

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.007

表征生态状况的综合干旱指数构建及干旱风险分析

栗晓玲^{1,2}, 梁晓萱^{1,2}, 吴海江^{1,2}, 姜田亮^{1,2}, 刘雨翰^{1,2}, 刘 轩^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:联合标准化降水指数、标准化土壤湿度指数、标准化地下水指数和标准化生态缺水指数,基于熵权法和相关系数赋权法分别构建了西北地区综合干旱指数 CDI_E 和 CDI_C,分析了 CDI_E、CDI_C 与标准化叶绿素荧光指数(SSIF)、自适应帕尔默干旱指数(scPDSI)间的相关性,评估了 CDI_E、CDI_C 对植被状况的表征以及综合干旱的监测能力,并选取典型干旱事件进行验证。利用游程理论分析了 1986—2015 年西北地区的综合干旱特征及暴露度、脆弱性、恢复力 3 个风险因子,采用等权法计算综合干旱风险,依据 10 a 滑动窗口分析干旱风险的变化趋势。结果表明:CDI_C 考虑了干旱与植被的响应关系,且与 scPDSI 的相关性较强,能较好地反映西北地区的综合干旱情况;CDI_C 可以同时监测到气象、农业、地下水和生态干旱,且反映的干旱与实际情况一致;CDI_C 显示研究时段内西北大部分地区呈变湿趋势;综合干旱在新疆、青海等干旱半干旱区的发生频率较高且干旱风险较大,各区干旱风险呈先增后减的趋势。

关键词:综合干旱指数;相关系数赋权法;熵权法;游程理论;干旱风险;西北地区

中图分类号:TV11; P338⁺.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0050-09

Construction of comprehensive drought index representing ecological condition and drought risk analysis // SU Xiaoling^{1,2}, LIANG Xiaoxuan^{1,2}, WU Haijiang^{1,2}, JIANG Tianliang^{1,2}, LIU Yuhang^{1,2}, LIU Xuan^{1,2} (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Combined with the standardized precipitation index, the standardized soil moisture index, the standardized groundwater index and the standardized ecological water shortage index, the comprehensive drought index CDI_E and CDI_C of Northwest China was constructed based on the entropy weight method and the correlation coefficient weight method. The correlation between CDI_E, CDI_C, standardized chlorophyll fluorescence index and self-calibrating Palmer drought severity index (scPDSI) was analyzed. Characterize the vegetation status and monitor the comprehensive drought, and select typical drought events for verification. The ability of CDI_E, CDI_C characterizing the vegetation status and monitoring the comprehensive drought was evaluated, and typical drought events were selected for verification. The comprehensive drought characteristics and three risk factors of exposure, vulnerability and resilience in Northwest China from 1986 to 2015 were analyzed by using the run theory. The comprehensive drought risk was calculated by the equal weight method, and the change trend of drought risk was analyzed according to the 10-year sliding window. The results show that CDI_C considers the response relationship between drought and vegetation, and has strong correlation with scPDSI, which can better reflect the comprehensive drought situation in Northwest China. CDI_C can monitor weather, agriculture, groundwater and ecological droughts at the same time, and the drought reflected is consistent with the actual situation. CDI_C shows that most areas in the Northwest China are getting wet during the study period. The occurrence frequency of comprehensive drought and the drought risk in arid and semi-arid regions such as Xinjiang and Qinghai is relatively high. The drought risk in each region is increasing first and then decreasing.

Key words: comprehensive drought index; correlation coefficient weight method; entropy weight method; run theory; drought risk; Northwest China

基金项目:国家自然科学基金(52079111, 51879222)

作者简介:栗晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟及水资源优化研究。E-mail: xiaolingsu@nwfau.edu.cn

受全球气候变化和人类活动的影响,干旱的发生频率、历时、强度和影响面积剧增,对植被生态健康、陆地碳汇、粮食产量以及水平衡等造成了灾难性的影响^[1-4]。干旱类型通常分为气象、农业、水文和社会经济、地下水以及生态干旱^[5-6]。干旱指数是监测和表征各类型干旱的有力工具,标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和标准化土壤湿度指数(standardized soil moisture index, SSI)分别广泛应用于气象干旱和农业干旱的监测^[7-9]。由于干旱在发生发展过程中涉及的水文气象变量较多,某种单一类型的干旱指数不足以表征多种类型干旱耦合的综合干旱情况^[10]。因此,如何更全面地捕捉多种类型干旱,构建综合干旱指数成为当前干旱研究的热点问题之一。

植被能够调节区域水分平衡和能量分配,可以较好地反映区域生态环境状况。受干旱引发的水分胁迫的影响,植被气孔导度减小,光合作用效率下降,固碳能力降低,进而导致生态退化^[11]。目前表征植被生长状况的指数较多,常用的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)仅能表征植被现有状态,而日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)与植被的光合速率直接相关,能够快速反映水分胁迫对植被生长的影响^[12]。植被作为陆气相互作用的重要媒介,其生长发育因降水不足、土壤湿度亏缺、地下水位下降、生态缺水量增加等原因受到气象干旱、农业干旱、地下水干旱以及生态干旱的直接影响^[6]。降水不足导致土壤湿度降低和地下水补给量减少,使得植被可供利用的水分减少;由于陆气相互作用,土壤水亏缺致使蒸发冷却的水分减少和显热增加,导致气温进一步升高和水汽压差增大;植被生态缺水量在这个反馈循环中进一步加剧,最终可能导致植被凋萎死亡^[13-14]。因此,构建综合干旱指数时考虑影响植被生长的多种类型干旱的耦合以及植被与干旱的响应关系,可以更全面地表征干旱的综合状况,并对植被健康状况的监测和预警至关重要。

当前综合干旱指数主要考虑气象干旱与农业干旱^[15]或水文干旱^[16]的耦合,较少引入地下水干旱和生态干旱,而地下水和生态状况是大气-植被-陆地相互作用的重要组成部分。常用的综合干旱指数的构建方法主要包括机器学习法、Copula 联合分布法和权重组合法 3 类^[17]。机器学习法需要输入的水文气象信息较多且只适用于特定区域^[18]; Copula 联合分布法在变量较多时,不同变量间的相互关系变得更加复杂^[19];而权重组合法结构简单,能够对

各指数进行合理的赋权,其中,熵权法和相关系数赋权法依据变量间的关系确定权重,具有较强的数学理论基础^[20],得到了广泛应用。

在干旱风险方面,常通过 Copula 函数联合干旱历时、烈度、峰值等干旱特征变量计算重现期来进行评估,但该方法不能全面揭示干旱风险的内在机理。将脆弱性、暴露度、恢复力等风险因子进行权重组合的方法可以细致地分析干旱的静态风险,同时,依据滑动窗口研究干旱风险的变化,有助于更好地掌握风险的动态演变规律,从而能够尽早采取抗旱应急防控措施^[21]。

基于此,本文联合月尺度的 SPI、SSI、SGI (standardized groundwater index)、SEWDI (standardized ecological water deficit index) 指数分别表征气象干旱、农业干旱、地下水干旱和生态干旱,基于熵权法和相关系数赋权法构建综合干旱指数 CDI_E 和 CDI_C,并基于游程理论分析西北地区综合干旱特征及干旱风险因子,以期综合干旱监测、植被生态健康以及抗旱决策等提供参考。

1 研究区概况与数据来源

西北地区位于 73°29'E ~ 111°15'E、31°36'N ~ 49°11'N,气候分区包括湿润区、半湿润区、干旱区与半干旱区,行政区划包括陕西省、甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区和宁夏回族自治区(图 1)。地势西北高东南低,由东到西黄土高原、戈壁荒漠、草原、耕地交错出现。大部分区域属于温带大陆性气候和温带季风气候,夏季高温少雨,冬季寒冷干燥。降水年际和季节差异大,空间分布不均,年降水量由东向西递减,且昼夜温差相对较大。河流和湖泊总体数量较少,受冰雪融水和山地降水的影响,河流流量小汛期短,夏季水位较高,冬季易结冰断流。

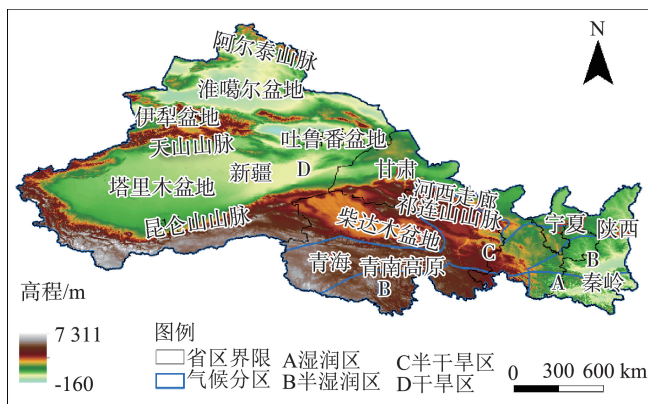


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

本文采用的数据包括 1986—2015 年逐月的气象、水文、植被以及土地利用类型数据(表 1)。基于

表 1 数据来源汇总
Table 1 Summary of data sources

类型	数据名称	空间精度	时间	数据来源
气象	降水	0.25° × 0.25°	1961—2017 年	CN05.1 格点化观测数据集 http://data.cma.cn/
	地表反射率、温度、植被覆盖、叶面积指数、大气压力、相对湿度、风速、短波辐射和长波辐射	0.1° × 0.1°	1950—2022 年	ECWMF ERA5 再分析数据 https://cds.climate.copernicus.eu/
	scPDSI	0.25° × 0.25°	1901—2020 年	https://crudata.uea.ac.uk/
水文	土壤湿度、雪水当量、植被冠层水	0.25° × 0.25°	1948—2015 年	GLDAS Noah 模型 2.0/2.1 https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas
	陆地水储量	0.5° × 0.5°	1979—2020 年	https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.z612jm6bt
植被	SIF	0.05° × 0.05°	2000—2020 年	GOSIF 数据集 http://globalecology.unh.edu/data/GOSIF.html
	NDVI	1/12° × 1/12°	1982—2015 年	GIMMS NDVI3 数据集 http://ecocast.arc.nasa.gov
土地利用类型	土地利用/覆盖变化监测数据集	1 km × 1 km	1980 年、1990 年、1995 年、2000 年、2013 年、2015 年	http://www.resdc.cn/DataSearch.aspx

双线性内插法将所用栅格数据的空间分辨率统一为 1/12° × 1/12°。以 2004—2009 年数据平均值为基准,计算植被冠层水变化量、0 ~ 200 cm 土壤水变化量和雪水当量变化量;地下水储量变化量和生态缺水计算步骤详见文献[22-23]。

2 研究方法

2.1 单变量干旱指数

利用 1986—2015 年逐月的降水量、0 ~ 100 cm 土壤水变化量、地下水储量变化量、生态缺水量以及 2000 年 3 月至 2015 年 12 月叶绿素荧光数据分别构建时间尺度为 3 月的 SPI、SSI、SGI、SEWDI 和标准化叶绿素荧光指数 (standardized solar-induced chlorophyll fluorescence, SSIF)。计算 SPI 时降水采用 Gamma 分布,计算 SSI 时土壤湿度服从 Beta 分布,计算 SEWDI 时边缘分布由 Gamma 分布、Log-logistic 分布、P-Ⅲ分布进行拟合优选^[24-25]。地下水储量变化量和叶绿素荧光受多种因素的影响,因此选择多种分布函数以及非参数化方法对其进行拟合优选后构建标准化指数 SGI 和 SSIF,具体步骤为:①选取 Gamma、Log-normal、Weibull、Normal、Logistic 等 5 种分布对归一化后的地下水储量变化量和叶绿素荧光的月序列进行拟合优选,采用极大似然法对拟合分布函数进行参数估计;②利用 K-S 检验^[26]进行拟合优先度检验并根据 AIC 准则^[27]选择各月序列最优的拟合分布函数并求得相应的累积概率;③若 5 种分布函数均没有通过 K-S 检验,则采用非参数化的 Gringorten 公式^[28]来计算经验累积概率;④对最优的拟合分布函数的累积概率或经验累积概

率进行标准正态化处理,依据逆高斯分布得到标准化指数 SGI 和 SSIF。

2.2 综合干旱指数

2.2.1 CDI_C

对于每一个栅格点,以 SSIF 为正向指标,将 SPI、SSI、SGI、SEWDI 与 SSIF 同趋势化,即正向和逆向指标共存时,将逆向指标正向化。计算 2000 年 3 月至 2015 年 12 月同趋势化后干旱指数间的相关系数,进而得到基于相关系数赋权法构建的综合干旱指数 CDI_C,计算公式为

$$I_c = \sum_{i=1}^4 \beta_i I'_{Si} \quad (1)$$

其中

$$\beta_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^4 |r_i|}$$

$$r_i = \frac{E[(I'_{Si} - \mu_i)(Z' - \mu_Z)]}{\sigma_i \sigma_Z} \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

式中: I_c 为 CDI_C 值; r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为同趋势化后 SPI、SSI、SGI、SEWDI 与 SSIF 之间的皮尔逊相关系数; I'_{S1} 、 I'_{S2} 、 I'_{S3} 、 I'_{S4} 分别为同趋势化后的 SPI 值、SSI 值、SGI 值、SEWDI 值; Z' 为同趋势化后的 SSIF 值; E 为数学期望; μ_i 为 SPI、SSI、SGI、SEWDI 序列同趋势化后的均值; μ_Z 为 SSIF 序列同趋势化后的均值; σ_i 为 SPI、SSI、SGI、SEWDI 序列的标准差; σ_Z 为 SSIF 序列的标准差; β_i 为权重。

2.2.2 CDI_E

设有 a 个待评价项目 (以格点序列样本长度作为评价对象)、 b 个评价指标 (即 SPI、SSI、SGI、SEWDI),则原始数据矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{a \times b}$,采用离差标准化法对 $\mathbf{X}$ 矩阵标准化处理得到矩阵 $\mathbf{Y} =$

$(y_{ij})_{a \times b}$ 。依据第 j 个评价指标值在第 i 个项目中的比重矩阵 P 计算第 j 个评价指标的熵值 E_j , 进而得到熵权 w_j 。在此基础上得到基于熵权法构建的综合干旱指数 CDI_E, 计算公式为

$$I_E = \sum_{j=1}^4 w_j I_{Sj} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } w_j &= \frac{E_j}{\sum_{j=1}^4 E_j} & E_j &= -k \sum_{i=1}^a P_{ij} \ln P_{ij} \\ P_{ij} &= \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^a y_{ij}} & k &= 1/\ln a \end{aligned}$$

式中: I_E 为 CDI_E 值; I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_{S3} 、 I_{S4} 分别为 SPI 值、SSI 值、SGI 值、SEWDI 值; Z 为 SSIF 值。当 $P_{ij} = 0$ 时, 令 $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

2.3 干旱等级及干旱特征

将综合干旱指数 CDI_E 和 CDI_C 进行 $-1 \sim 1$ 归一化处理。依照 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》中的分级标准对单变量干旱指数 SPI、SSI、SGI 和 SEWDI 进行干旱等级划分; 参照植被条件指数 (vegetation condition index, VCI)^[29] 的划分原则进行综合干旱等级划分, 结果见表 2。

表 2 单变量干旱指数和综合干旱指数等级划分

Table 2 Classification of individual drought and comprehensive drought indexes

干旱等级	单变量干旱指数	综合干旱指数
无旱	$(-0.5, +\infty)$	$(-0.2, 1]$
轻旱	$(-1.0, -0.5]$	$(-0.4, -0.2]$
中旱	$(-1.5, -1.0]$	$(-0.6, -0.4]$
重旱	$(-2.0, -1.5]$	$(-0.8, -0.6]$
特旱	$(-\infty, -2.0]$	$[-1, -0.8]$

依据游程理论^[30], 负游程的长度则为干旱历时 D , 干旱历时与截取水平包含的面积乘积则为干旱烈度 S 。若综合干旱指数小于 -0.4 且 $D > 1$ 月, 直接判定为 1 次干旱过程; 当 $D = 1$ 月, 若该月综合干旱指数小于 -0.6 , 则判定为 1 次干旱过程, 否则不成立; 若 2 次干旱过程间隔时间为 1 月且该月综合干旱指数小于 -0.2 , 则将 2 次干旱事件合并为 1 次干旱事件, 其干旱历时为 2 次干旱事件历时叠加再加 1 月, 干旱烈度为 2 次干旱事件烈度叠加。

干旱风险由暴露度 V_u 、脆弱性 E_x 、恢复力 R_e 进行表征。基于游程理论得到干旱的次数、干旱历时和干旱烈度, 分别计算 V_u 、 E_x 、 R_e , 并进行归一化, 将这 3 项指标进行权重组合计算得到综合干旱风险 $R^{[21]}$:

$$V_u = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i \quad (3)$$

$$E_x = \frac{1}{T_D} \sum_{i=1}^M D_i \quad (4)$$

$$R_e = \frac{M}{\sum_{i=1}^M D_i} \quad (5)$$

$$R = w'_1 V'_u + w'_2 E'_x + w'_3 (1 - R'_e) \quad (6)$$

式中: M 为干旱次数; S_i 和 D_i 分别为第 i 次干旱的烈度和历时; T_D 为总时段长度; V'_u 、 E'_x 、 R'_e 为 V_u 、 E_x 、 R_e 归一化后的结果; w'_1 、 w'_2 、 w'_3 为 V_u 、 E_x 、 R_e 占干旱风险的权重, 本文取等权 $1/3$ 。

3 结果与分析

3.1 CDI_E、CDI_C 与 SSIF、scPDSI 的相关性

统计不同时滞 CDI_E、CDI_C 与 SSIF 之间显著相关 ($p < 0.05$) 的格点占比以及对应的平均相关系数 r 的情况, 结果见表 3。可见, 随时滞的增加综合干旱指数与 SSIF 间的相关性明显降低, 表明植被对干旱的响应以短时滞为主。其中, 在 $0 \sim 3$ 月时滞情况下, CDI_E 与 SSIF 之间显著相关的格点占比为 $50\% \sim 70\%$, 对应的 r 为 $0.3 \sim 0.4$, 而 CDI_C 与 SSIF 之间显著相关的格点占比为 $70\% \sim 99\%$, 对应的 r 为 $0.4 \sim 0.6$ 。可见, CDI_C 与 SSIF 之间的相关性更强, 且能够反映短时间内的植被变化情况。此外, scPDSI 综合考虑了降水与下垫面因素, 广泛应用于综合干旱的监测和表征。选择 scPDSI 作为综合干旱指数的参考指标, 统计 CDI_E、CDI_C 与 scPDSI 之间显著相关 ($p < 0.05$) 的格点占比以及对应的 r , 可以间接评估 CDI_C 和 CDI_E 监测综合干旱的能力。由表 3 可见, 无时滞情况下 CDI_E、CDI_C 与 scPDSI 之间显著相关的格点占比在 90% 左右, 对应的 r 分别为 0.44 、 0.49 。因此, CDI_E 与 CDI_C 均能较好地反映西北地区的综合干旱状况。

表 3 CDI_E、CDI_C 与 SSIF、scPDSI 的相关性对比

Table 3 Comparison of correlation between CDI_E, CDI_C and SSIF as well as scPDSI

指标	时滞	CDI_E		CDI_C	
		占比/%	r	占比/%	r
SSIF	无时滞	69.9	0.36	96.3	0.57
	1 月时滞	69.5	0.35	94.1	0.55
	2 月时滞	64.2	0.33	85.8	0.50
	3 月时滞	55.2	0.31	74.2	0.46
scPDSI	无时滞	95.6	0.44	89.6	0.49

图 2 为 CDI_E、CDI_C 与 SSIF、scPDSI 相关系数空间分布。由图 2(a) 可见, CDI_E 与 SSIF 之间的相关系数在山脉高原地区略低, 因为高山高原区植被的生长不仅受气象、农业、地下水与生态干旱的影响, 也接受冰川积雪融水的补给, 且冻土融化也可能

导致生态系统的碳汇功能减退。此外,植被生长变化对于干旱的响应不仅与植被的耐旱程度有关,也与地理位置、天然林保护、退牧还草以及退耕还林等人类保护活动有关^[31]。由图 2(b)可见,相较于 CDI_E, CDI_C 与 SSIF 在西北全区的相关系数更高,能更全面地捕捉植被生长变化状况,主要是因为 CDI_C 构建过程中需要对数据进行同趋势化处理,考虑了各指数与 SSIF 之间的相关关系,能更好地反映植被与各类型干旱之间的响应关系。同时,相较于 SPI 和 SSI, SEWDI 与植被的相关性更好^[23]。由图 3 可见,构建 CDI_C 时 SEWDI 所占的权重相对较高,而在构建 CDI_E 时根据 SPI、SSI、SGI 和 SEWDI 的熵信息进行赋权,更多考虑的是这 4 种类型干旱的相对严重程度。此外, CDI_E、CDI_C 与 scPDSI 之间的相关系数在全区均较高, CDI_C 考虑了干旱和植被之间的响应关系,能较好地表征西北地区的综合干旱情况。

3.2 西北地区综合干旱的时间演变规律

图 4 为基于 CDI_C 的西北地区 1986—2015 年不同干旱等级面积占比。可见,基于 CDI_C 的 1986—2015 年西北地区的干旱逐渐缓解,且发生不同干旱等级的面积占比呈减少趋势。2002 年之前西北地区的干旱面积占比较大,尤其是 1986 年、1991 年、1995 年、1997 年、2001 年的干旱面积占比分别为 53.5%、48.8%、52.3%、57.6%、47.2%。2002 年之后,干旱面积占比逐渐减少,其中干旱相

对严重的 2004 年、2008 年、2009 年的干旱面积占比分别为 35.38%、36.2%、34.8%。西北地区研究时段内干旱最严重的月份为 1995 年 6 月(干旱面积占比为 79.1%),其中轻旱、中旱、重旱和特旱的面积占比分别为 13.1%、16.0%、14.9% 和 35.0%。

以 3 月尺度的 CDI_C 为例,分析不同季节各干旱等级的面积占比,结果如图 5 所示。可见,干旱面积在各季节的占比呈减少趋势,其中夏秋两季的干旱面积占比减少尤为明显。1986—1990 年西北地区的干旱在四季均有发生,其中 1986 年秋季干旱尤为严重;1991—1995 年春、夏、秋 3 季的干旱面积占比相较于冬季的更大(1991 年夏秋两季、1995 年春夏两季干旱尤为严重);1996—2000 年相对其他时段各季节的干旱面积占比更大,其中 1997 年夏、秋、冬 3 季旱情尤为严重;2001—2005 年容易发生春旱和夏旱,但 2001 年春夏两季干旱较为严重,2004 年春季干旱相对严重;2006—2010 年干旱多发生在夏季,但 2006 年冬季较为干旱;2011—2015 年多为春旱与冬旱,但 2013 年秋冬两季相对干旱。

3.3 西北地区综合干旱的空间分布特征

对 1986—2015 年 CDI_C 指数进行一元线性拟合,并检验其变化趋势的显著性。当 $I_c > 0$ ($I_c < 0$) 时, $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 分别表示显著变湿(变干)和极显著变湿(变干), $p \geq 0.05$ 时,趋势不显著,表示基本不变。由图 6(a)可见,西北地区大部分区域呈变湿趋势。随着气候变暖,初期高山积雪与冰川

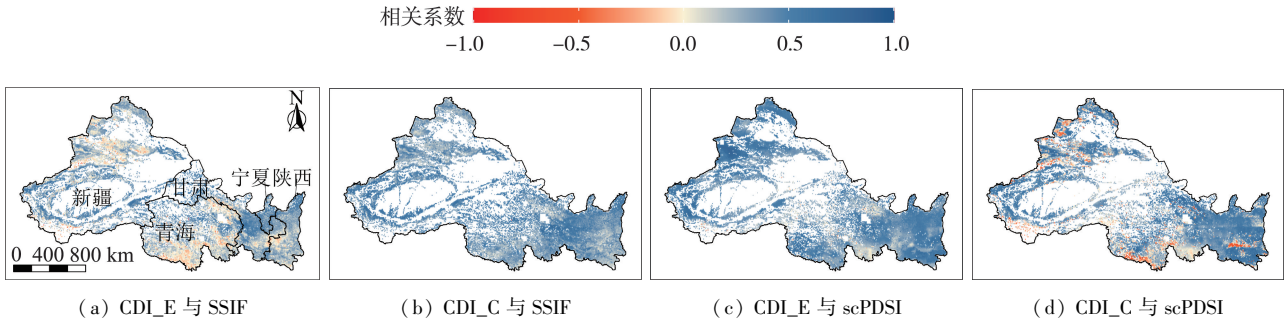


图 2 CDI_E、CDI_C 与 SSIF、scPDSI 相关系数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of correlation coefficient between CDI_E, CDI_C and SSIF as well as scPDSI

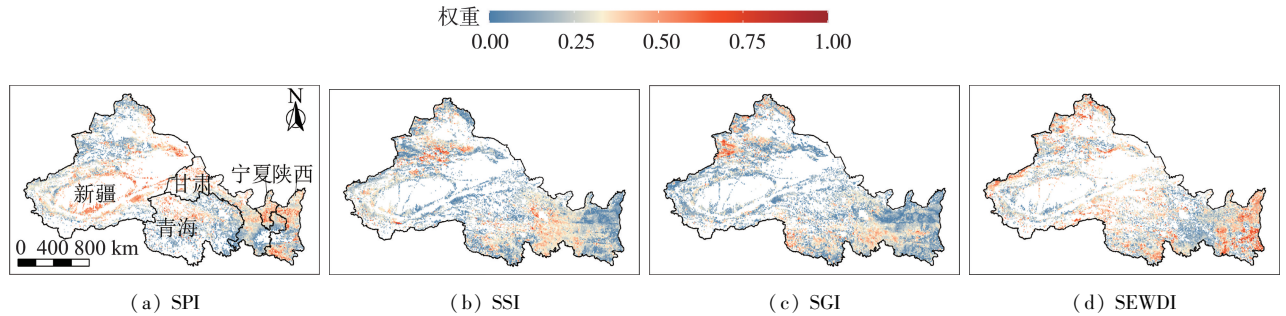


图 3 SPI、SSI、SGI、SEWDI 在构建 CDI_C 时所占权重的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of weights of SPI, SSI, SGI and SEWDI in CDI_C construction

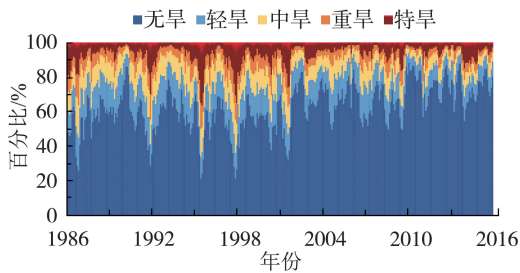


图4 基于 CDI_C 的西北地区 1986—2015 年不同干旱等级面积占比

Fig. 4 Time series of area percentage for different drought classifications during 1986–2015 based on CDI_C in Northwestern China

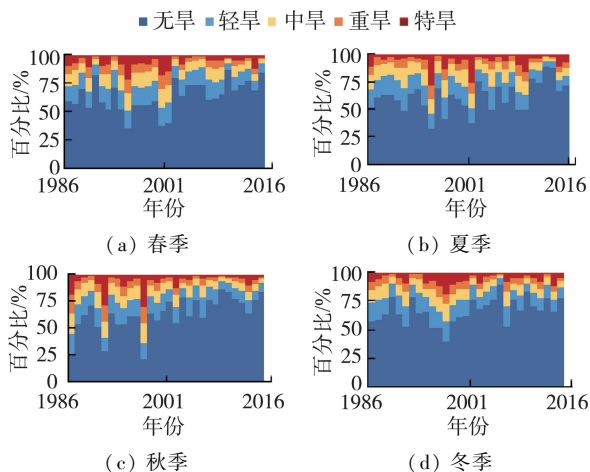


图5 基于 3 月尺度 CDI_C 的 1986—2015 年四季不同干旱等级面积占比

Fig. 5 Area percentage for different drought classifications in different seasons during 1986–2015 based on CDI_C on three-month scale

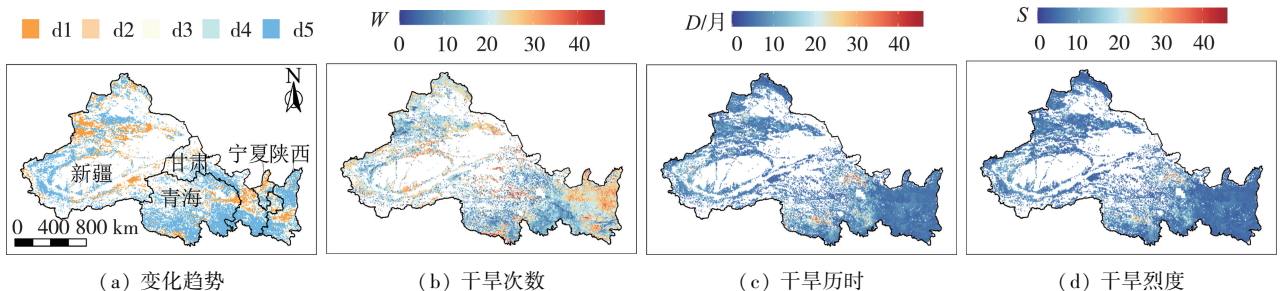


图6 西北地区综合干旱变化趋势及干旱特征空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of comprehensive drought variation trend and characteristics in Northwestern China

注: (a) 中 d1、d2、d3、d4、d5 分别表示极显著变干、显著变干、基本不变、显著变湿、极显著变湿。

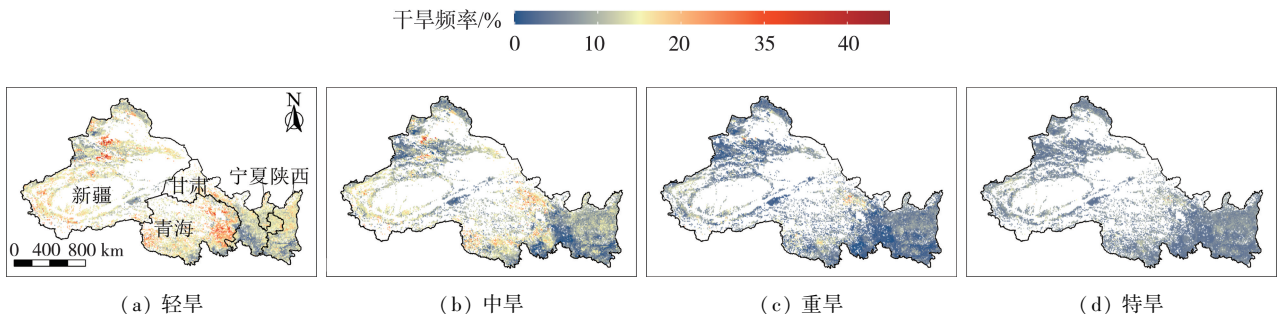


图7 各等级干旱发生频率的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of drought frequency of all grades in Northwestern China

融水量增多,但冰川面积的减小导致整体融水量减少,而气温升高使得蒸发量逐渐增大,天山山脉、昆仑山脉地区呈变干趋势^[32]。甘肃黄土高原、宁夏北部引黄灌区以及陕西关中地区也呈变干趋势,这与马琼等^[33]、Fang 等^[34]、Wang 等^[35] 分别基于 SPEI 对甘肃黄土高原、宁夏和陕西干旱特征研究的结论一致。由图 6(b)(c)(d) 可见,西北地区 1986—2015 年的干旱次数为 1~45,平均每年发生 1~2 次干旱。陕西北部、宁夏、新疆阿尔泰山脉、天山山脉和塔里木盆地的干旱次数在 20 以上,青海省海西州和玉树州干旱次数在 30 以上。西北大部分地区干旱历时不超过 10 月,烈度不高于 7,只有极少部分地区如祁连山脉、青海南部的干旱历时较长、烈度较大。以上结果表明,干旱历时与烈度具有较强的相依性。此外,对比西北地区各等级干旱的发生频率(图 7),得出发生频率由大到小的顺序为:轻旱、中旱、特旱、重旱,其空间分布为西部区域(新疆、青海)的干旱发生频率高于东部区域(陕西、甘肃东部),即干旱频率在干旱、半干旱区大于湿润半湿润区。

3.4 典型干旱验证

通过查阅 1986—2000 年《中国气象灾害大典》(新疆卷、陕西卷、甘肃卷、宁夏卷和青海卷)、2001—2005 年西北五省区水资源公报以及 2006—2015 年中国水旱灾害公报,发现西北地区记载的干旱事件发生时段逐渐缩短,分布区域逐渐缩小。此

外,对比 CDI_C 识别干旱面积较大的年份(1986 年、1991 年、1995 年、1997 年)的实际记载干旱情况,陕西、甘肃、新疆、宁夏、青海各省份均发生了较为严重的持续性干旱。其中,新疆 1991 年特大干旱,1995 年北疆地区和南疆部分地区干旱,1997 年全疆干旱;陕西 1995 年、1997 年春夏两季全区干旱严重;宁夏 1997 年特大干旱;甘肃 1997 年全省出现春旱、夏秋连旱;青海 1995 年全省长期干旱少雨,1997 年春夏干旱严重^[36-40]。以 1995 年 6 月为例(图 8),CDI_C 能够较好地反映各类型干旱的空间分布,且根据实际记载,陕西降水比常年偏少 4 成,干旱更为严重,甘肃旱情主要分布在中部、陇东、陇南,新疆干旱,宁夏持续干旱,青海海东市乐都区、互助县遭受旱灾^[36-40],CDI_C 识别的干旱空间分布与之基本吻合。可见,CDI_C 反映的干旱情况与实际干旱情况较为一致。

3.5 西北地区综合干旱风险分析

针对暴露度、恢复力、脆弱性 3 种风险因子对西北地区的综合干旱进行空间静态风险分析,图 9 为

干旱风险的空间分布及 1986—2015 年 10 a 滑动逐年变化。由图 9(a)可见,干旱风险较高的区域主要分布在新疆、青海、甘肃西部即干旱半干旱地区,与各等级干旱发生频率较高的区域分布较为一致。尤其是祁连山山脉与青海南部的干旱风险较高,这些区域主要为干旱历时较长和干旱烈度较大地区。由图 9(b)可见,各分区干旱风险呈先下降后上升的趋势,与干旱面积变化状况较为一致。其中,湿润区与半干旱区干旱风险变化趋势最为显著,在第 10 个窗口(2004 年)之前,干旱风险具有上升趋势,之后干旱风险整体下降趋势显著。而半湿润区干旱风险在第 10 个窗口之前相对稳定,之后至第 14 个窗口(2008 年)显著下降,而后趋于平缓。干旱区干旱风险长时间范围内变化较小,在第 7 个窗口(2001 年)之后开始下降,而在第 17 个窗口(2011 年)之后呈上升趋势。可见,缓解西北地区干旱半干旱区的长期干旱,并对湿润地区干旱风险的变化及时采取防旱措施,是西北地区抗旱工作的重点。

进一步分析西北地区暴露度、恢复力、脆弱性

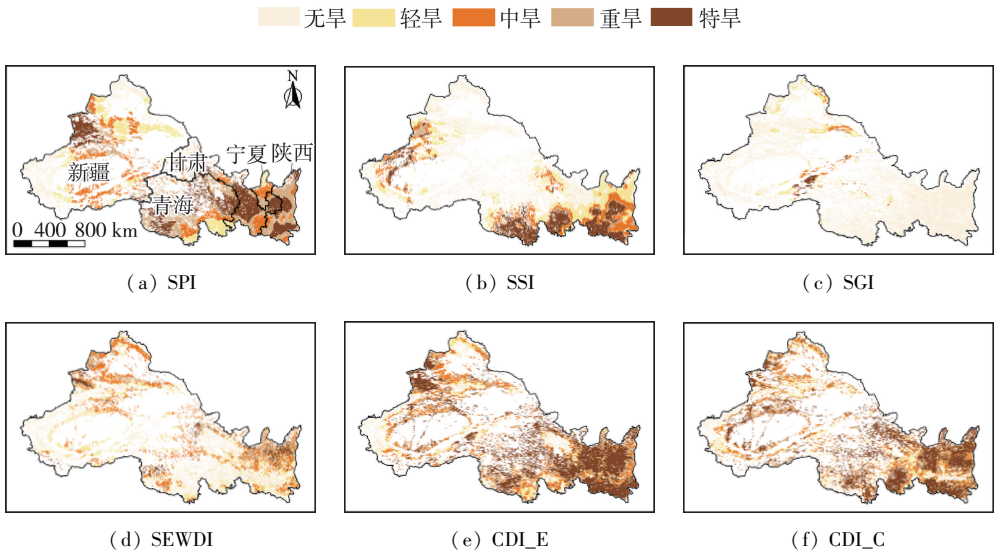


图 8 1995 年 6 月干旱等级划分空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of drought classification in June 1995

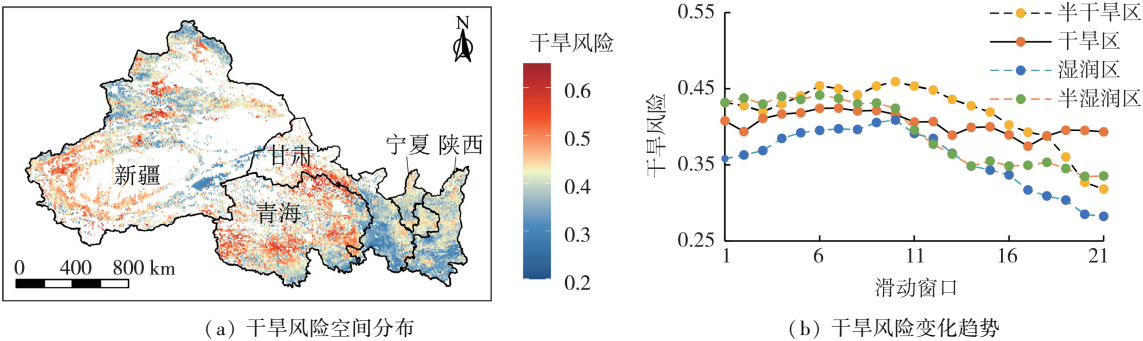


图 9 干旱风险的空间分布及 10 a 滑动逐年变化
Fig. 9 Spatial distribution of drought risk and change year by year on a 10-year sliding scale

等风险因子的动态演变规律,结果见图 10。西北地区暴露度、脆弱性具有先上升后下降的趋势,而恢复力具有先下降后上升的趋势。其中,干旱区 3 种风险因子变化范围最小;半干旱区暴露度较高、脆弱性较强、恢复力较弱;湿润区暴露度较低、脆弱性较弱、恢复力相对较强;半湿润区 3 种风险因子前期变化趋势较为平缓,而后期暴露度和脆弱性下降趋势与恢复力上升趋势较为显著。总体上,3 种风险因子的相关性较强,能较好地表征干旱风险状况。

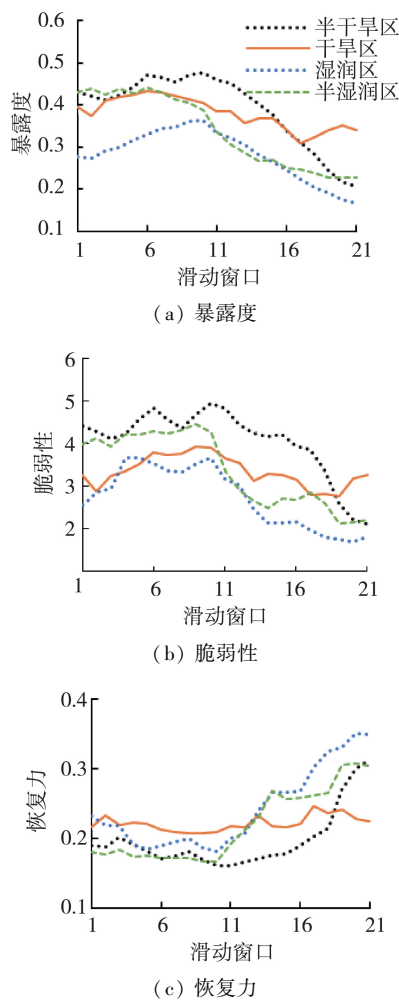


图 10 综合干旱风险因子 10 a 滑动逐年变化

Fig. 10 Comprehensive drought risk factors changed year by year on a 10-year sliding scale

4 结论

a. CDI_C 考虑了干旱与植被的响应关系,与 scPDSI 的相关性较强,显著相关格点占比为 89.6%,对应的平均相关系数分别为 0.49;此外,经过典型干旱事件验证,CDI_C 对干旱较为严重的年份(1986 年、1991 年、1995 年、1997 年)的干旱识别效果较好,且可以同时监测到气象、农业、地下水和生态干旱。CDI_C 可较好地表征植被状况,同时能

够有效监测综合干旱。
b. 基于 CDI_C 监测西北地区综合干旱特征,大部分地区呈变湿趋势,2002 年以前干旱较为严重;位于干旱半干旱区的新疆、青海干旱发生频率较高,干旱风险较大,且各区干旱风险具有先增后减的变化趋势,其中湿润区干旱风险的变化趋势最为显著。因此,缓解干旱半干旱区的长期干旱,并及时应对湿润地区干旱风险的变化,是西北地区抗旱工作的重点。
参考文献:

[1] 张强,张良,崔显成,等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(7):763-778. (ZHANG Qiang, ZHANG Liang, CUI Xiancheng, et al. Progress and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7):763-778. (in Chinese))

[2] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years[J]. Nature, 2012,491(7424):435-438.

[3] 马明卫,韩宇平,严登华,等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J]. 水资源保护,2020,36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):11-21. (in Chinese))

[4] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))

[5] 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 Xiaoling,ZHANG Gengxi,FENG Kai,et al. Progress and perspective of drought index[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2019,17(5):9-18. (in Chinese))

[6] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and review of ecological drought[J]. Water Resources Protection,2021, 37(4):15-21. (in Chinese))

[7] 杨肖丽,郑巍斐,林长清,等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(5):377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J].

- Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45 (5):377-383. (in Chinese))
- [8] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象,2017,35(5):709-723. (LI Yiping, LI Yaohui. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis [J]. Arid Meteorology,2017,35(5):709-723. (in Chinese))
- [9] 吴泽棉,邱建秀,刘苏峡,等. 基于土壤水分的农业干旱监测研究进展[J]. 地理科学进展,2020,39(10):1758-1769. (WU Zemian, QIU Jianxiu, LIU Suxia, et al. Advances in agricultural drought monitoring based on soil moisture[J]. Progress in Geography,2020,39(10):1758-1769. (in Chinese))
- [10] HAO Z, SINGH V P. Drought characterization from a multivariate perspective: a review [J]. Journal of Hydrology, 2015,527:668-678.
- [11] 罗丹丹,王传宽,金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节[J]. 应用生态学报,2019,30(12):4333-4343. (LUO Dandan, WANG Chuankuan, JIN Ying. Stomatal regulation of plants in response to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (12): 4333-4343. (in Chinese))
- [12] WANG S, HUANG C, ZHANG L, et al. Monitoring and assessing the 2012 drought in the great plains: analyzing satellite-retrieved solar-induced chlorophyll fluorescence, drought indices, and gross primary production[J]. Remote Sensing,2016,8(2):61.
- [13] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 515-520. (in Chinese))
- [14] 江笑薇,白建军,刘宪峰. 基于多源信息的综合干旱监测研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2019,34(3):275-287. (JIANG Xiaowei, BAI Jianjun, LIU Xianfeng. Research progress and prospect of integrated drought monitoring based on multi-source information [J]. Advances in Earth Science,2019,34(3):275-287. (in Chinese))
- [15] 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 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. (in Chinese))
- [16] 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 Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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))
- [19] 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))
- [20] 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))
- [21] 聂明秋,黄生志,黄强,等. 基于非参数法的气象-水文干旱风险评估及其动态演变探究[J]. 自然灾害学报,2020,29(2):149-160. (NIE Mingqiu, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Meteorological-hydrological drought risk assessment and dynamic evolution based on nonparametric method [J]. Journal of Natural Disasters, 2020,29(2):149-160. (in Chinese))
- [22] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护,2022,38(1):34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):34-42. (in Chinese))
- [23] JIANG T, SU X, SINGH V P, et al. A novel index for ecological drought monitoring based on ecological water deficit [J]. Ecological Indicators, 2021, 129 (7): 1470-1160.

(下转第 100 页)

- 号控制算法[J]. 计算机应用,2019,39(5):1495-1499. (SHU Lingzhou, WU Jia, WANG Chen. Urban traffic signal control based on deep reinforcement learning[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(5): 1495-1499. (in Chinese))
- [16] TURPIN D L. Aging gracefully: your *American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics*, 1915 to 2015[J]. *American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics*, 2014, 145(3): 271-272.
- [17] 王丽,王涛,肖巍,等. XGBoost 启发的双向特征选择算
(收稿日期:2022-02-27 编辑:施业)
- 法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(3): 627-634. (WANG Li, WANG Tao, XIAO Wei, et al. Bidirectional feature selection algorithm inspired by XGBoost [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59(3): 627-634. (in Chinese))
- [18] XI Bao, WANG Rui, CAI Yinghao, et al. A novel heterogeneous actor-critic algorithm with recent emphasizing replay memory [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2021, 18(4): 619-631.
- (上接第 58 页)
- [24] 刘永佳,黄生志,方伟,等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 93-102. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 93-102. (in Chinese))
- [25] SHEFFIELD J, WOOD E F. Characteristics of global and regional drought, 1950-2000: analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D17): 115.
- [26] 吴喜之,王兆军. 非参数统计方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996.
- [27] AKAINKE H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle [C]// *Proceedings of the International Symposium on Information Theory. Akademia Kiado: Budapest*, 1973
- [28] GRINGORTEN I I. A plotting rule for extreme probability paper [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(3): 813-814.
- [29] WEI W, ZHANG J, ZHOU L, 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.
- [30] 王晓峰,张园,冯晓明,等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214. (WANG Xiaofeng, ZHANG Yuan, FENG Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and Copula function [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 206-214. (in Chinese))
- [31] 王丹云,吕世华,韩博,等. 黄土高原春季植被变化分布与变化特征及其对春旱的响应研究[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1208-1219. (WANG Danyun, LYU Shihua, HAN Bo, et al. The characteristics of spring vegetation cover and its response to spring drought over the Loess plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(5): 1208-1219. (in Chinese))
- [32] LIU Q, YANG Z, HAN F, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their response to recent climate change: a case study in the Tianshan mountains, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(16): 1189.
- [33] 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. (MA Qiong, ZHANG Bo, WANG Dong, et al. The temporal and spatial distribution of drought on the Loess plateau based on the standardized precipitation evapotranspiration Index from 1960 to 2012 [J]. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1834-1841. (in Chinese))
- [34] FANG Y, QIAN H, CHEN J, et al. Characteristics of spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Ningxia Hui autonomous region of Northwest China [J]. *Water*, 2018, 10(8): 1-22.
- [35] WANG Y, KONG Y, CHEN H, et al. Spatial-temporal characteristics of drought detected from meteorological data with high resolution in Shaanxi Province, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(4): 561-579.
- [36] 邵志忠,董安详,王鹏祥,等. 中国气象灾害大典·甘肃卷[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [37] 夏普明,尚永生,梁旭,等. 中国气象灾害大典·宁夏卷[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [38] 王莘,张国胜,李锡福,等. 中国气象灾害大典·青海卷[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [39] 崔讲学,翟佑安,李长安,等. 中国气象灾害大典·陕西卷[M]. 北京:气象出版社,2005.
- [40] 史玉光,任宜勇,陈洪武,等. 中国气象灾害大典·新疆卷[M]. 北京:气象出版社,2006.
- (收稿日期:2022-04-03 编辑:王芳)