

(西北农林科技大学 a 水利与建筑工程学院,

b 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】基于 SWAT 模型,构建资料缺失条件下的综合干旱指数,为干旱特性的多角度分析提供支持。【方法】以甘肃省金塔河流域为研究对象,依据 1981—2017 年水文气象资料建立流域 SWAT 水文模型,通过 SWAT-CUP 对模型参数进行率定与验证,将模拟的土壤湿度、蒸散发数据与实测降雨、径流数据相结合,运用嵌套 Archimedean 构造联合多个干旱变量,构建参数化的气象-农业-水文综合干旱指数(comprehensive drought index, CDI),并分析所构建 CDI 的适用性。【结果】SWAT 模型模拟的金塔河流域径流值与实测值吻合良好,率定期和验证期的确定性系数(R^2)与 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})均高于 0.7,且不确定性分析指标 $P>0.7$ 、 $R<1.5$,均在可接受范围内,调整后的模型参数可用于描述金塔河流域的水文过程。所构建的参数化的气象-农业-水文 CDI 的干旱监测结果与实际干旱事件的发生基本一致,且能够监测到仅有 1 种或 2 种干旱发生的干旱区域,可同时表征气象干旱、农业干旱、水文干旱,能从多个角度反映干旱特性。CDI 对金塔河流域东北部的气象干旱、农业干旱、水文干旱的监测能力较强;年尺度的 CDI 对气象干旱、农业干旱与水文干旱的监测能力强于季尺度与月尺度。【结论】所构建的 CDI 适用于金塔河流域气象-农业-水文综合干旱的监测,可为该地区干旱监测及早灾预警提供支持。

【关键词】 SWAT 模型;综合干旱指数;干旱监测;金塔河流域

【中图分类号】 P339

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)10-0136-09

Construction and applicability of a comprehensive drought index for Jinta River Basin based on SWAT

LIANG Zheng^a, SU Xiaoling^{a, b}

(a College of Water Resources and Architectural Engineering, b Key Laboratory for Agricultural Soil and Water

Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】Based on the SWAT model, a comprehensive drought index under the condition of missing data was constructed to provide support for characterization of drought from multiple perspectives. 【Method】The SWAT hydrological model for the Jinta River Basin was constructed with hydro-meteorological data from 1981 to 2017. The parameters of the model were calibrated and validated by SWAT-CUP. Simulated soil moisture and evapotranspiration data were combined with measured rainfall and streamflow data to construct meteorological-agricultural-hydrological comprehensive drought index (CDI) by the Nested Archimedean Construction. Furthermore, the applicability of CDI was analyzed. 【Result】The simulated values of Jinta River Basin by the SWAT model were in good agreement with measured values.

【收稿日期】 2020-10-13

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51879222)

【作者简介】 梁 箴(1996—),女,山东高唐人,硕士,主要从事干旱演变研究。E-mail: xin447422907@163.com

【通信作者】 粟晓玲(1968—),女,四川开江人,教授,博士生导师,主要从事水文模拟及水资源优化研究。

E-mail: xiaolingsu@nwafu.edu.cn

The model evaluation indexes of R^2 and E_{NS} were higher than 0.7 in the calibration and validation periods. The model uncertainty was within the acceptable range of $P > 0.7$ and $R < 1.5$. The adjusted model parameters can be used to describe hydrologic process of the basin. The drought monitoring results of constructed parameterized meteorological-agricultural-hydrological CDI were basically consistent with the occurrence of actual drought events, and it can monitor arid areas with one or two drought events. CDI can simultaneously characterize meteorological, agricultural, and hydrological droughts, and describe droughts from multiple perspectives. CDI is more capable of monitoring meteorological drought, agricultural drought and hydrological drought in the northeastern part of the Jinta River Basin. The annual-scale CDI captured meteorological, agricultural and hydrological droughts better than seasonal and monthly scales. 【Conclusion】 The constructed CDI was suitable for the monitoring of meteorological, agricultural and hydrological droughts in the Jinta River Basin, and can provide theoretical basis for drought monitoring and early warning of droughts in this area.

Key words: SWAT model; comprehensive drought index; drought monitoring; the Jinta River Basin

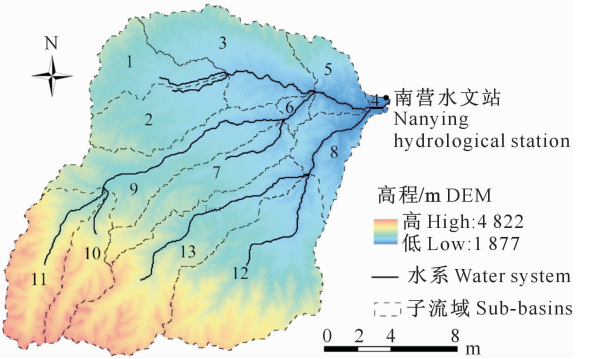
干旱是指长时间的水分短缺造成的水资源供需不平衡现象,是一种成因复杂、发生频繁、影响广泛的自然现象^[1-2],同时也是对我国社会经济影响最严重的气象灾害之一^[3]。干旱通常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱以及社会经济干旱 4 类,干旱指数在干旱分析中起着表征、度量和对比干旱程度的重要作用^[4],是监测、评价和研究干旱发生、发展的基础^[5]。常用的干旱指数有表征气象干旱的标准化降水指数^[6](standardized precipitation index, SPI)和标准化降水蒸散发指数^[7](standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),表征水文干旱的标准化径流指数^[8](standardized runoff index, SRI)及表征农业干旱的标准化土壤湿度指数^[9](standardized soil moisture index, SSI)等。不同类型的干旱分析需要不同的干旱变量,然而一些干旱变量的实测数据获取困难,水文模型作为一种间接获取干旱变量的方式被广泛应用。SWAT(soil and water assessment tool)模型是一种基于物理机制的、连续性的分布式水文模型^[10],可应用于流域水文过程的模拟与管理,Zhang 等^[11]利用降雨数据及 SWAT 水文模型模拟出的蒸散发与土壤湿度等,构建了帕尔默干旱指数(palmer drought severity index, PDSI)、SPI 以及 SPEI 等。

由于干旱成因的复杂性以及不同干旱变量之间的关联性,单一的变量无法表征干旱的全部特性^[12],故构建多维变量的综合干旱指数可为干旱的监测、预防以及调控提供支持。综合干旱指数常用的构建方法有模糊综合法^[13]、主成分分析法^[14]、Copula 函数联结法^[15]等,但模糊综合法在赋权时存在一定的主观性,易造成误差;主成分分析法是将相

关变量进行线性组合,无法反映变量间的非线性影响特征^[15];而 Copula 函数能够将不同的边缘分布联结在一起,既保证了变量的独立性,又考虑了变量间的相关性,是目前最常用的分析方法之一。Hao 等^[16]采用 Frank Copula 函数联结 SPI 与 SSI 2 个指数,构建了气象农业综合干旱指数(multivariate standardized drought index, MSDI);李勤等^[17]对上述指标进行了改进,以 SPEI 代替 SPI,用非参数化方法联合 SPEI 和 SSI,提出了改进的气象农业综合干旱指数(modified multivariate standardized drought index, MMSDI)。然而, Copula 函数在联结三维及三维以上变量时具有一定的局限性^[18-19],这种现象通常被称为“维数灾”^[20],为了解决这一问题,目前常采用的联结高维变量的函数主要是非对称 Copula 函数。非对称 Copula 函数分为 Pair Copula 构造与嵌套 Archimedean 构造。Pair Copula 构造多用于洪水频率分析^[21],在综合干旱指数构建方面应用较少,且计算复杂;嵌套 Archimedean 构造方法简单且便于计算,但在多维干旱指数的研究中还不多见。为此,本研究以土壤湿度和蒸散发等实测资料较少的石羊河流域支流金塔河流域为对象,采用 SWAT 建立该地区的水文模型,模拟研究区缺失的气象水文资料,并与降雨、径流等实测数据相结合,通过参数化或非参数化方法构建单变量干旱指数 SPEI、SSI 以及 SRI,采用非对称 Copula 函数中的嵌套 Archimedean 构造(nested archimedean construction, NAC)方法构建气象-农业-水文综合干旱指数(comprehensive drought index, CDI),并分析 CDI 的适用性,为干旱灾害的监测预报及评价提供科学依据。

1 研究区概况

金塔河是甘肃石羊河上游八大支流之一,起源于天祝藏族自治县境内的祁连山冷龙岭,该流域位于东经 100°57′—104°12′,北纬 37°02′—39°17′,地势南高北低,自西南向东北倾斜,平均海拔 3 000 m,流域面积约 841 km^[22]。该流域属高寒半干旱半湿润区,年降雨量 200~500 mm,年蒸发量 700~1 200 mm,多年平均径流量达 1.314 亿 m³。金塔河流域河道及水文站位置见图 1。



1~13 为子流域编号

1-13 are numbers of sub-basins

图 1 金塔河流域水文站位置及子流域划分

Fig. 1 Hydrological stations and sub-basins division in the Jinta River Basin

2 研究方法

2.1 研究资料

SWAT 模型主要的输入资料包括气象水文数据、数字高程模型(DEM)、土地利用类型图及其数据库、土壤分布类型图及其属性数据库。气象数据包括日降水量(P , mm)、日最高气温($T_{\max}$, °C)、日最低气温($T_{\min}$, °C)、日照时数(h)、风速(m/s)和相对湿度(%),时间尺度为 1981—2017 年,其中日降水量来源于 CHIRPS(Climatic Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)数据集(<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>),该数据集是由美国地质调查局(USGS)和加利福尼亚大学气候危害小组联合开发,提供了从 1981 年至今的多时间尺度、多空间分辨率的降水数据;日温度数据来源于 CN05.1 格点化观测数据集,该数据集由吴佳等^[23]利用国家气象中心 2 400 余个国家级台站(基本、基准和一般站)的观测资料采用“距平逼近”的方法插值得到^[24];其余气象数据来自于甘肃省气象局(实测数据)和中国气象数据共享服务网([http://](http://data.cma.cn/)

data.cma.cn/)。水文数据为金塔河河流出口南营站 1983—2017 年月径流 Q (m³/s)资料,来源于甘肃省水文局。数字高程模型来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 90 m×90 m。土壤数据来源于世界粮农组织(FAO)提供的 1:100 万土壤数据(HWSD, <http://www.fao.org/nr/land/soils/harmonized-world-soil-database/>)。土地利用数据来源于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/DataProduct/>),分辨率为 30 m×30 m。

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型是美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的适用于复杂流域、具有很强物理机制的分布式水文模型^[25]。该模型将流域划分成若干个子流域,并依据子流域的土壤类型、土地利用方式及坡度将其划分成一个或多个水文响应单元(hydrologic response units, HRU),基于 HRU 分别进行土壤有效含水量、地表径流等的模拟。本研究选取的土地利用、土壤类型、坡度的阈值分别为 5%,10%和 10%,共划分了 13 个子流域(图 1),282 个 HRU。

SWAT 模型主要分为水文过程、土壤侵蚀和污染负荷 3 个子模块,本研究使用水文过程子模块,水文循环过程遵循以下水量平衡过程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day},i} - Q_{\text{surf},i} - E_{a,i} - \omega_{\text{seep},i} - Q_{\text{gw},i}) \tag{1}$$

式中: SW_t 为土壤的最终含水量(mm), SW_0 为土壤的初始含水量, t 为时间(d), i 为计算时段, $R_{\text{day},i}$ 、 $Q_{\text{surf},i}$ 、 $E_{a,i}$ 、 $\omega_{\text{seep},i}$ 、 $Q_{\text{gw},i}$ 分别为第 i 天的降水量、地表径流量、蒸发蒸腾量、土壤坡面侧流量与渗流量、地下水回流量(mm)。其中,地表径流量采用径流曲线数法(soil conservation service, SCS)^[26]模拟,蒸发蒸腾量采用 Penman-Monteith 公式^[26]计算,土壤坡面侧流量采用动力蓄水模型^[26]计算,渗流量采用土壤蓄水演算方法^[26]计算,地下水回流量根据蓄水体层补给量与基流回归系数得出。

采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型进行率定与验证。SWAT-CUP 是由 SWAT 官网提供的用于辅助 SWAT 模型参数率定的工具, SUFI-2 算法是 SWAT-CUP 中用于参数敏感性及其不确定性分析的方法之一,该算法把通过拉丁超立方随机采样方法获取的参数与目标函数值进行回归分析,以判断参数的敏感性;同时采用 95%置信水

平上的预测不确定性区间带(95% prediction uncertainty, 95PPU)来表示变量的不确定性^[25]。SUFI-2 算法中对于不确定性分析的评价指标为 P 与 R , 其中 P 表示 95PPU 带所包含的实测数据的百分数,取值为 0~1; R 表示由实测数据标准差划分的 95PPU 区间的平均带宽,表示模拟值在 95PPU 带的分布程度,表达式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^k (X_u - X_l)_i}{k\sigma_x} \quad (2)$$

式中: X_u 与 X_l 分别为模拟值的 97.5% 和 2.5% 的累积分布值, k 为实测值的数量, σ_x 为实测变量的标准偏差。模拟值分布越集中,则 R 值越小。

径流模拟精度采用确定性系数 (R^2) 与 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_{NS}) 来评价。 R^2 描述的是模拟值与实测值变化趋势的一致性,其值越接近于 1,表示精度越高; E_{NS} 描述的是模拟值与实测值的关系图与 1:1 线的吻合程度,其值越接近 1,表示精度越高^[25]。 R^2 与 E_{NS} 的计算表达式如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^k (Q_{m,i} - \overline{Q_m})(Q_{s,i} - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2 \sum_{i=1}^k (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^k (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \quad (4)$$

式中: $Q_{m,i}$ 表示实测径流值, $Q_{s,i}$ 表示模拟径流值, $\overline{Q_m}$ 表示实测径流值的平均值, $\overline{Q_s}$ 表示模拟径流值的平均值。

2.3 单变量干旱指数的构建

2.3.1 参数化方法 选取合适的分布函数对不同时间尺度的干旱变量序列进行逐个拟合,采用极大似然法估计分布函数的参数,用 K-S 检验法进行拟合优度检验,利用 AIC 准则选取最优拟合函数,最后将各干旱变量序列的理论分布函数值逆标准化得出不同时间尺度的干旱指数^[27]。本研究选取的分布函数有伽马分布、对数正态分布、威布尔分布、正态分布、Logistic 分布。

根据 AIC 准则选取的最优拟合分布,将各干旱变量对应的拟合分布函数值逆标准化,即得参数化的干旱指数,表达式为:

$$DI_p = \varphi^{-1} P \quad (5)$$

式中: DI_p 为参数化单变量干旱指数, φ 为标准正态分布函数, P 为理论分布函数值。

2.3.2 非参数化方法 在构建参数化干旱指数的过程中,若某种干旱变量的 5 种理论分布均不能通过 K-S 检验,则采用非参数化方法进行处理。采用

Gringorten 公式计算干旱变量的经验累积频率,表达式为:

$$P_{\text{nonp}}(x_i) = \frac{i - 0.044}{n + 0.12} \quad (6)$$

式中: P_{nonp} 为经验累积概率, i 为变量序列升序时的次序, n 为序列长度。

将经验累积概率逆标准化即为非参数化的干旱指数:

$$DI_{\text{nonp}} = \varphi^{-1} P_{\text{nonp}} \quad (7)$$

式中: DI_{nonp} 为非参数化方法构建的干旱指数值。

2.4 综合干旱指数的构建

嵌套 Archimedean 构造属于 Archimedean Copula 的补充^[28],可分为完全嵌套 Archimedean 构造(fully nested archimedean construction, FNAC)与部分嵌套 Archimedean 构造(partly nested archimedean construction, PNAC)。因本研究联合 3 个干旱变量 u_1 、 u_2 、 u_3 ,故采用 FNAC 方法构建综合干旱指数。FNAC 的构造形式见图 2。节点 u_1 与 u_2 连接形成 Copula $C_1(u_1, u_2)$, u_3 和 $C_1(u_1, u_2)$ 连接形成 Copula $C_2(u_3, C_1(u_1, u_2))$ 。三维 Copula 由二维 Copula C_1 与 C_2 组成,具有生成函数 φ_1 和 φ_2 。

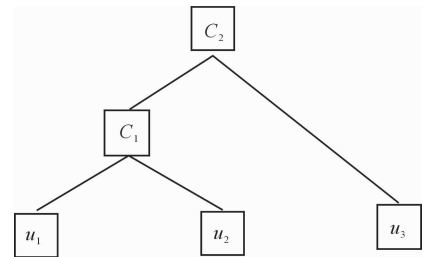


图 2 完全嵌套 Archimedean 构造

Fig. 2 Fully nested Archimedean construction

三维 Copula 的表达式为:

$$C(u_1, u_2, u_3) = C_2(u_3, C(u_1, u_2)) = \varphi_2^{-1}(\varphi_2(u_3) + \varphi_2(\varphi_1^{-1}(\varphi_1(u_2) + \varphi_1(u_1)))) = \varphi_2^{-1}(\varphi_2(u_3) + \varphi_2 \circ \varphi_1^{-1}(\varphi_1(u_2) + \varphi_1(u_1))) \quad (8)$$

式中:符号“ $\circ$ ”表示函数的复合,表示前两个变量连接形成 1 个二维 Copula,这个二维 Copula 同另一个变量形成第二个 Copula。式(8)表明,3 个变量间的相依结构可以用 2 个二维 Copula 描述。一般来说, d 维变量可自由指定 $d-1$ 个节点和相应的分布参数,其余 $(d-1)(d-2)/2$ 节点和参数通过构造隐式函数给出,而且满足参数条件 $\theta_1 \geq \theta_2 \geq \dots \geq \theta_{d-1}$ ^[28]。在 Archimedean Copula 函数中, Frank Copula 函数在联合二维概率分布时对相关性的程度没有限制,且上下尾部的相关性变化均不明显,在干旱研究中

应用较多,故本研究选取 Frank Copula 函数作为 FNAC 中的连接函数。

采用 FNAC 联结三维干旱变量,得出参数化的三维联合干旱变量的概率,最后逆标准化得到三维干旱指数,即:

$$CDI=\varphi^{-1}P_{com}。$$

(9)

式中:CDI 为构建的综合干旱指数, P_{com} 为三维变量联合累积概率。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型的验证

构建金塔河流域 SWAT 模型,其预热期为 1981—1982 年,率定期为 1983—2006 年,验证期为 2007—2017 年。采用 SWAT-CUP 2012 中的 SUFI-2 算法对参数进行率定,并分析参数的敏感性。

表 1 金塔河流域参数敏感性及最优值

Table 1 Sensitivity analysis and final value range of parameters in the Jinta River Basin

参数 Parameter	初始范围 Initial range	最优值 Optimal value
基流系数(ALPHA_BNK)Base flow alpha factor for bank storage	0~1	0.48
降雪温度(SFTMP)Snowfall temperature	-20~20	5.47
融雪基温(SMTMP)Snow melt base temperature	-20~20	18.23
河道有效水力传导度(CH_K2) Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	0.01~130	38.65
土壤饱和和水力传导度(SOL_K)Saturated hydraulic conductivity	-0.5~0.5	0.34

采用 P 、 R 、 R^2 与 E_{NS} 来评价模型的适用性。图 3 为金塔河流域月径流率定期和验证期模拟结果与实测值的对比,其中,率定期 P 、 R 分别为 0.88 和 1.44,满足 $P>0.7$ 、 $R<1.5$ ^[29] 的精度要求,径流模

选取与径流相关的 23 个参数进行全局敏感性分析,因参数的初始范围也是模型不确定性的来源之一,故各参数的初始范围均为 SWAT-CUP 所允许的最大参数范围。敏感性分析的目的是找出对模型模拟结果敏感性较强的参数,以提高模型的模拟效率。敏感性排名前 5 的参数及其最优值见表 1。由表 1 可以看出,敏感性排名前 5 的参数分别是与地表径流形成有关的基流系数(ALPHA_BNK)和河道有效水力传导度(CH_K2)、与融雪相关的参数降雪温度(SFTMP)和融雪基温(SMTMP)、与土壤水有关的土壤饱和和水力传导度(SOL_K)。说明金塔河流域中冰雪融化所生成的径流对整个径流有较大影响,应对与地表径流和融雪相关的参数进行重点调参,这也与该流域的特征(有冰雪覆盖的高寒山区)相符。

拟的不确定性在可接受的范围内。率定期与验证期的 R^2 与 E_{NS} 均高于 0.7,模拟值与实测值拟合程度较高,率定后的模型参数可用于描述该流域的水文过程。

* 实测值 Observation; — 模拟值 Simulation

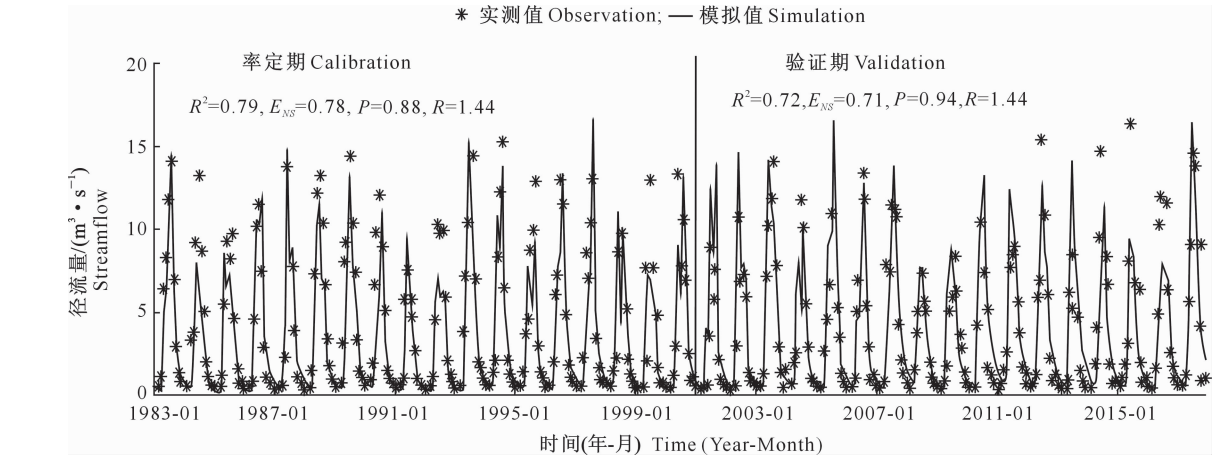


图 3 金塔河流域率定期和验证期月径流量模拟值与实测值的对比

Fig. 3 Time series of simulated and observed monthly streamflow during calibration and validation periods in the Jinta River Basin

3.2 CDI 的适用性分析

基于降雨、蒸散发、土壤湿度及径流等数据,运用参数化与非参数化方法构建金塔河各子流域 1983—2017 年年、季及月尺度的标准化干旱指数

SPEI、SSI、SRI。其中,各个子流域的土壤湿度序列选取的最佳拟合函数多为正态分布,径流序列选取的最佳拟合分布多为威布尔分布与正态分布,降雨与蒸散发的差值序列选取的最佳拟合分布多为 Lo-

gistic 分布与正态分布,仅有 9,10 和 13 号子流域的土壤湿度序列未通过任何理论分布的 K-S 检验,故采用非参数化方法构建 SSI。

单变量干旱指数阈值划分参照 SPI 的划分标准^[6],即干旱指数(I) >0 为无旱, $-1<I\leq0$ 为轻旱, $-1.5<I\leq-1$ 为中旱, $-2<I\leq-1.5$ 为重旱, $I\leq-2$ 为特旱。综合干旱指数 CDI 采用 FNAC 构建,其等级划分参照 Kao 等^[19]所构建的综合干旱指数 JDI 的划分标准,以三维联合分布相对应的累积概率(P)作为划分依据, $P>20\%$ 为无旱, $10\%<P\leq20\%$ 为轻旱, $5\%<P\leq10\%$ 为中旱, $2\%<P\leq5\%$ 为重旱, $P\leq2\%$ 为特旱。取金塔河流域年尺度 SPEI、SSI、SRI 和 CDI 的均值,绘制 1983—2017 年共 35 年的干旱指数时间序列曲线,结果如图 4 所示。由图 4 可知,4 种干旱指数随时间的变化趋势基本一致,且 CDI 的序列值小于单变量干旱指数值,表明 CDI 所监测的综合干旱程度偏重。SPEI 最低值出现在 2013 年,为 -1.76 ,其次是 1991、

1990 年;SSI 最低值出现在 1991 年,为 -1.78 ,其次是 2002、1992 年;SRI 最低值出现在 1984 年,为 -1.86 ,其次是 1991、2013 年;CDI 的最低值出现在 1991 年,为 -2.8 ,其次是 2013、1990 年,由此可见,研究时段的干旱年份多集中于 1990、1991 和 2013 年,与王莺等^[30]采用 Z 指数统计的石羊河流域的干旱年份结果类似。据《中国气象灾害大典·甘肃卷》记载,1990 年春夏连旱,干旱持续时间较长;1991 年 6 月中下旬以后持续高温少雨,夏、伏、秋连续干旱,受灾情况严重;1992 年的干旱受 1991 年干旱影响,直到 5 月结束,干旱持续时间较长,危害程度较大。据《石羊河流域水资源公报(2013 年)》记载,2013 年石羊河流域平均降水量比多年平均降水量减少 20.5% ,属于枯水年份。本研究选取 1991 年夏季、1992 年春季以及 2013 年的干旱状况分析 CDI 对综合干旱状况的监测能力,同时分析不同子流域不同时间尺度 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关程度,进一步验证 CDI 的适用性。

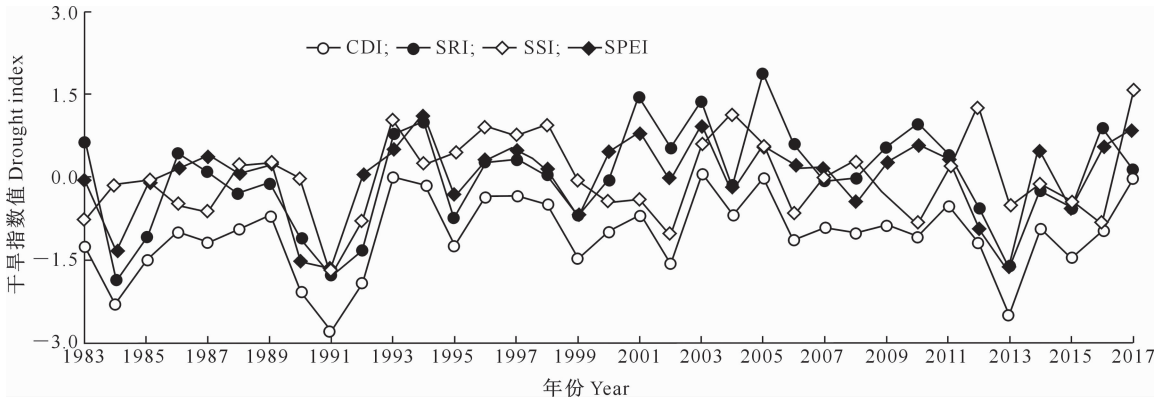


图 4 金塔河流域年尺度 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 时间变化曲线

Fig. 4 Time series of SPEI, SSI, SRI and CDI at annual scale in the Jinta River Basin

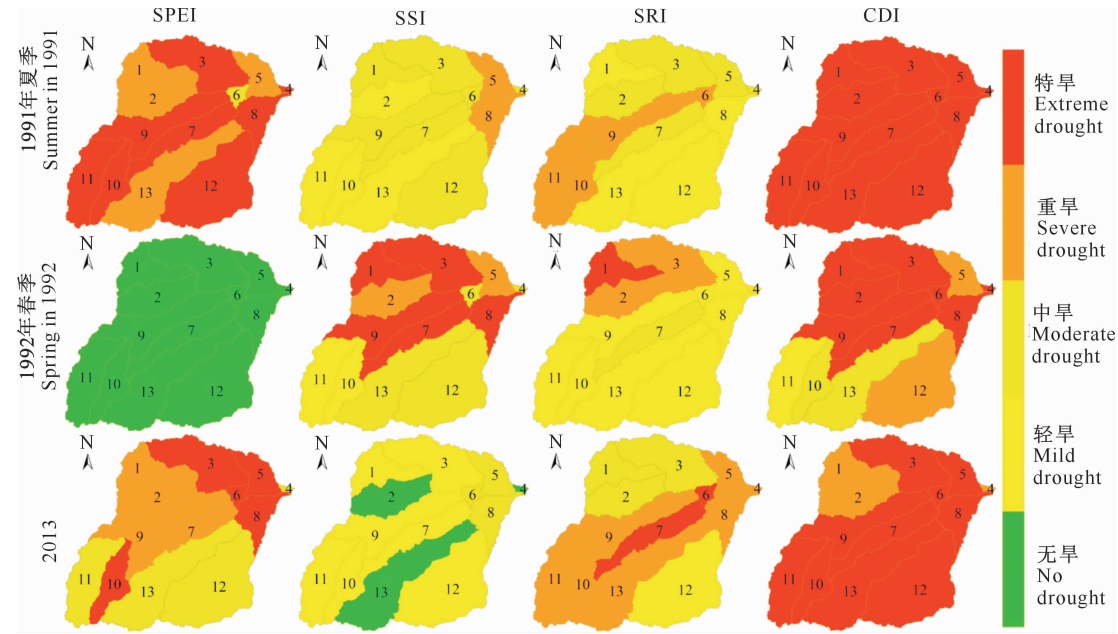
3.2.1 金塔河流域 1991 年夏旱、1992 年春旱及 2013 年干旱特征 图 5 是金塔河流域 1991 年夏季尺度、1992 年春季尺度及 2013 年尺度的 SPEI、SSI、SRI、CDI 所表征的不同类型干旱的干旱程度空间分布。由图 5 可知,1991 年夏季 SPEI 监测到的气象干旱与农业干旱、水文干旱相比更加严重,仅 6 号子流域为轻旱,其余均为重旱或特旱;SSI 监测的流域东部的农业干旱程度要高于流域西部,其中 5 和 8 号子流域均为重旱,2、10、11 和 13 号子流域为轻旱,其余子流域均为中旱;SRI 监测的流域西部的水文干旱程度高于流域东部,其中 6、9、10 和 11 号子流域均为重旱,2、3、4、5 和 7 号子流域为中旱,其余子流域均为轻旱。CDI 所表征的综合干旱在整个流域均达到了特旱等级。1992 年春季农业干旱与水

文干旱程度要重于气象干旱,SPEI 所监测的气象干旱均为无旱,经查阅降雨资料,该地区于 1992 年 5 月份降雨量较大,缓解了当地的干旱状况;SSI 所监测的农业干旱程度流域的北部强于南部,其中 1、3、7、8 和 9 号子流域为特旱,2 和 5 号子流域为重旱;SRI 监测的水文干旱仅 1 号子流域达到了特旱等级,2 和 3 号子流域为重旱;CDI 监测显示仅 11 号为轻旱,10 和 13 号为中旱,5 和 12 号为重旱,其余子流域均为特旱等级。2013 年 SPEI 监测到的气象干旱程度最高,其中 3、5、6、8 和 10 号子流域为特旱等级,1、2、7 和 9 号子流域为重旱,其余子流域均为中旱;SSI 监测到的农业干旱程度较轻,无发生特旱、重旱的子流域,只有 5、6 和 8 号子流域为中旱,其余均为轻旱或无旱;SRI 监测到的水文干旱程度

重于农业干旱,其中 6 和 7 号子流域均为特旱;CDI 表征的综合干旱仅在 1、2 和 4 号子流域为重旱,其余子流域均为特旱。

不同干旱指数在同一区域所表征的干旱程度不同,这表明单变量的干旱指数不能完全反映流域的全部干旱特征,且不同程度的干旱的空间分布也有差别。CDI 表征的干旱程度与单变量干旱指数

SPEI、SSI、SRI 并不完全相同,这是由于三变量联合分布相对应的概率不等于其中任意一个变量分布相对应的概率^[17]。CDI 能监测到 SPEI、SSI 或 SRI 监测不到的干旱区域,表明该指数能够同时表征气象干旱、农业干旱和水文干旱,可从多个角度描述区域的干旱特性。



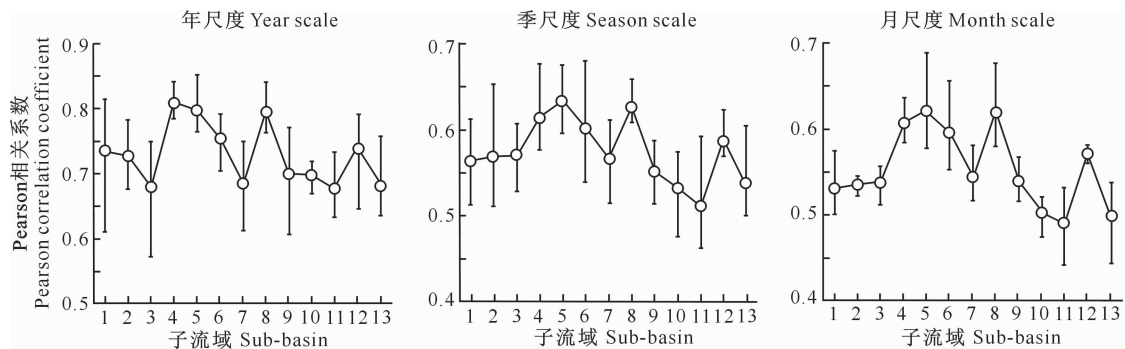
1~13 为子流域编号 1—13 are numbers of sub-basins

图 5 金塔河流域 1991 年夏季、1992 年春季及 2013 年 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的分布

Fig. 5 Distribution of SPEI, SSI, SRI and CDI in the Jinta River Basin in summer 1991, spring 1992 and 2013

3.2.2 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关性 计算各子流域年尺度、季尺度与月尺度的 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的 Pearson 相关系数,结果见图 6。图 6 中,单变量干旱指数 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关系数以区间图的方式展现,并取 3 个相关系数的均值分析不同子流域单变量干旱指数与 CDI 的相关程度,以进一步分析 CDI 的适用性。由图 6 可知,各子流域的相关性均通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,不同时间尺度下 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 均显著相关,说明 CDI 可用于描述研究区域的综合干旱特征。年尺度下单变量干旱指数与 CDI 的相关系数为 0.55~0.85,其中 4、5、6 和 8 号子流域的相关性最强,相关系数均值均在 0.75 以上,以 4 号子流域相关系数均值最大,为 0.81;其次是 1、2、9、10 和 12 号子流域,相关系数均值为 0.70~0.75;其余子流域相关系数均值为 0.65~0.70。季尺度下 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关系数为 0.45~0.70,相关性最强的仍是 4、5、6 和 8 号子流域,相关系数均值均在 0.60 以

上;其次是 1~3 号和 7、9、12 号子流域,相关系数均值在 0.55~0.60;10、11 和 13 号子流域的相关性较低,相关系数均值为 0.50~0.55。月尺度下, SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关系数为 0.45~0.70,相关性最强的子流域分别为 4、5 和 8 号,其相关系数均值均在 0.60 以上;其次是 6 和 12 号子流域,相关系数均值分别为 0.59 和 0.57;1~3 号和 7、9、10 号子流域的相关系数均值为 0.50~0.55;11 和 13 号子流域相关性较低,相关系数均值低于 0.50。综上所述,4、5、6 和 8 号子流域的单变量干旱指数与 CDI 的相关性最强,11 和 13 号子流域的相关性较弱,说明位于流域东北部的 4、5、6 和 8 号子流域的综合干旱对气象干旱、农业干旱、水文干旱的监测能力较强;另外,年尺度的相关性强于季尺度与月尺度,月尺度的相关性最弱,说明年尺度的 CDI 对气象干旱、农业干旱与水文干旱的监测能力强于季尺度与月尺度。



图中所有相关系数均通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验

All correlation coefficients in the figure passed the significance test of $\alpha=0.1$

图 6 金塔河各子流域不同时间尺度下 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的 Pearson 相关系数

Fig. 6 Pearson correlation coefficients of SPEI, SSI, SRI and CDI at different time scales in each sub-basin of the Jinta River Basin

4 结 论

针对 Copula 函数在联合多维变量时存在的“维数灾”现象,采用嵌套 Archimendean 构造方法,基于现有的实测数据以及 SWAT 模型模拟数据,将蒸散发、降雨、土壤湿度、径流等多个干旱要素结合,构建可同时表征气象-农业-水文的综合干旱指数 CDI,并分析该指数的适用性,主要结论如下:

1)构建的金塔河流域水文模型模拟径流的不确定性在可接受的范围内,率定期与验证期的精度指标 R^2 与 E_{NS} 均高于 0.7,说明模型模拟精度达到标准,可用于模拟该流域的蒸散发、土壤湿度、径流等水文要素;敏感性分析表明,与地表径流和融雪径流相关的参数的敏感性较强,与该区域具有冰雪覆盖的地理特征相符。

2)为了研究 CDI 对研究区综合干旱状况的监测效果,选取 1991 年夏季、1992 年春季以及 2013 年全年的干旱状况进行分析,结果发现 CDI 的干旱监测结果与实际干旱事件的发生基本一致,表明该指数可适用于研究区的干旱监测,可为该地区的防旱抗旱提供理论依据。

3)通过对比 CDI 与 SPEI、SSI、SRI 监测到的干旱区域,发现 CDI 能够监测到气象干旱、农业干旱、水文干旱监测不到的干旱区域,表明综合了降雨、蒸散发、土壤湿度与径流等多个干旱变量的综合干旱指数 CDI 能够同时表征气象干旱、农业干旱、水文干旱,可从多个角度描述研究区域的干旱特性。

4)为进一步分析 CDI 的适用性,对比金塔河流域各子流域不同时间尺度 SPEI、SSI、SRI 与 CDI 的相关性,结果表明,流域东北部的综合干旱对气象干旱、农业干旱、水文干旱的监测能力较强,其次是流

域中部与西南部,且年尺度的 CDI 对气象干旱、农业干旱、水文干旱的监测能力强于季和月尺度。

[参考文献]

- [1] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery [J]. Nature, 2017, 548 (7666): 202-205.
- [2] 李 斌,解建仓,胡彦华,等.基于标准化降水指数的陕西省干旱时空变化特征分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (17): 113-119.
Li B, Xie J C, Hu Y H, et al. Analysis on spatiotemporal variability characteristics of drought in Shaanxi Province using standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (17): 113-119.
- [3] 栗晓玲,张更喜,冯 凯.干旱指数研究进展与展望 [J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17 (5): 9-18.
Su X L, Zhang G X, Feng K. Progress and perspective of drought index [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17 (5): 9-18.
- [4] 郭盛明,栗晓玲.黑河流域气象农业综合干旱指数构建及时空特征分析 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (3): 7-15.
Guo S M, Su X L. Construction of meteorological and agricultural comprehensive drought index and analysis on spatial and temporal characteristics in Heihe River basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40 (3): 7-15.
- [5] 栗晓玲,梁 箴.关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 17-23.
Su X L, Liang Z. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Cuanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4): 17-23.
- [6] McKee T B, Doesken N J, Kieist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, Ameri-

- can Meteor Society,1993:179-184.
- [7] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming; the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [8] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 1-7.
- [9] Mishra A K, Ines A V M, Das N N, et al. Anatomy of a local-scale drought: application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 15-29.
- [10] Zhang X, Srinivasan R, Liew M V. On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(8): 955-969.
- [11] Zhang S, Wu Y, Sivakumar B, et al. Climate change-induced drought evolution over the past 50 years in the southern Chinese Loess Plateau [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 122: 1-15.
- [12] Huang S, Huang Q, Leng G, et al. A hybrid index for characterizing drought based on a Nonparametric Kernel Estimator [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55(6): 1377-1389.
- [13] 任 怡, 王义民, 畅建霞, 等. 陕西省水资源供求指数和综合干旱指数及其时空分布 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 137-151.
- Ren Y, Wang Y M, Chang J X, et al. The spatial and temporal distribution of drought in Shaanxi Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 31(1): 137-151.
- [14] 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): 1-13.
- [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.
- Zhang Y, Huang S Z, Huang Q, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 703-714.
- [16] Hao Z, Aghakouchak A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 57: 12-18.
- [17] 李 勤, 张 强, 黄庆忠, 等. 中国气象农业非参数化综合干旱监测及其适用性 [J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 67-80.
- Li Q, Zhang Q, Huang Q Z, et al. Nonparametric integrated agro-meteorological drought monitoring in China: new monitoring technique and applicability [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 67-80.
- [18] Hao Z, Singh V P. Modeling multisite streamflow dependence with maximum entropy copula [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(10): 7139-7143.
- [19] Kao S C, Govindaraju R S. A copula-based joint deficit index for droughts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380: 121-134.
- [20] Hao Z, Singh V P. Drought characterization from a multivariate perspective: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 668-678.
- [21] Tosunoglu F, Gürbüz F, İspirli M N. Multivariate modeling of flood characteristics using Vine copulas [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(19): 1-21.
- [22] 郭泽呈, 魏 伟, 庞素菲, 等. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析: 以石羊河流域为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2558-2572.
- Guo Z C, Wei W, Pang S F, et al. Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river based on SPCA and remote sensing index: a case study on the Shiyang river basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2558-2572.
- [23] 吴 佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [24] Wu J, Gao X, Giorgi F, et al. Changes of effective temperature and cold/hot days in late decades over China based on a high resolution gridded observation dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 788-800.
- [25] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia) [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(8/9/10): 497-507.
- [26] 田 辉. 基于 SWAT 与 Visual Modflow 的海伦市水资源模拟与合理配置研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Tian H. Research on water resources simulation and reasonable allocation of Hailun City based on SWAT and Visual Modflow [D]. Changchun: Jinlin University, 2020.
- [27] 艾启阳, 栗晓玲, 张更喜, 等. 标准化地下水指数法分析黑河中游地下水时空演变规律 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 69-74.
- Ai Q Y, Su X L, Zhang G X, et al. Construction standardized groundwater index to analyze temporal-spatial evolution of groundwater in middle reaches of Heihe river [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 69-74.
- [28] Aas K, Berg D. Models for construction of multivariate dependence: a comparison study [J]. *The European Journal of Finance*, 2009, 15(7/8): 639-659.
- [29] Guo J, Su X. Parameter sensitivity analysis of SWAT model for streamflow simulation with multisource precipitation datasets [J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(3): 861-877.
- [30] 王 莺, 赵福年, 姚玉璧, 等. 基于 Z 指数的石羊河流域干旱特征分析 [J]. *灾害学*, 2013, 28(2): 100-106.
- Wang Y, Zhao F N, Yao Y B, et al. Analysis on drought characteristics of Shiyang river basin based on Z index [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(2): 100-106.