

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.006

寒区农业流域综合干旱指数构建及其适用性分析

邢贞相^{1,2}, 李根¹, 付强^{1,2}, 王嘉麒¹, 段维义¹, 王红利¹, 刘昊奇¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:以挠力河流域为寒区农业流域典型区,构建融合多源信息的综合干旱指数用于寒区农业流域干旱特征的评估,并分析其适用性。基于构建的 SWAT 模型模拟挠力河流域水文气象要素,计算单一的标准化降水蒸散发指数(SPEI)、标准化土壤湿度指数(SSI)和标准化径流指数(SRI),运用主成分分析法和熵权法分别对3种单一干旱指数赋权,通过最小偏差法计算最优组合权重,构建融合气象干旱、农业干旱和水文干旱信息的综合干旱指数(OCDI)。结果表明:OCDI的干旱事件监测结果与历史干旱事件吻合度较高,综合考虑多时间尺度下的OCDI对于挠力河流域干旱状况描述更为准确和全面;3种单一干旱指数监测的干旱程度空间分布差异明显,融合多源信息的OCDI能够从气象干旱、农业干旱和水文干旱多角度揭示挠力河流域综合干旱特征;OCDI与不同类型单一干旱指数均有较高的相关性,在挠力河流域上游对于干旱的综合表征能力更优且年尺度的OCDI综合表征能力优于季尺度和月尺度;OCDI能够较好地识别和区分该流域的综合干旱程度,随着OCDI所识别综合干旱程度的加重,流域实际受旱面积相应增大。

关键词:SWAT模型;最优组合权重;综合干旱指数;寒区农业流域;挠力河流域

中图分类号:S423 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0042-10

Construction of an optimized comprehensive drought index for agricultural watersheds in cold regions and its applicability analysis// XING Zhenxiang^{1,2}, LI Gen¹, FU Qiang^{1,2}, WANG Jiaqi¹, DUAN Weiyi¹, WANG Hongli¹, LIU Haoqi¹ (1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Water Resources Efficient Utilization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeastern Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Taking the Naoli River Basin as a typical agricultural watershed in cold regions, a comprehensive drought index integrating multi-source information was constructed to evaluate the drought characteristics of agricultural watersheds in cold regions, and its applicability was analyzed. Based on the constructed SWAT model, the hydrological and meteorological elements of the Naoli River Basin were simulated, and the single standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), standardized soil moisture index (SSI) and standardized runoff index (SRI) were calculated. The principal component analysis method and entropy weight method were used to weight three single drought indexes, and the optimal combination weights were calculated using the minimum deviation method to construct an optimized comprehensive drought index (OCDI) that integrates meteorological drought, agricultural drought, and hydrological drought information. The results show that the monitoring results of drought events by OCDI are highly consistent with historical drought events, and considering multiple time scales, OCDI is more accurate and comprehensive in describing the drought situation in the Naoli River Basin. The spatial distribution differences of drought severity monitored by three single drought indices are significant. OCDI, which integrates multi-source information, can reveal the comprehensive drought characteristics of the Naoli River Basin from multiple perspectives of meteorological drought, agricultural drought, and hydrological drought. OCDI has a high correlation with different types of single drought indexes. In the upstream of the Naoli River Basin, OCDI has better comprehensive characterization ability for drought, and comprehensive characterization ability of the annual scale

基金项目:国家自然科学基金项目(51979038,51825901);黑龙江省自然科学基金项目(E2015024)

作者简介:邢贞相(1976—),男,教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:zxing@neau.edu.cn

通信作者:付强(1973—),男,教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:fuqiangneau@126.com

OCDI is better than the seasonal and monthly scales. OCDI can better identify and distinguish the comprehensive drought degree of the basin. With the increase of the comprehensive drought degree identified by OCDI, the actual drought affected area in the basin increases accordingly.

Key words: SWAT model; optimal combination weight; optimized comprehensive drought index; agricultural watershed in cold regions; Naoli River Basin

干旱是一种频次高、危害深、持续时间长的复杂自然灾害,近年来我国遭受干旱灾害所造成的损失占气象灾害的一半以上,严重威胁国家粮食与生态安全并阻碍社会经济发展^[1-2]。干旱指数的构建作为旱情研究的基础,可为旱情的监测、分析、评价等提供重要依据^[3],因此干旱指数研究对干旱的监测与评估具有重要的理论价值和现实意义。干旱类型通常包括气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱,相应地利用不同类型的干旱指数^[4-5]进行表征。例如:Zhang 等^[6]采用表征气象干旱的标准化降水蒸发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)研究了 1961—2015 年中国极端干旱事件在年代尺度、年尺度和季节尺度上的时空变化;郑崙珍等^[7]采用表征水文干旱的标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)分析了环境变化下荆南三口河系 1956—2017 年水文干旱的演变特征,并探讨了气候变化因素和人类活动对于水文干旱的影响;杨文静等^[8]通过土壤含水量数据构建表征农业干旱的标准化土壤湿度指数(standardized soil moisture index, SSI),分析了 2002—2019 年滦河流域干旱时空分布的变化规律并依据该指数对农业干旱进行了定量评价;Manzano 等^[9]利用 SPEI 表征气象干旱,分析了大气环流模式对于伊比利亚半岛气象干旱事件的影响;Kuabiak 等^[10]以波兰西北部湖区为例,运用 SRI 和 SPEI 探讨了气象干旱与水文干旱之间的关系;Kwon 等^[11]利用 SSI 和 SPEI 研究韩国地区 1986—2016 年农业干旱和气象干旱的时空特征及其相互关系。干旱是在气象水文等多种致旱因子共同影响下的复杂灾害过程^[12],Zargar 等^[13]对常用于干旱研究的 74 种干旱指数进行了总结并阐述其研究方向,指出单一干旱指数往往只考虑到单一干旱类型的影响因素,难以全面描述干旱事件特征。近年来,构建融合多源信息的综合干旱指数一直是干旱研究的热点问题之一^[14]。当前构建融合多源信息综合干旱指数的方法有机器学习法、多变量联合分布法和基于权重组合的方法^[15]。机器学习法基于样本模糊数据进行训练,对于模型算法和参数合理性要求高,外延性较差,多适应于特定区域^[16];多变量联合分布法在综合较多单一干旱指数时,指数间复杂的依存关系使得多元分布估计与多

维相关性建模难度偏大^[15,17];基于权重组合的方法通过多个单一干旱指数的加权构建综合干旱指数,通过权重描述不同干旱指数对综合干旱的贡献,从而实现干旱的综合评价,但不同方法得到的权重组合不尽相同,又难以判别不同权重组合的优劣。为此,本文通过最小偏差法对不同权重组合进行加权,求解最优的权重组合,并将其命名为最优组合权重。利用主成分分析法和熵权法分别依据不同单一干旱指数的主成分方差贡献率和变异程度对相应单一干旱指数赋权,具有较强数学理论基础,被广泛应用于干旱研究^[18-20],故本文采用这两种方法计算多种单一干旱指数的权重组合。

寒区农业流域因气象条件、土壤湿度、径流条件、农业耕作的季节性显著异于温热地区,冬季严寒、封冻、积雪,春季低温、大风、少雨,干旱特征独特。寒区农业流域旱情发生时往往不止一种干旱类型,现有研究中多采用单一干旱指数进行干旱识别监测,难以全面表征流域内的综合干旱特征。因此,本文以挠力河流域作为寒区农业流域典型区,构建基于最优组合权重的综合干旱指数(optimized comprehensive drought index, OCDI)研究挠力河流域的综合干旱特征并分析该指数在流域干旱监测中的适用性,旨在通过融合气象、农业和水文多角度干旱信息的 OCDI 识别寒区农业流域综合干旱的干旱强度、持续时间、空间分布等干旱特征,以期防旱抗旱工作提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

挠力河为乌苏里江的一级支流,发源于完达山脉北麓(七里嘎山南坡),干流由西南流向东北方向,流经黑龙江省七台河市、宝清县、富锦市,于双鸭山市饶河县东部注入乌苏里江左岸,全长 596 km,主要支流有七星河、外七星河、蛤蟆通河、奇尔沁河、大索伦河等。该流域地处三江平原腹地,流域面积 23 100 km²,介于东经 131°31′~134°10′、北纬 45°43′~47°45′之间^[21],地势整体呈现西南高东北低。流域属于寒温带大陆性季风气候,年平均气温 2.3~3.4℃,流域多年平均蒸发量 1 417.9 mm,多年平均降水量 535 mm,流域降雨多集中在 6—9 月,占全年

降水量 70% 以上,春季气候干燥,降水偏少,占全年降水量的 23% 左右^[22]。挠力河流域概况与水文、气象站点分布见图 1。

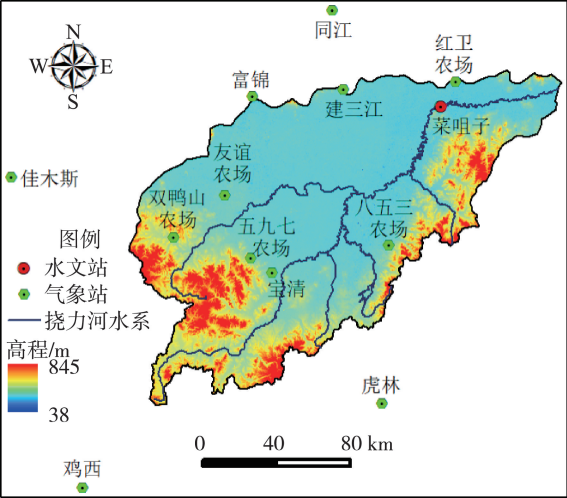


图 1 挠力河流域概况

Fig. 1 Overview of the Naoli River Basin

1.2 数据来源

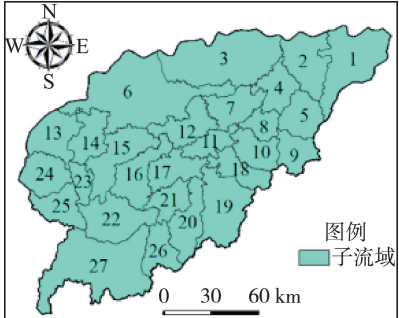
构建 SWAT(soil and water assessment tool)模型的输入资料包括数字高程 (DEM)、土地利用类型、土壤类型和气象水文等数据^[23],其中 DEM 来自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 90 m×90 m;土地利用类型数据来自中国科学院资源科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 2020 年中国土地利用遥感监测数据;土壤类型数据来自世界粮农组织 (FAO)、维也纳国际应用研究所 (IIASA)、中国科学院土壤科学研究所 (ISSCAS) 和欧盟委员会联合研究中心 (JRC) 等合作构建的 HWSD (Harmonized World Soil Database) (<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/en/>),比例尺为 1:100 万;气象数据包括日降水量、日最高最低气温、日照时数、风速和相对湿度,时间为 1967—2017 年,来自中国气象数据共享服务网 (<http://www.data.cma.cn/>) 和黑龙江省农垦气象统计资料的站点实测数据;水文数据为挠力河流域菜咀子水文站 1967—2017 年的月径流数据,摘录于《中华人民共和国水文年鉴》。

2 研究方法

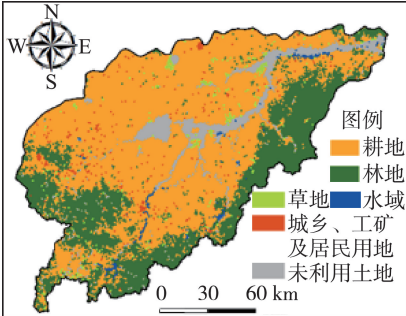
2.1 SWAT 模型构建

SWAT 模型^[24] 基于研究区 DEM 数据将整个流域划分为若干个子流域,子流域是基于不同土壤类型、土地利用类型和坡度等特定下垫面性质的最小水文响应单元。SWAT 模型构建主要包括划分子流域、建立土地利用数据库和土壤数据库、构建天气发

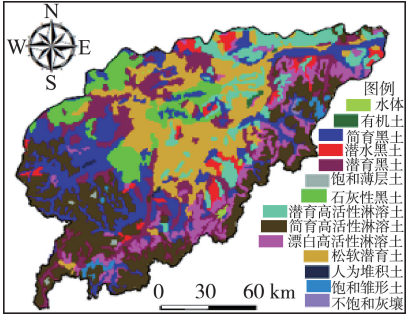
生器。栅格数据投影坐标系统一设置为 Beijing_1954_3_Degree_GK_CM_135E。利用挠力河流域的 DEM 数据进行汇流分析以及河网定义和提取,确定流域面积和边界,通过 Burn in 功能导入河流水系矢量图并设置最小集水面积阈值进行子流域划分,如图 2(a)所示,将挠力河流域划分 27 个子流域。挠力河流域土地利用类型和土壤类型分别如图 2(b)和图 2(c)所示,重分类为 6 种土地利用类型和 14 种土壤类型。基于 1967—2017 年气象站点实测数据,计算月平均最低与最高气温、最低与最高气温标准偏差、月平均降水量、月平均降雨天数、降水量标准偏差、降雨偏态系数、月内干日日数、月内湿日日数、露点温度、月平均太阳辐射量和月平均风速等数据,将其整合到 SWAT 模型中的气象数据库 userwegn 中,用于构建天气发生器。为避免水文响



(a) 子流域



(b) 土地利用类型



(c) 土壤类型

图 2 挠力河流域子流域划分及土地利用类型和土壤类型分布

Fig. 2 Subwatershed division and distribution of land use types and soil type in the Naoli River Basin

应单元划分数数据量过大造成模型数据运算结果的冗余,设置阈值将细小单元的土地利用类型、土壤类型和坡度归置到附近相似类型中。本文土地利用类型、土壤类型及坡度的阈值分别设置为 10%、5%、10%,将研究区共划分为 1500 个水文响应单元。

2.2 模型参数率定

为提高模型模拟精度并确定参数最优值,使用 SWAT-CUP 软件的 SUFI-2 算法进行参数敏感性分析和模型不确定性分析。SUFI-2 算法通过 t 值和 p 值来判断参数的敏感性大小, t 值表征敏感性的程度,绝对值越大越敏感, p 值表征敏感性的显著性,值越接近于 0 越显著。参数不确定性的校准优异程度利用 P 因子接近 1 和 R 因子接近 0 的程度来衡量,对于径流模拟的参数率定通常建议 P 因子大于 0.7 且 R 因子小于 1.5^[25-26]。选用决定系数(R^2)和 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{NS})来评价模型的模拟精度, R^2 越接近于 1 表示模拟值与实测值拟合越好,一般认为 $R^2 > 0.6$ 时的模拟效果较好; $E_{NS} \geq 0.75$ 时,模拟效果好; $0.36 \leq E_{NS} < 0.75$ 时,模拟效果令人满意; $E_{NS} < 0.36$ 时,模拟效果不好^[21]。

2.3 综合干旱指数构建

利用 SWAT 模型模拟得到各子流域研究期内的降水量、潜在蒸发量、土壤含水量和径流量数据,为单一干旱指数的计算提供基础^[27]。利用 SPEI、SSI、SRI 分别表征气象干旱、农业干旱和水文干旱,3 种单一干旱指数的计算方法详见文献^[28-30]。由于 3 种干旱指标分别包含了不同类型的干旱成因信息,运用主成分分析法和熵权法来确定权重组合,计算方法详见文献^[20,31]。进而基于最小偏差法计算主成分分析法和熵权法的最优组合权重,求解综合干旱指数,以表征流域的综合干旱特征。

2.3.1 基于最小偏差法的最优组合权重

假设决策者运用了 h 种方法对指标进行赋权,在基于最小偏差法进行权重组合时,相应权重向量为

$$\mathbf{w}_{E_k} = (w_{E_{k1}}, w_{E_{k2}}, \dots, w_{E_{km}})^T \quad (k = 1, 2, \dots, h) \quad (1)$$

$$\mathbf{w}_G = (w_{G1}, w_{G2}, \dots, w_{Gh})^T \quad (2)$$

其中 $\sum_{i=1}^m w_{E_{ki}} = 1$ $\sum_{k=1}^h w_{Gk} = 1$

式中: $\mathbf{w}_{E_k}$ 为第 k 种方法的单一干旱指数权重向量; h 为赋权方法总数; m 为干旱指数个数; w_{Gk} 为第 k 种赋权方法的权重。

为使优化组合后的指标权重能够与不同赋权方法求解所得的权重偏差最小,构建单目标优化模型^[32],公式为

$$\min P = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^h \sum_{i=1}^m (w_{Gk} w_{E_{ki}} - w_{Gj} w_{E_{ij}})^2 \quad (3)$$

构造相对应的拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{w}_G, \lambda) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^h \sum_{i=1}^m (w_{Gk} w_{E_{ki}} - w_{Gj} w_{E_{ij}})^2 + \lambda \left[\sum_{k=1}^h (w_{Gk} - 1) \right] \quad (4)$$

式中 λ 为拉格朗日算子。求导后得方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\mathbf{w}_G, \lambda)}{\partial w_{Gk}} = h w_{Gk} \sum_{i=1}^m w_{E_{ki}}^2 - w_{G1} \sum_{i=1}^m w_{E_{1i}} w_{E_{ki}} - \\ w_{G2} \sum_{i=1}^m w_{E_{2i}} w_{E_{ki}} - \dots - w_{Gh} \sum_{i=1}^m w_{E_{hi}} w_{E_{ki}} + \frac{\lambda}{2} = 0 \quad (5) \\ \frac{\partial L(\mathbf{w}_G, \lambda)}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^h (w_{Gk} - 1) = 0 \end{cases}$$

上述方程组包括 $h+1$ 个未知数、 $h+1$ 个方程,由克莱姆法则可知其有唯一非零解,求得 $\mathbf{w}_G^* = (w_1, w_2, \dots, w_h)^T$ 即为 h 种赋权方法的最优权重向量。则最优组合权重 w_B 和 OCDI 的计算公式为

$$w_{BXY} = \alpha_{XY} w_{GXY} + \beta_{XY} w_{GXY} \quad (X = 1, 2, 3; Y = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

$$I_{OCDY} = w_{BY1} I_{SP} + w_{BY2} I_{SS} + w_{BY3} I_{SR} \quad (7)$$

式中: α β 分别为主成分分析法和熵权法所赋权重; I_{OCD} 为 IOCD 值; I_{SP} 为 SPEI 值; I_{SS} 为 SSI 值; I_{SR} 为 SRI 值。 $X = 1, 2, 3$ 分别代表 SPEI、SSI 和 SRI; $Y = 1, 2, 3, 4$ 分别代表月尺度、春季尺度、夏季尺度和年尺度。

2.3.2 干旱指标等级划分

为便于综合干旱指数与单一干旱指数之间进行对比分析,将 OCDI 进行 $-2.5 \sim 2.5$ 的归一化处理^[20]:

$$I'_{OCD} = -2.5 + 2 \frac{I_{OCDmax} - I_{OCD}}{I_{OCDmax} - I_{OCDmin}} \quad (8)$$

式中: I'_{OCD} 为归一化处理后的 OCDI 值; I_{OCDmax} 、 I_{OCDmin} 分别为原始 OCDI 中的最大值和最小值。

依据 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》对 SPEI、SSI 和 SRI 3 种单一干旱指数进行干旱等级划分,综合干旱指数的干旱等级划分参照植被条件指数(vegetation condition index, VIC)划分标准^[33],结果见表 1。

表 1 干旱等级划分标准

干旱等级	单一干旱指数	综合干旱指数
无旱	> -0.5	$> -0.5 \sim 2.5$
轻旱	$> -1.0 \sim -0.5$	$> -1.0 \sim -0.5$
中旱	$> -1.5 \sim -1.0$	$> -1.5 \sim -1.0$
重旱	$> -2.0 \sim -1.5$	$> -2.0 \sim -1.5$
特旱	≤ -2.0	$> -2.5 \sim -2.0$

2.4 游程理论

游程理论可识别干旱事件的特征变量^[34],包括干旱历时 D 、干旱烈度 S 和干旱烈度峰值 M 等。图3为干旱识别的游程概念图,具体干旱识别过程分3步:①设定3个干旱指标阈值 R_0 、 R_1 和 R_2 ,当干旱指数小于 R_1 时则初步判定该时间段发生干旱;②剔除非干旱事件,步骤①初步判定的干旱事件中,若某次干旱事件的干旱历时仅为1个时间段且干旱指数小于 R_2 ,则剔除此次干旱事件(事件 a),反之则保留此次干旱事件(事件 b);③合并干旱事件,若两次相邻干旱事件之间的时间间隔仅为1个时间段,并且间隔时间段的干旱指数小于 R_0 ,则将两次干旱事件合并为一次干旱事件(事件 c、d),干旱历时 $D = D_c + D_d + 1$,干旱烈度 $S = S_c + S_d$,反之则判定为两次独立的干旱事件(事件 e、f)。依据干旱等级划分标准,本文分别设定干旱指标阈值 $R_0 = 0$ 、 $R_1 = -0.5$ 、 $R_2 = -1$ 。

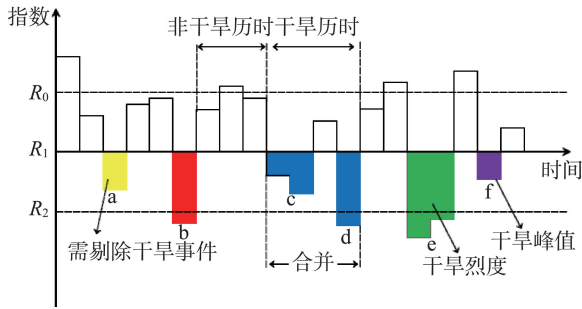


图3 游程理论概念

Fig.3 Conceptual diagram of travel theory

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型的率定与验证

设置预热期为 1967—1971 年,率定期和验证期分别为 1972—2001 年、2002—2017 年。利用 SWAT-CUP 中 SUFI-2 算法对 SWAT 模型参数进行全局敏感性分析^[21],对 23 个与径流相关的参数进行率定,最终确定各参数的敏感性与最优参数值,敏感性排名前 7 位参数见表 2。由表 2 可见,直接决定流域径流量大小的 SCS 径流曲线数最为敏感,其次是最大冠层截留量、平均坡长和土壤饱和导水率,基流系数、土壤湿容重、土壤有效含水率属较为敏感的范畴,其他参数的敏感性相对较弱,本研究中不予考虑。

图 4 为率定期和验证期内 SWAT 模型月径流模拟值与实测值的对比,可见月径流过程拟合良好。此外,率定期内 P 因子和 R 因子分别为 0.93、1.28, R^2 和 E_{NS} 分别为 0.89、0.73;验证期内 P 因子和 R 因子分别为 0.85、1.36, R^2 和 E_{NS} 分别为 0.87、

表 2 SWAT 模型参数敏感性排序及最优值

Table 2 Sensitivity ranking and optimal values of SWAT model parameters

参数	物理含义	单位	初始范围	最优值	p 值	t 值
CN2	SCS 径流曲线数		35 ~ 98	82.40	0	19.29
CANMX	最大冠层截留量	mm	0 ~ 100	40.82	0	-17.83
SLSUBBSN	平均坡长	m	10 ~ 150	88.75	0	14.84
SOL_K	土壤饱和导水率	m/h	0 ~ 2000	279.09	0	-12.02
ALPHA_BF	基流系数		0 ~ 1	0.15	0	-11.05
SOL_BD	土壤湿容重	g/cm ³	0.9 ~ 2.5	1.93	0	-10.21
SOL_AWC	土壤有效含水率	mm/mm	0 ~ 1	0.49	0	7.75

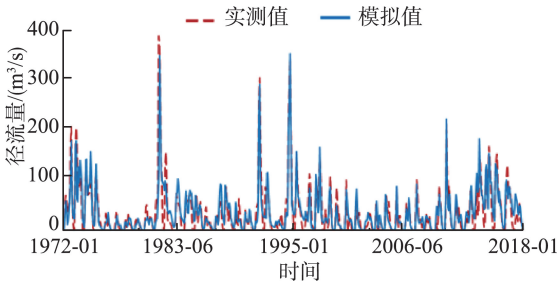


图4 SWAT 模型月径流量模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison of monthly runoff between values simulated by SWAT model and measured values

0.70。率定期和验证期内 P 因子和 R 因子均满足精度要求^[25-26],表明模型径流模拟的不确定性较小并均在可接受的范围之内; R^2 和 E_{NS} 均大于 0.7,表明模型径流模拟的效果令人满意^[21]。因此,经参数率定后的 SWAT 模型可用于该流域的水文过程模拟。

3.2 OCDI 适用性分析

季尺度干旱指数分别是基于本月及前 2 月的致旱因子数据计算得到,因此每年 2 月、5 月、8 月、11 月的季尺度干旱指数可分别代表冬季、春季、夏季和秋季的干旱指数。挠力河流域地处黑龙江寒区农业地带,旱灾多为春旱与伏旱^[35],因此选取月尺度、春季尺度、夏季尺度和年尺度进行干旱分析。

3.2.1 时间尺度上 OCDI 适用性

分别计算挠力河流域月尺度、春季尺度、夏季尺度和年尺度的 OCDI 值,并与不同时间尺度下的 SPEI 值、SSI 值、SRI 值进行比较。1967—2017 年不同尺度下 4 种干旱指数的变化见图 5。总体而言,挠力河流域不同时间尺度下 3 个单一干旱指数与 OCDI 随时间的变化趋势基本一致,且当同一干旱事件中多种类型干旱叠加时,OCDI 相较于单一干旱指数所监测到干旱程度偏重,表明 OCDI 能够对挠力

河流域多种单一类型干旱叠加的状态进行综合表征,对于综合干旱状况的监测与评估具有良好的适用性。

由图 5 可见,年尺度 OCDI 最低值出现在 1977 年,2000 年后春季尺度和夏季尺度 OCDI 最低值分别出现在 2009 年春季和 2001 年夏季,结合《中国气象灾害大典·黑龙江卷》^[35] 对于典型干旱事件描述可知,黑龙江东部地区 1976—1979 年连续发生了严重的干旱灾害,且 1977 年全省出现严重旱情,范围

大、危害广、历史少见,东部挠力河流域尤为严重;2001 年和 2009 年挠力河流域分别遭遇伏旱和春旱灾害。因此,选取 2009 年春季、2001 年夏季、1977 全年 3 场具有代表性的干旱事件运用游程理论识别不同时间尺度下干旱事件的平均干旱烈度峰值与平均干旱历时。结合图 5 和表 3 可知,由于实际干旱事件持续时间较长,可能会长达数月或更长,但月尺度下干旱指数仅对干旱历时较短的干旱事件监测效果较好,未能充分考虑到农业干旱、水文干旱对于气

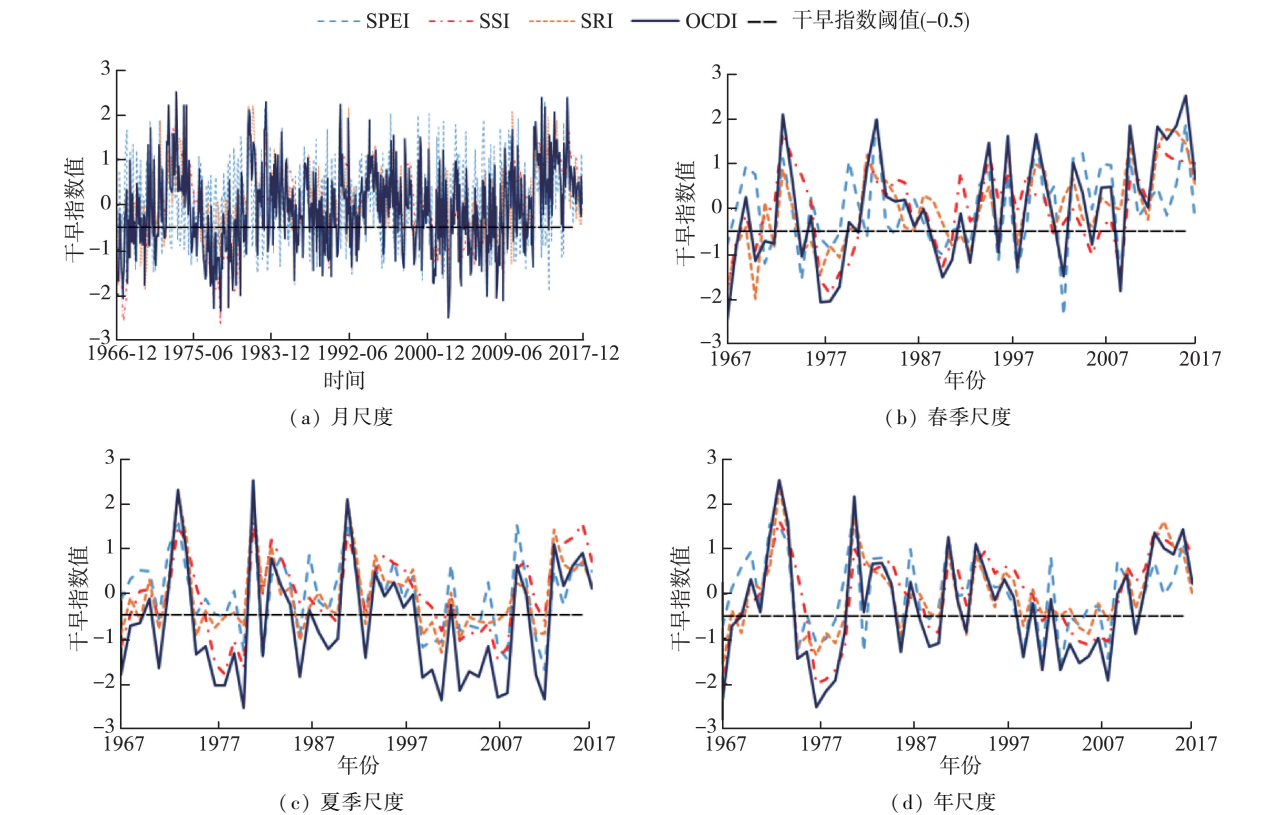


图 5 1967—2017 年挠力河流域不同时间尺度下 SPEI、SSI、SRI 与 OCDI 变化

Fig. 5 Change of SPEI, SSI, SRI and OCDI at different time scales in the Naoli River Basin from 1967 to 2017

表 3 挠力河流域典型干旱识别

Table 3 Typical drought identification in the Naoli River Basin

尺度	2009 年春季			2001 年夏季			1977 全年		
	干旱指数	平均干旱烈度峰值	平均历时/月	干旱指数	平均干旱烈度峰值	平均历时/月	干旱指数	平均干旱烈度峰值	平均历时/月
月	SPEI-1	-1.20	2	SPEI-1	-1.01	1	SPEI-1	-1.04	3
	SSI-1	-1.45	3	SSI-1	-0.66	1	SSI-1	-1.56	6
	SRI-1	-0.99	1	SRI-1	-0.96	3	SRI-1	-0.98	4
	OCDI-1	-1.14	3	OCDI-1	-1.11	3	OCDI-1	-1.35	6
季	SPEI-3	-1.59	3	SPEI-3	-1.06	3	SPEI-3	-0.74	9
	SSI-3	-1.49	3	SSI-3	-0.81	3	SSI-3	-1.60	12
	SRI-3	-0.51	3	SRI-3	-1.28	3	SRI-3	-0.94	12
	OCDI-3	-1.82	3	OCDI-3	-2.34	3	OCDI-3	-2.10	12
年	SPEI-12			SPEI-12			SPEI-12	-1.10	12
	SSI-12			SSI-12			SSI-12	-1.99	12
	SRI-12			SRI-12			SRI-12	-1.36	12
	OCDI-12			OCDI-12			OCDI-12	-2.50	12

象干旱的时滞性,导致月尺度干旱指数随时间波动性较大且部分月份 OCDI 对于干旱事件所监测的干旱程度偏低。而在季尺度和年尺度下,OCDI 虽然能够更好地监测和表征干旱事件,但是不能够描述出干旱事件中旱情发展过程。因此,结合月尺度、季尺度和年尺度下的 OCDI 值综合分析流域干旱事件信息更为全面。

3.2.2 空间尺度上 OCDI 适用性

选取 1979 年 5 月、2009 年春季、2001 年夏季和 1977 年全年 4 场不同时间尺度下的典型干旱事件分析 OCDI 在挠力河流域空间尺度上的适用性。图 6 为挠力河流域典型干旱事件的干旱程度空间分布(图中 SPEI-1 表示 1 月尺度的 SPEI 值,以此类推)。由图 6 可见,不同单一干旱指数在同一子流域所表征的干旱程度不同且不同干旱程度在整个流域上的空间分布也具有明显差异。以 13 号子流域为例:对于 1979 年 5 月的典型干旱事件,SPEI 所表征的气象干旱程度为无旱,SSI 所表征的农业干旱程度为特旱,SRI 所表征的水文干旱程度为重旱,OCDI 所表征的综合干旱程度为特旱;对于 2001 年夏季的典

型干旱事件,SPEI 所表征的气象干旱程度为重旱,SSI 所表征的农业干旱程度为中旱,SRI 所表征的水文干旱程度为中旱,OCDI 所表征的综合干旱程度为特旱。与资料对比可知,在 13 号子流域,OCDI 表征的干旱程度最符合实际情况。同样地,在其他子流域,OCDI 也能够很好地表征子流域综合干旱程度进而准确地反映流域整体综合干旱状况,而单一干旱指数仅能反映其所对应的干旱类型,难以表征多种类型干旱叠加时的干旱程度。可见,仅靠单一干旱指数难以准确地反映流域的综合干旱信息,而 OCDI 作为充分考虑了降雨、蒸散发、土壤湿度和径流多方面致旱因子信息的综合干旱指数,能够从气象、农业、水文多角度监测干旱的发生、持续、结束等状态,对于干旱事件的监测更加准确和全面。

3.2.3 单一干旱指数与 OCDI 的相关性

选取各子流域在月尺度、春季尺度、夏季尺度和年尺度下的 SPEI 值、SSI 值、SRI 值和 OCDI 值,利用 SPSS 软件中 Pearson 相关系数法计算不同时间尺度下不同子流域的 SPEI、SSI、SRI 分别与 OCDI 的 Pearson 相关系数,通过子流域上述 3 个相关系数的

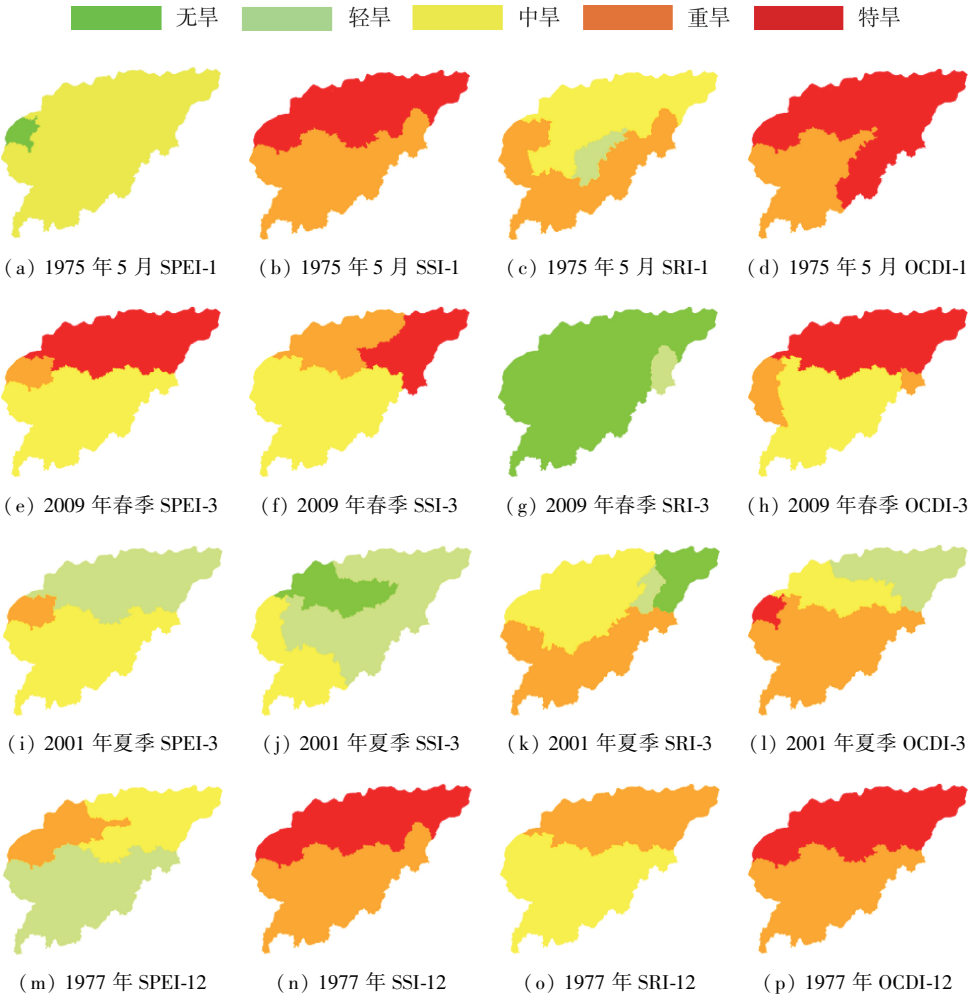


图 6 挠力河流域典型干旱事件的干旱程度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought degree of typical drought events in the Naoli River Basin

均值来表征单一干旱指数与 OCDI 的相关性,子流域相关性分布情况见表 4,区间图如图 7 所示。由图 7 可见,不同时间尺度下所有子流域单一干旱指数与 OCDI 的相关系数均在 0.6 以上(通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验),表明不同单一干旱指数与 OCDI 之间均呈现显著相关关系,证明了综合干旱指数 OCDI 能够综合考虑气象、农业和水文 3 种干旱类型信息从而描述研究区域的综合干旱特征。此外,由表 4 可见,位于挠力河上游地区的 22 号、24~27 号子流域的单一干旱指数与 OCDI 相关性较强,位于挠力河中下游地区的 12 号、11 号、8 号、4 号和 1 号子流域的单一干旱指数与 OCDI 相关性较弱,说明位于流域上游地区子流域的 OCDI 对于气象干旱、农业干旱和水文干旱的信息监测能力强于中上游地区。此外,年尺度下单一干旱指数与 OCDI 的相关性明显强于春季尺度、夏季尺度和月尺度,说明年尺度下 OCDI 对于气象干旱、农业干旱和水文干旱的信息监测能力强于季尺度和月尺度,适用性更高。

表 4 挠力河子流域相关性分布情况

Table 4 Distribution of correlation in Naoli River sub-basins

时间尺度	前 5 子流域	后 5 子流域
月	22, 24, 25, 26, 27	12, 4, 11, 8, 13
春季	5, 22, 24, 25, 26	4, 12, 11, 1, 17
夏季	22, 25, 24, 9, 27	12, 4, 1, 8, 11
全年	22, 25, 24, 9, 27	12, 11, 16, 4, 17

3.2.4 历史受旱面积与相应 OCDI 指数对比

为进一步验证 OCDI 的适用性,收集已有的挠力河流域 1986—1992 年旱灾受灾面积数据,分析

OCDI 所识别干旱程度的准确性。挠力河流域历史各年受旱面积与相应年份 OCDI 所识别综合干旱程度见表 5。由表 5 可见,对于 1986 年、1989 年和 1990 年,OCDI 识别为中旱,挠力河流域实际受旱面积为 703~1 780 km²;对于 1988 年,OCDI 识别为轻旱,其受旱面积为 547 km²,受灾面积小于中旱年份的实际受旱面积;对于 1987 年、1991 年和 1992 年,OCDI 识别为无旱年份,其受旱面积为 20~25 km²,远小于上述中旱、轻旱年份的实际受旱面积。随着 OCDI 所识别的综合干旱等级的加重,挠力河流域实际受旱面积也在相应增加,可见,OCDI 能够较好地识别和区分该流域的综合干旱程度,这也进一步验证了 OCDI 对于挠力河流域综合干旱状况的识别具有良好的适用性。此外,由于已收集到挠力河流域受旱面积数据的年份仅有 1986—1992 年,上述年份中 OCDI 所识别的干旱程度并无特旱、重旱,对于

表 5 挠力河流域历史受旱面积与 OCDI 识别的综合干旱程度

Table 5 Historical drought affected area and comprehensive drought degree identified by OCDI in the Naoli River Basin

年份	OCDI 值	综合干旱等级	受灾面积/km ²
1986	-1.28	中旱	1 780
1987	0.25	无旱	23
1988	-0.56	轻旱	546
1989	-1.17	中旱	996
1990	-1.09	中旱	703
1991	1.24	无旱	20
1992	-0.17	无旱	25

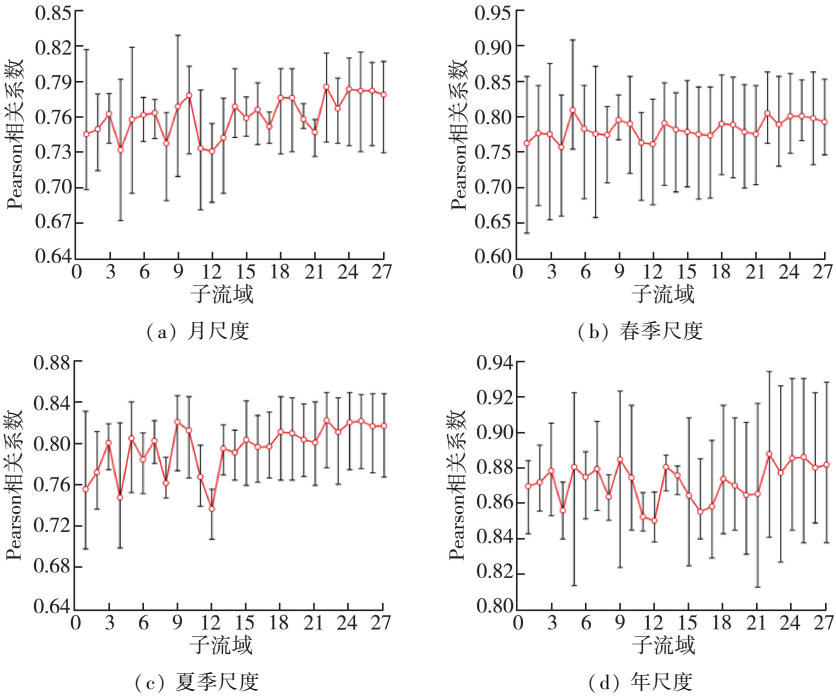


图 7 单一干旱指数与 OCDI 的 Pearson 相关系数统计区间

Fig.7 Statistical interval of Pearson correlation coefficients between single drought indexes and OCDI

OCDI 识别流域的特旱与重旱的准确程度有待进一步探究。

4 结 论

a. 所构建的挠力河流域 SWAT 模型径流模拟结果与实测径流吻合度较好,率定期和验证期的模拟精度指标 R^2 和 E_{ns} 分别为 0.89 和 0.73、0.87 和 0.70,达到了令人满意的模拟效果;不确定性分析指标均满足 P 因子大于 0.7 且 R 因子小于 1.5 的精度要求,说明 SWAT 模型在该流域地表径流过程中较好的适用性,可用于表征流域水文情势。

b. 在研究时段内, OCDI 与同时期的 SPEI、SSI 和 SRI 随时间变化的趋势基本一致,与历史干旱事件吻合度较高,且 OCDI 能够对多种单一类型干旱叠加时的干旱状态进行综合表征,表明 OCDI 在挠力河流域干旱监测中有较好的适用性。

c. OCDI 与 SPEI、SSI 和 SRI 在同一典型干旱事件中所监测到的干旱区域及干旱程度均具有差异性, OCDI 能够监测到单一干旱指数未监测到的区域干旱事件,表明 OCDI 能够从气象干旱、农业干旱和水文干旱多角度更加全面地表征挠力河流域综合干旱信息。

d. OCDI 与不同类型单一干旱指数均有着较高的相关性。OCDI 在挠力河流域下游地区对于气象干旱、农业干旱和水文干旱的信息的综合监测能力更强,且年尺度 OCDI 的综合监测能力明显大于季尺度和月尺度。

e. OCDI 所识别挠力流域综合干旱程度的等级与实际受旱面积相对应。随着综合干旱程度的加重,流域实际受旱面积相应增加,表明 OCDI 能够较好地识别和区分该流域的综合干旱程度。

参考文献:

[1] 李军,吴旭树,王兆礼,等. 基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究[J]. 水利学报,2021,52(4):486-497. (LI Jun, WU Xushu, WANG Zhaoli, et al. Changes of drought characteristics in future in Pearl River Basin describing by a new comprehensive standardized drought index [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4):486-497. (in Chinese))

[2] 洪思扬,程涛. 京津冀地区干旱事件时空聚集性特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 87-95. (HONG Siyang, CHENG Tao. Analysis on spatial-temporal gathering characteristics of drought events in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):87-95. (in Chinese))

[3] 陈家宁,孙怀卫,王建鹏,等. 综合气象干旱指数改进及

其适用性分析[J]. 农业工程学报,2020,36(16):71-77. (CHEN Jianing, SUN Huaiwei, WANG Jianpeng, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16):71-77. (in Chinese))

[4] MAITY R, SUMAN M, VERMA N K. Drought prediction using a wavelet based approach to model the temporal consequences of different types of droughts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 539:417-428.

[5] 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))

[6] ZHANG J, SHEN Y J. Spatio-temporal variations in extreme drought in China during 1961-2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1):67-83.

[7] 郑崱珍,李欢,李景保,等. 环境变化下荆南三口河水文干旱演变特征及归因分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4):945-957. (ZHENG Yuzhen, LI Huan, LI Jingbao, et al. Evolution features of hydrologic drought of the three outlets of the Southern Jing River and its attribution under changing environment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4):945-957. (in Chinese))

[8] 杨文静,李建柱,冯平. 基于标准化土壤湿度指数的滦河流域农业干旱评价[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3):801-807. (YANG Wenjing, LI Jianzhu, FENG Ping. Evaluation of agricultural drought in Luanhe River Basin based on the standardized soil moisture index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3):801-807. (in Chinese))

[9] MANZANO A, CLEMENTE M A, MORATA A, et al. Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain[J]. Atmospheric Research, 2019, 230:1-11.

[10] KUABIŁAK W K, JUSKIEWICZ W. Relationships between meteorological and hydrological drought in a young-glacial zone (north-western Poland) based on standardised precipitation index (SPI) and standardized runoff index (SRI) [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2020, 25(4):517-531.

[11] KWON M, KWON H H, HAN D W. Spatio-temporal drought patterns of multiple drought indices based on precipitation and soil moisture: a case study in South Korea[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(12):4669-4687.

[12] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2):204-216.

[13] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of

- drought indices [J]. Environmental Reviews, 2011, 19: 333-349.
- [14] 屈艳萍, 吕娟, 苏志诚, 等. 抗旱减灾研究综述及展望 [J]. 水利学报, 2018, 49 (1): 115-125. (QU Yanping, LYU Juan, SU Zhicheng, et al. Research review and perspective of drought mitigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (1): 115-125. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 杜灵通, 田庆久, 王磊, 等. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (9): 126-132. (DU Lingtong, TIAN Qingjiu, WANG Lei, et al. A synthesized drought monitoring model based on multi-source remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (9): 126-132. (in Chinese))
- [17] KAVIANPOUR M, SEYEDABADI M, MOAZAMI S. Spatial and temporal analysis of drought based on a combined index using copula [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77 (22): 769-780.
- [18] 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 Shengming, SU Xiaoling. 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. (in Chinese with))
- [19] 许拯民, 林睿, 左向菊, 等. 基于 SWAT 模型的沁河流域短中长期综合干旱指数构建及适用性分析 [J]. 中国农村水利水电, 2022, 476 (6): 76-83. (XU Zhengmin, LIN Rui, ZUO Xiangju, et al. The construction and applicability analysis of the short-term, mid-term and long-term comprehensive drought index of Qinhe River Basin based on SWAT model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, 476 (6): 76-83. (in Chinese))
- [20] 栗晓玲, 梁晓萱, 吴海江, 等. 表征生态状况的综合干旱指数构建及干旱风险分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 50-58. (SU Xiaoling, LIANG Xiaoxuan, WU Haijiang, et al. Construction of comprehensive drought index representing ecological condition and analysis of drought risk [J]. Water Resource Protection, 2023, 39 (2): 50-58. (in Chinese))
- [21] 高尚, 胡鹏, 崔嵩, 等. 基于 SWAT 模型的挠力河流域地表径流数值模拟与不确定性分析 [J]. 环境工程, 2020, 38 (10): 83-89. (GAO Shang, HU Peng, CUI Song, et al. Numerical simulation and uncertainty analysis of surface runoff in Naoli River Basin based on SWAT model [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (10): 83-89. (in Chinese))
- [22] 邢业相, 刘美鑫, 付强, 等. 挠力河流域径流变化特征与影响因素分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (9): 178-187. (XING Zhenxiang, LIU Meixin, FU Qiang, et al. Analysis of runoff variation and impacting factors in Naoli River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (9): 178-187. (in Chinese))
- [23] OLIVERA F, VALENZUELA M, SRINIVASAN R, et al. ArcGIS-SWAT: a geodata model and GIS interface for SWAT [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42 (2): 295-309.
- [24] DING Jinli, ZHENG Fenchi. SWAT model and its application [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11 (4): 128-130, 156.
- [25] KARIM C, JING Y, IVAN M, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. Journal of Hydrology, 2006, 333 (2): 413-430.
- [26] 梁箴, 栗晓玲. 基于 SWAT 的金塔河流域综合干旱指数构建及其适用性分析 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (10): 136-144. (LIANG Zheng, SU Xiaoling. Construction and applicability of a comprehensive drought index for Jinta River Basin based on SWAT [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49 (10): 136-144. (in Chinese))
- [27] 宋玉鑫, 左其亭, 马军霞. 基于 SWAT 模型的开都河流域水文干旱变化特征及驱动因子分析 [J]. 干旱区研究, 2021, 38 (3): 610-617. (SONG Yuxin, ZUO Qiting, MA Junxia. Variation and dynamic drivers of drought in Kaidu River Basin based on the SWAT model [J]. Arid Zone Research, 2021, 38 (3): 610-617. (in Chinese))
- [28] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5): 28-36. (in Chinese))
- [29] LI Qin, ZHANG Qiang, HUANG Qingzhong, et al. Nonparametric integrated agro-meteorological drought monitoring in China: new monitoring technique and applicability [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73 (1): 67-80.
- [30] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (2): 1-7.

- [25] ZHENG Tianyuan,ZHENG Xilai,CHANG Qinpeng,et al. Timescale and effectiveness of residual saltwater desalinization behind subsurface dams in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research, 2021, 57 (2) : 1-18.
- [26] KALERIS V K,ZIOGAS A I. The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476 (1) : 370-383.
- [27] LU Chunhui, XIN Pei, LI Ling, et al. Steady state analytical solutions for pumping in a fully bounded rectangular aquifer[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10):8294-8302.
- [28] 李凤丽,徐嘉璐,张游,等. 母猪河地下水数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2020, 62(11):204-209. (LI Fengli, XU Jialu, ZHANG You, et al. Research on the numerical simulation and regulation analysis of groundwater reservoir in Muzhu River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 62 (11) : 204-209. (in Chinese))
- [29] 崔相飞,周训,徐中平,等. 海岸带咸淡水界面的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2):29-35. (CUI Xiangfei, ZHOU Xun, XU Zhongping, et al. Advances in research on the fresh water-salt water interface in coastal zones[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (2):29-35. (in Chinese))
- [30] 吴吉春,吴永祥,林锦,等. 黄渤海沿海地区地下水管理与海水入侵防治研究[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2):91-92. (WU Jichun, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Study on the groundwater management and seawater intrusion prevention in the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Chinese Journal of Environment Management, 2018, 10(2):91-92. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-09-26 编辑:王芳)

(上接第 18 页)

- [30] 游松财,邸苏闯,袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3):545-552. (YOU Songcai, DI Suchuang, YUAN Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau Region [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3):545-552. (in Chinese))
- [31] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4):611-620. (LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (4):611-620. (in Chinese))
- [32] SMITH M. Cropwat: a computer program for irrigation planning and management [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [33] 封志明,张蓬涛,杨艳昭. 西北地区的退耕规模、粮食响应及政策建议[J]. 地理研究, 2003(1):105-113. (FENG Zhiming, ZHANG Pengtao, YANG Yanzhao. The scale of land conversion from farmland to forest or grassland, the grain response to it, and the relevant proposals in Northwest China [J]. Geographical Research, 2003(1):105-113. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-24 编辑:王芳)

(上接第 51 页)

- [31] 张桂鑫,田文德,靳满满. 基于 PCA 权重的化工报警阈值优化[J]. 过程工程学报, 2017, 17(3):588-593. (ZHANG Guixin, TIAN Wende, JIN Manman. Thresholds optimization of chemical alarms based on PCA weight [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(3): 588-593. (in Chinese))
- [32] 刘德海,于倩,马晓南,等. 基于最小偏差组合权重的突发事件应急能力评价模型[J]. 中国管理科学, 2014, 22(11):79-86. (LIU Dehai, YU Qian, MA Xiaonan, et al. Combination weight model of emergency ability evaluation with minimum deviation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22 (11) : 79-86. (in Chinese))
- [33] WEI Wei, ZHANG Jing, ZHOU Liang, et al. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(16):20408-20425.
- [34] 华悦,叶磊,张海荣,等. 嫩江下游多变量水文干旱特征研究[J]. 水文, 2021, 41(4):88-94. (HUA Yue, YE Lei, ZHANG Hairong, et al. Research on multi-variable hydrological drought characteristics of the lower Nenjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 88-94. (in Chinese))
- [35] 孙永罡,宋英华,马旭清,等. 中国气象灾害大典·黑龙江卷[M]. 北京:气象出版社, 2007.
- (收稿日期:2022-10-03 编辑:王芳)