

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.007

考虑地表-土壤-作物水分联合亏缺的综合旱情指数研究

吴志勇^{1,2}, 张静杰¹, 程丹丹¹, 范思琦¹, 何海¹, 李源¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:区域干旱发生发展受地表水、土壤水、作物水等多种缺水过程的共同影响,以往基于单一缺水过程构建的干旱指数难以反映实际旱情,综合考虑多种缺水过程构建综合旱情指数,对有效开展区域旱情监测具有重要的意义。基于水文作物耦合模型(VIC-EPIC)模拟数据,通过线性加权集成标准化径流指数(SRI)、土壤含水量距平指数(SMAPI)和作物缺水指数(CWDI),构建了反映地表-土壤-作物水分联合亏缺的综合旱情指数(CDSI),并采用1981—2020年数据在湘江流域开展了应用研究。结果表明,基于CDSI提取的旱情特征序列与流域内35个县1990—2007年受旱率相关性在0.4~0.8之间,82.9%通过5%显著性水平检验,与反映单一水分亏缺的SRI、SMAPI和CWDI相比,相关性整体上有较大提升。CDSI能够较好地反映区域实际旱情发生发展,可为大范围旱情准确识别和评估提供有效支撑。

关键词:综合旱情指数;地表水;土壤水;作物水;VIC-EPIC模型;湘江流域

中图分类号:P426.616 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0055-10

Study of comprehensive drought index based on water deficits of surface, soil, and crop // WU Zhiyong^{1,2}, ZHANG Jingjie¹, CHENG Dandan¹, FAN Siqi¹, HE Hai¹, LI Yuan¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The occurrence and development of regional drought are affected by various water shortage processes such as surface water, soil water and crop water. The drought index based on a single water shortage process in the past is difficult to reflect the actual drought. It is of great significance to effectively carry out regional drought monitoring by comprehensively considering various water shortage processes to construct a comprehensive drought index. Based on the simulation data of hydrological crop coupling model (VIC-EPIC), a comprehensive drought index (CDSI) reflecting the combined water deficit of surface-soil-crop was constructed by linear weighted integrated standardized runoff index (SRI), soil water content anomaly index (SMAPI) and crop water deficit index (CWDI). The application research was carried out in Xiangjiang River Basin based on the data from 1981 to 2020. The results showed that the correlation between the drought characteristic sequence based on CDSI and the drought rate of 35 counties in the basin from 1990 to 2007 was between 0.4 and 0.8, and 82.9% of them passed the 5% significance level test. Compared with SRI, SMAPI and CWDI, which reflect a single water deficit, the correlation has been greatly improved. CDSI can better reflect the occurrence and development of regional actual drought, and can provide effective support for accurate identification and evaluation of large-scale drought.

Key words: comprehensive drought situation index; surface water; soil water; crop water; VIC-EPIC model; Xiangjiang River Basin

干旱是我国最严重的自然灾害之一,是影响农业经济发展的重要因素^[1]。构建完备的干旱监测体系,实时、精确地评估区域干旱程度和影响,对降低干旱灾害造成的经济损失有着重要的理论与现实意义^[2]。由于干旱的发生发展过程难以直接观测,

通常会使用干旱指数来客观、定量、合理地反映区域干旱状况^[3]。

传统的干旱指数一般通过反映降水、土壤水、地表水、作物水等某一水分过程的盈亏构建,来主要反映气象干旱、农业干旱和水文干旱等某一类型干

旱^[4]。然而,区域的干旱过程往往受多种因素的综合影响,仅反映单一水分亏缺的指数,对区域干旱过程的描述较为片面,较难反映区域实际旱情。如,土壤含水量距平指数(soil moisture anomaly percentage index, SMAPI)通过反映土壤水分的亏缺对作物生长的影响,常用于农业旱情的监测与评估^[5-6],但未能直接考虑作物生长过程实际需水量的差异对旱情的影响。为更好地反映区域实际旱情,考虑多种水分亏缺过程共同影响,通过多种方法构建综合旱情指数(comprehensive drought situation index, CDSI)越来越受到关注。如,王慧敏等^[7]基于多时间尺度标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和湿润度指数发展综合气象干旱指数;闫桂霞等^[8]结合标准化降水指数和帕默尔旱度指数(Palmer drought severity index, PDSI)提出综合气象干旱指数;黎小燕等^[9]基于降水蒸发散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、土壤含水量距平指数、标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)构建综合干旱指数等。然而,这些综合指数没有考虑下垫面的受旱对象,仍然反映的是干旱而非旱情,而有无旱情、旱情严重程度等信息,对指导农业生产和城市生活更具有现实意义。

目前,综合指数构建的方法^[2]主要有:①线性组合法。这是最常见的综合指数构建方法^[10-11],通过对单一干旱指数加权得到综合指数,计算简单且灵活通用。该法常根据需求确定指数因子和权重系数,有学者通过分析与基于站点的干旱指数或实际干旱造成的影响(作物受旱面积、土壤湿度等)的相关性确定权重系数来构建综合指数,如 Lu 等^[12]构建的 ISDI(integrated scaled drought index)综合指数在美国干旱事件监测方面取得了较好效果。②Copula 联合分布法^[13-14]。该方法通过构造多个存在复杂物理联系的单一干旱指数的联合分布函数得到综合指数。既保留了各指数本身的边际分布,又能描述多种干旱指数之间的依存关系,有利于进行短期风险评估。③基于大数据驱动的机器学习法^[15-17]。该方法通过挖掘各指数之间的关系,高效处理多种信息,为无资料地区旱情监测提供了有效途径。

本文从地表水、土壤水及作物水对区域旱情的影响出发,融合气象、水文、土壤、植被及作物等多源信息,采用线性组合法构建基于标准化径流指数(SRI)、土壤含水量距平指数(SMAPI)和作物缺水指数(CWDI)的综合旱情指数(CDSI)。受季风气候

和地形地貌的影响,湘江流域降水量的时空分配不均匀且降水蒸发不同步,干旱灾害成为湘江流域影响严重的自然灾害之一,湖南省在 2013、2019 年分别遭遇了不同严重程度旱灾,受影响的土地面积超过 23 333.3 hm²。本文选取湘江流域验证 CDSI 指数对干旱事件的反映能力,以流域内 35 个县实际受旱率为参考指标,分析了基于 CDSI 和单一旱情指数(SRI、SMAPI、CWDI)系列提取的干旱特征与区域受旱率之间的相关性,验证了 CDSI 对区域旱情识别和评估的能力。

1 研究方法

1.1 反映单一水分亏缺的干旱指数

a. 标准化径流指数 SRI。SRI 主要反映区域地表水分亏缺过程引起的干旱。根据林青霞^[18]的研究成果,计算 SRI 指数时采用对数正态分布来描述流量的变化,计算公式为

$$I_{SRI,y,d} = \frac{\ln Q_{y,d} - \overline{\ln Q_d}}{\delta(\ln Q_d)} \quad (1)$$

式中: $I_{SRI,y,d}$ 为第 y 年第 d 日的标准化径流指数, $\ln Q_d$ 为第 y 年第 d 日的流量对数值; $\overline{\ln Q_d}$ 为第 d 日流量对数系列的均值, $\delta(\ln Q_d)$ 为第 d 日流量对数系列的均方差。

SRI 的时间尺度体现在考虑前期流量对当前旱情的影响上,前期径流亏缺对当前水文干旱形势的影响将随着历时增加而降低,常采用线性递减权重方法来计算不同时间尺度的累积流量,计算公式为

$$Q_d = \sum \frac{i+n-j}{n} Q_i \quad (i = j - n + 1, \dots, j) \quad (2)$$

式中: Q_d 为第 d 日的累积流量; n 为 SRI 指数的时间尺度; Q_i 为第 i 日的流量累积值。

b. 土壤含水量距平指数 SMAPI(soil moisture anomaly percentage index)^[19]。SMAPI 主要反映土壤水分亏缺过程引起的干旱。该指数考虑了土壤含水量与其同期气候均值的差异,使用距平相对值来反映土壤含水量偏离正常水平的程度。计算公式见式(3),SMAPI 数值越小,表明土壤水分低于正常水平的程度越大,则干旱越严重。取 -5% 作为干旱发生的阈值,SMAPI 低于 -5% 即视为发生干旱。

$$I_{SMAPI} = \frac{I_{SM} - \bar{I}_{SM}}{\bar{I}_{SM}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: I_{SMAPI} 为土壤含水量距平指数; I_{SM} 为时段土壤含水率,%; $\bar{I}_{SM}$ 为该时段同期气候平均的土壤含水率,%。

c. 作物缺水指数 CWDI(crop water defect

index)^[20-22]。CWDI 主要反映作物水分亏缺过程引起的干旱。从作物的水分供需关系反映干旱状况, 当作物处于持续缺水状态时就会形成农业旱情。作物的需水量可用作物模型模拟的作物潜在蒸发表示, 耗水量则以作物实际蒸散量代替^[20]。计算公式为

$$I_{WDj} = \frac{I_{ETj} - I_{ETCj}}{I_{ETCj}} \times 100\% \quad (j=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

$$I_{CWDIj,N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{WDj-N+i} \quad (5)$$

$$I_{CWDI} = \max(I_{CWDIj,N}) \quad (6)$$

式中: I_{WDj} 为第 j 天的缺水率, %; I_{ETj} 为第 j 天的作物实际散发量, 即作物耗水量, mm; I_{ETCj} 为第 j 天的作物潜在散发量, 即作物需水量, mm; $I_{CWDIj,N}$ 为第 j 天前 N 天的平均缺水率, 本文 N 取 30 d, 代表前期 1 月的累积缺水影响天数; I_{CWDI} 为 N 天平均缺水率日序列在月内的最大值; M 为每个月的天数。

1.2 综合旱情指数构建

区域干旱的发生是多种类型水分亏缺过程累积影响的结果, 具有渐变性, 一般具有较长的历时。干旱发生的初期, 对受旱对象产生的影响较小, 一般旱情较轻; 当干旱持续, 对受旱对象造成的影响逐渐变大, 旱情不断加重。因此, 研究选用月尺度 SMAPI 和 CWDI 来反映土壤环境和作物一段时间缺水对干旱发生发展的影响; 选用不同时间尺度的 SRI 反映不同来源的地表水分的亏缺过程。利用 3 月尺度的 SRI_3 反映地面径流和中小型蓄水设施的可供水量亏缺过程, 利用 6 月尺度的 SRI_6 反映流域基流条件及大型蓄水设施的可供水量变化^[23]。由于各单一干旱指数分析同一地区的干旱状况或直接进行综合时, 会存在量级不统一的情况。经过多次测试, 确定 SMAPI 的缩放阈值为 35, SRI 的缩放阈值为 8。采用计算简便且适用性好的线性组合法, 构建考虑地表水、土壤水、作物水联合亏缺的综合旱情指数 CDSI。具体的计算公式为

$$I_{CDSI} = aI_{SMAPI} + bI_{CWDI} + cI_{SRI_3} + dI_{SRI_6} \quad (7)$$

式中: I_{CDSI} 为构建的综合旱情指数; I_{SMAPI} 为土壤含水量距平指数月序列; I_{CWDI} 为作物水分亏缺指数月序列; I_{SRI_3} 、 I_{SRI_6} 分别为 3 月、6 月尺度的标准化径流指数月序列; a 、 b 、 c 、 d 为对应的权重系数, 计算公式分别为 $a_1/(a_1 + b_1 + c_1 + d_1)$ 、 $b_1/(a_1 + b_1 + c_1 + d_1)$ 、 $c_1/(a_1 + b_1 + c_1 + d_1)$ 、 $d_1/(a_1 + b_1 + c_1 + d_1)$, 其中 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 分别为 SMAPI、CWDI、SRI_3、SRI_6 月序列的年极小值与受旱率的相关系数。

综合旱情指数 CDSI 考虑了多种水分的联合亏缺, 其本质仍是反映水分的盈亏状况。CDSI 值越接

近负值表示水分亏缺越严重, 接近正值则表示水分处于盈余状态。本文参照作物缺水率的分级标准 SL 424—2008《旱情等级标准》确定各旱情等级对应的综合旱情指数阈值, 作为综合旱情指数划分旱情等级的标准: $I_{CDSI} > -5\%$ 为无旱; $-20\% < I_{CDSI} \leq -5\%$ 为轻度干旱; $-35\% < I_{CDSI} \leq -20\%$ 为中度干旱; $-50\% < I_{CDSI} \leq -35\%$ 为重度干旱; $I_{CDSI} \leq -50\%$ 为极端干旱。

2 综合旱情指数应用与验证

2.1 数据来源

研究区域为湘江流域, 属于亚热带季风区, 受季风气候和地形地貌的影响, 降水量时空分布不均匀, 在空间上呈现上游多下游少、南多北少的特征, 在时间上表现为春夏多雨、秋冬干旱, 年内和年际之间变化很大。由于降水时空分布的不均匀性和降水蒸发的不同期性, 干旱灾害成为湘江流域主要自然灾害之一。湘江流域及站点分布如图 1 所示。

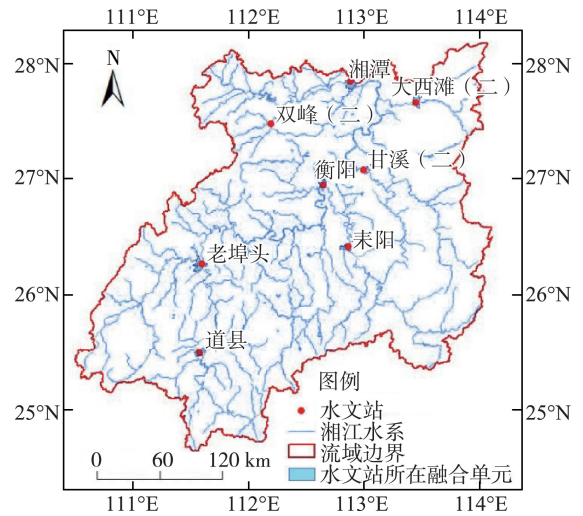


图 1 湘江流域代表性水文站点

Fig. 1 Representative hydrological stations in the Xiangjiang River Basin

综合指数构建所需数据采用 VIC-EPIC 水文作物耦合模型^[20]模拟, 包括 5 km 网格尺度的流量、土壤含水量、作物需水耗水量等数据。VIC-EPIC 水文作物耦合模型由广泛应用于大范围干旱模拟监测的 VIC 大尺度水文模型^[24], 与参数数据集丰富且能很好模拟作物生长过程的 EPIC 作物模型双向耦合, 有效提高了作物蒸散发及土壤含水量的模拟, 能够输出模拟单元上地表水、土壤水和作物水等多个水分变化过程^[21]。VIC-EPIC 模型构建的详细介绍, 可参见文献[20-21]。耦合模型的驱动数据为地面站点观测日值数据, 包括 1981—2020 年气温、降水

和风速等资料;模型的土壤、植被等参数基于 Reynolds 等构建的土壤数据库,以及马里兰大学全球 1 km 土地覆盖数据等确定;模型的水文参数通过流域出口断面的实测流量数据率定。模型模拟结果验证如下:

a. 流量过程模拟结果。采用流域内湘潭、甘溪(二)、大西滩(二)等 8 个水文站的 2009—2017 年的实测流量过程对 VIC-EPIC 模型模拟结果进行验证,结果如表 1 所示。耦合模型对流量过程线模拟效果总体较好,大部分水文站点的流量效率系数高于 0.50,出口断面湘潭站达到 0.81;除双峰站,其余各站的流量相对误差都在 20% 之内。

b. 土壤含水量模拟结果。采用流域内 22 个墒情站 2013—2017 年的 3 个土层深度的实测土壤含水量资料对 VIC-EPIC 模型模拟结果进行验证,误差

表 1 湘江流域各水文站流量模拟验证结果
Table 1 Evaluation results of flow simulation of hydrological stations in the Xiangjiang River Basin

水文站	RE/%	NSE
湘潭	7.56	0.81
甘溪(二)	3.20	0.73
大西滩(二)	-1.80	0.59
双峰(二)	42.70	0.51
道县	-19.0	0.59
老埠头	-17.0	0.68
衡阳	-0.10	0.77
耒阳	-3.70	0.31

指标统计结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,0~40 cm 土层模拟土壤含水量与实测值的相关性最好,大部分站点相关系数在 0.60 以上,属于强相关,而 0~10 cm、0~20 cm 的土壤含水量相关性在 0.40~0.60

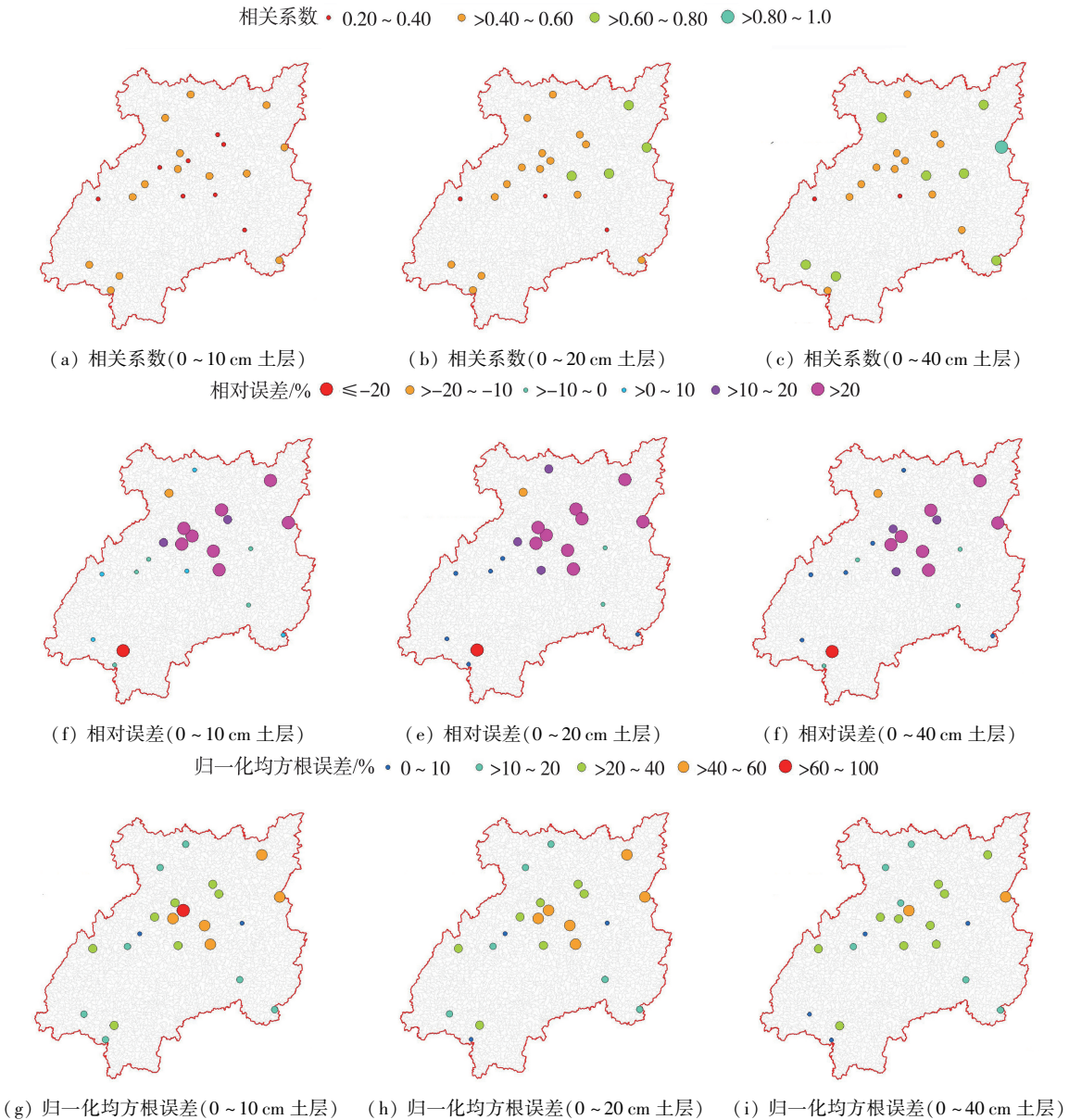


图 2 湘江流域各层土壤含水量模拟值与墒情站实测值验证结果

Fig. 2 Evaluation of simulated and measured soil moisture of each layer in Xiangjiang River Basin

范围内,为中度相关。相对误差集中在 $\pm 20\%$ 以内,在合理范围内,个别墒情站的误差较大,模拟土壤含水量偏高;归一化均方根误差对异常值更为敏感,变幅大于相对误差,0~40 cm土层的归一化均方根误差基本在0~20%之间,相对于其他土层的模拟偏差较小。

c. 蒸散发模拟结果。基于国家青藏高原科学数据中心(TDPC)发布的地表逐月蒸散发产品,时间为1982—2017年,分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,采用相关系数、相对误差以及归一化均方根误差验证模型模拟的蒸散发精度,结果如图3所示。从图3可以看出,模拟蒸散发与TDPC产品在整个流域的相关性很高,相关系数基本在0.80以上;相对误差维持在 $\pm 40\%$ 以内,其中,中上游模拟的蒸散发偏大,下游模拟的偏小;归一化均方根误差在大部分地区的取值均在25%~40%之间。因此,模型模拟的蒸散发与遥感反演的蒸散发在时间序列变化趋势上具有较好的一致性。

2.2 权重确定

基于VIC-EPIC模型模拟结果,分别计算SRI、SMAPI和CWDI,并分析它们与实际受旱率的相关性。由于实际受旱率反映的是该县当年遭遇的最严重旱情,因此,将各指数的时空尺度统一到县尺度和年尺度后,再与受旱率序列做相关性分析,结果如表2所示。CWDI与受旱率的相关系数分布较为集中,整体相关性更好,74.3%的县均通过了0.1水平显著性检验。SMAPI指数与受旱率的相关性分析结果显示,SMAPI与受旱率的相关系数在0.41上下浮动,22个县通过0.1显著性检验,这是因为SMAPI仅反映土壤水分亏缺,未考虑作物对水分亏缺的响应,对实际旱情的反映存在滞时。SRI_3、SRI_6表征前期3~6月径流来水对当月的旱情发展影响较大,在一定程度上体现了水库蓄水对旱情的缓解作用,与受旱率的相关性显著性检验效果略低于

SMAPI,通过0.1显著性检验的比例在45%以上。

在使用线性组合方法构建综合旱情指数时,权重系数的确定对综合旱情指数的应用效果影响较大。考虑到耕作制度和抗旱水源的区域性差异,各县区权重系数的取值也会有所不同。对具有完整可靠旱情统计资料的35个县区,根据各指数与其年受旱率的相关系数比例,确定各指数分量的权重系数,结果如表2所示。

2.3 综合旱情指数验证

研究选取3月和6月的SRI指数,以及1月尺度的CWDI和SMAPI为指数分量,采用2.2节方法确定权重,构建综合旱情指数CDSI。代表性区域1981—2020年逐月的CDSI系列过程线如图4所示。从图4可以看出,综合旱情指数CDSI反映的湘江流域旱情存在较为明显的年代际差异,20世纪80年代干旱频发,每2~3a就会出现一次旱情;20世纪90年代流域干湿状态发生转变,涝多于旱;进入21世纪以来,干旱发生频率明显升高^[25],如2003年、2007年、2009年、2011年、2013年等均发生了干旱。

为了验证综合旱情指数对实际受旱情况的反映能力,对1990—2007年的综合旱情指数月序列取年极小值,与各县受旱率进行相关性分析,相关系数及显著水平的空间分布如图5所示。从图5可以看出,除个别县相关系数低于0.4,其他各县均保持在0.4~0.8之间,相较于CWDI、SMAPI、SRI_3、SRI_6,综合旱情指数与受旱率的相关性在整体上有了很大的提升,表现出显著相关。表3为各干旱指数与综合旱情指数的显著性检验结果,通过0.05水平显著性检验的县有29个,占比82.9%。相较单一干旱指数中显著性最好的CWDI指数提高了近一倍,说明考虑多种水分联合亏缺的综合旱情指数比仅考虑单一水分亏缺的干旱指数更能反映实际旱情的变化过程。

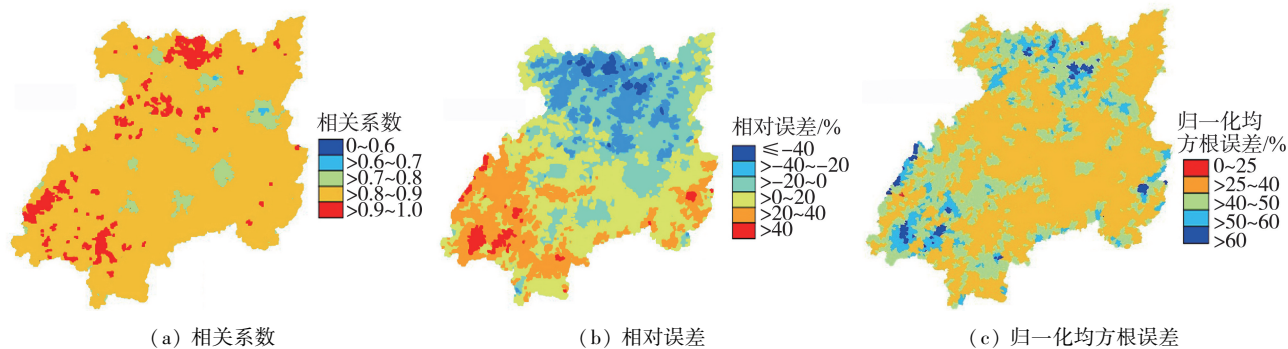


图3 湘江流域模拟蒸散发与TDPC蒸散发产品的相关性及误差统计

Fig.3 Correlation and error statistics of simulated evapotranspiration and TDPC evapotranspiration products in the Xiangjiang River Basin

表 2 湘江流域各县区单一干旱指数权重系数

Table 2 Weight coefficient of single drought index in counties of the Xiangjiang River Basin

县区	与受旱率相关性				权重系数			
	CWDI	SMAPI	SRI_3	SRI_6	CWDI	SMAPI	SRI_3	SRI_6
株洲市区	0.60	0.36	0.15	0.16	0.472	0.283	0.118	0.126
渌口区	0.54	0.46	0.59	0.50	0.258	0.22	0.282	0.239
醴陵市	0.43	0.64	0.40	0.45	0.224	0.333	0.208	0.234
湘潭县	0.74	0.67	0.36	0.29	0.359	0.325	0.175	0.141
湘乡市	0.61	0.45	0.43	0.32	0.337	0.249	0.238	0.177
韶山市	0.38	0.23	0.23	0.35	0.319	0.193	0.193	0.294
衡阳市区	0.34	0.50	0.19	0.31	0.254	0.373	0.142	0.231
衡山县	0.53	0.65	0.57	0.48	0.238	0.291	0.256	0.215
衡阳县	0.42	0.39	0.51	0.63	0.215	0.200	0.262	0.323
衡南县	0.44	0.41	0.54	0.69	0.212	0.197	0.260	0.332
祁东县	0.77	0.58	0.56	0.56	0.312	0.235	0.227	0.227
耒阳市	0.44	0.15	0.26	0.08	0.473	0.161	0.280	0.086
常宁市	0.41	0.43	0.31	0.33	0.277	0.291	0.209	0.223
北湖区	0.44	0.46	0.12	0.21	0.358	0.374	0.098	0.171
苏仙区	0.56	0.53	0.02	0.11	0.459	0.434	0.016	0.090
桂阳县	0.74	0.41	0.44	0.47	0.359	0.199	0.214	0.228
永兴县	0.82	0.63	0.30	0.18	0.425	0.326	0.155	0.093
嘉禾县	0.40	0.32	0.48	0.41	0.248	0.199	0.298	0.255
桂东县	0.29	0.49	0.25	0.29	0.220	0.371	0.189	0.220
安仁县	0.73	0.40	0.33	0.25	0.427	0.234	0.193	0.146
资兴市	0.85	0.14	0.42	0.40	0.470	0.077	0.232	0.221
零陵区	0.39	0.49	0.42	0.50	0.217	0.272	0.233	0.278
冷水滩区	0.60	0.41	0.38	0.48	0.321	0.219	0.203	0.257
祁阳县	0.60	0.65	0.46	0.45	0.278	0.301	0.213	0.208
东安县	0.44	0.64	0.52	0.48	0.212	0.308	0.250	0.231
双牌县	0.38	0.35	0.06	0.20	0.384	0.354	0.061	0.202
道县	0.66	0.45	0.46	0.52	0.316	0.215	0.220	0.249
江永县	0.18	0.37	0.42	0.41	0.130	0.268	0.304	0.297
宁远县	0.38	0.13	0.16	0.08	0.507	0.173	0.213	0.107
蓝山县	0.17	0.16	0.31	0.09	0.233	0.219	0.425	0.123
新田县	0.41	0.13	0.14	0.02	0.586	0.186	0.200	0.029
江华县	0.63	0.26	0.43	0.43	0.360	0.149	0.246	0.246
娄星区	0.48	0.53	0.45	0.34	0.267	0.294	0.250	0.189
双峰县	0.54	0.54	0.48	0.40	0.276	0.276	0.245	0.204
涟源市	0.46	0.47	0.26	0.36	0.297	0.303	0.168	0.232

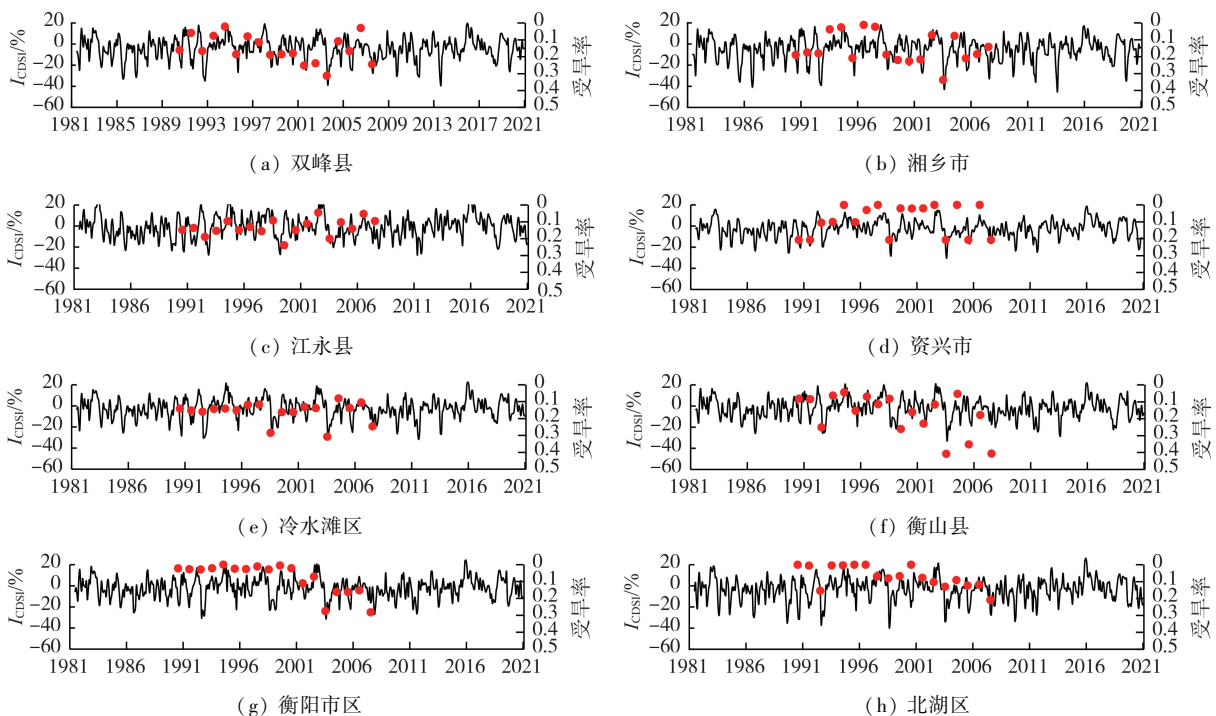
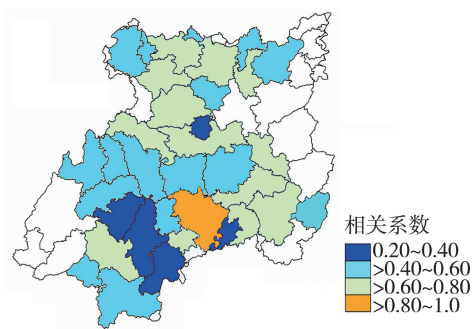
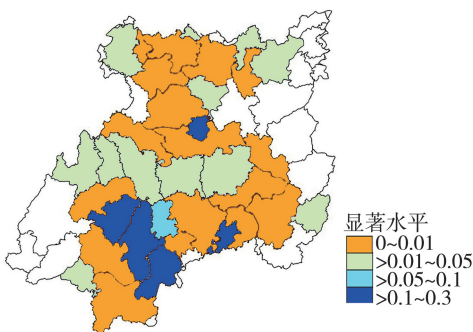
— I_{CDSI} • 受旱率

图 4 湘江流域代表县区 1981—2020 年逐月 CDSI 指数变化过程线

Fig. 4 Monthly CDSI index variation of representative counties in the Xiangjiang River Basin from 1981 to 2020



(a) 相关系数



(b) 显著水平

图5 湘江流域县区综合旱情指数与受旱率的相关性空间分布

Fig.5 Spatial distribution of correlation comprehensive drought index and drought rate in counties of the Xiangjiang River Basin

表3 综合旱情指数及各单一干旱指数与受旱率的相关性显著检验结果对比

Table 3 Comparison of significant test results between comprehensive drought index and single drought index and drought rate

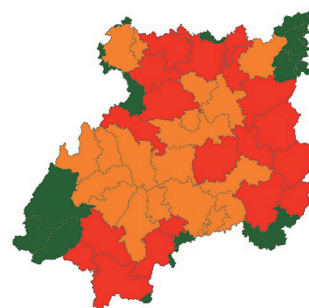
干旱(旱情)指数	0.05 显著水平		0.1 显著水平	
	通过检验的 县区数/个	通过检验 百分比/%	通过检验的 县区数/个	通过检验 百分比/%
CWDI	17	48.6	26	74.3
SMAPI	14	40.0	22	62.9
SRI_3	8	22.9	17	48.6
SRI_6	10	28.6	16	45.7
CDSI	29	82.9	30	85.7

2.4 农业旱情特征空间分布规律

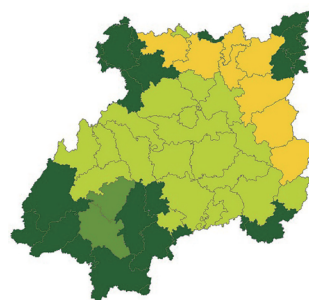
2.4.1 不同旱情等级农业干旱发生频率空间分布特征

由于流域降水期与作物生长需水期不一致,形成了农业旱情阶段性特点^[26]。降水空间分布的不均匀性与土壤质地差异导致了区域性的资源短缺^[27-28]。基于旱情等级划分标准,对不同县区进行统计,得到1980—2020年流域不同旱情等级发生频率分布图,如图6所示。从图6可以看出,大部分地区轻度干旱的发生频率在28%左右,流域上游永州市等12个县区为25%~28%,株洲市、衡阳市等13

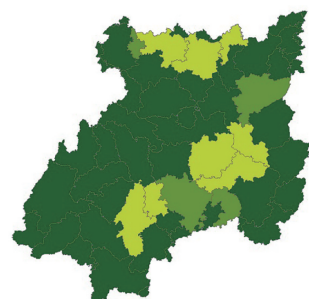
发生频率/% 0~0.5 >0.5~1.0 >1.0~10 >10~20 >20~30 >30~33.5



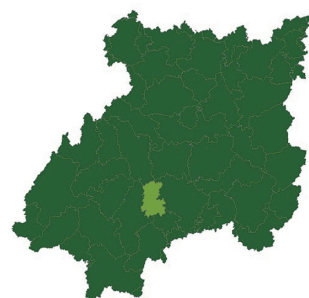
(a) 轻度旱情



(b) 中度旱情



(c) 严重旱情



(d) 极度旱情

图6 湘江流域不同等级旱情发生频率分布

Fig.6 Frequency distribution of different grades of drought in the Xiangjiang River Basin

个县区超过了30%;中度干旱发生的频率相对较低,流域下游株洲市、湘潭市较高(10%~18%),其他地区均在10%以下,湖南省东南部最低(<2%);严重干旱发生的频率整体较少,均处于5%以下,湘乡市、耒阳市、永兴县等6个地区相对严重(>1.1%),大部分地区均在1%以下;对于极端干旱,整个流域发生很少,只有在新田县发生频率为

0.42%,这是由于山丘局部地区易受持续性晴热高温少雨天气的影响,会发生较为严重的夏秋连旱^[1,29]。

根据实际旱情资料记载,湘西地区夏季多雨^[30],干旱程度相对较低;湘南的夏秋季容易遭受台风等强冷空气的影响,降雨较多,干旱容易得到缓解^[30];在衡阳等湖南省盆地地区,土壤储水保水量较低,是典型的干旱走廊^[28]。罗玉琳^[31]描述整个湘江流域大部分地区轻度、中度旱情发生频率较大,西北及中部地区旱情发生频率普遍偏低,且常为轻度旱情^[32];株洲等东北部地区旱情发生频率较高,以中度旱情为主^[33];南部地区如郴州、永州等以重度旱情为主^[29]。由此可见,CDSI的旱情评估结果与实际旱情资料记录、前人研究结果一致。

2.4.2 区域旱情强度空间分布特征

湘江流域1980—2020年区域干旱平均强度分布情况如图7所示。流域干旱强度空间差异性较小,流域下游西岸和湖南省东南部强度最高,中部地区强度比较平均。南部多个县区易发生长达10个月的旱情,尤其是6—9月的夏旱、10月至次年1月的秋冬连旱,刘冰冰等^[1]、曾波^[26]、罗玉琳^[31]的研究也表明,严重干旱主要集中在流域北部与南部。

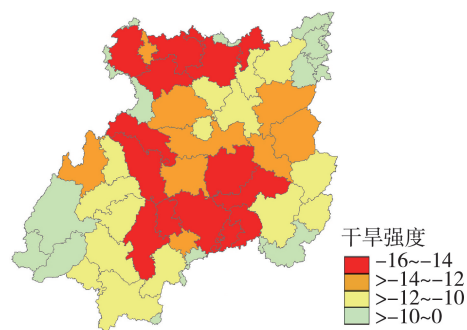


图7 湘江流域1980—2020年干旱强度分布

Fig.7 Drought intensity distribution of the Xiangjiang River Basin from 1980 to 2020

3 结论

a. 针对单一干旱指数无法全面评估实际的干旱状况,选取SRI、SMAPI以及CWDI 3种反应单一水分亏缺的干旱指数,通过分析与年受旱率的相关性确定权重系数,构建了基于地表-土壤-作物水分联合亏缺的综合旱情指数CDSI,并采用1981—2020年数据在湘江流域开展了应用研究。

b. 相较于反应单一水分亏缺的干旱指数,基于CDSI提取的旱情特征序列与流域内35个县1990—

2007年受旱率相关性在0.4~0.8之间,82.9%通过5%显著性水平检验,在整体上有了很大的提升。结果表明,考虑多种水分联合亏缺的综合旱情指数CDSI比仅考虑单一水分亏缺的干旱指数更能反映实际旱情的变化过程,可为干旱风险管控提供更有利的决策支持。

c. 从湘江流域不同旱情等级农业干旱发生频率空间分布可以看出,流域下游的湘潭县、株洲市等地区易发生干旱,且发生轻度、中度农业干旱的频率最高。从湘江流域干旱强度分布图可以看出,农业旱情强度总体上差异性不大,其中耒阳市和新田县干旱强度最高,发生旱情的概率较大。

参考文献:

- [1] 刘冰冰,曾永年. 湖南省严重农业旱情时空变化遥感监测与影响分析[J]. 自然灾害学报,2015,24(6):72-79. (LIU Bingbing, ZENG Yongnian. Remote sensing monitoring and effect analysis of spatiotemporal change of severe agricultural drought in Hunan Province[J]. Journal of Natural Disasters,2015,24(6):72-79. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. 应用气象学报,2022,33(5):513-526. (SONG Yanling. Research progress of global drought index[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022,33(5):513-526. (in Chinese))
- [4] 杨青,李兆元. 干旱半干旱地区的干旱指数分析[J]. 灾害学,1994(2):12-16. (YANG Qing, LI Zhaoyuan. Drought index analysis in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Catastrophology, 1994(2):12-16. (in Chinese))
- [5] 刘振男,焦卫国,王笑宇,等. 基于标准化土壤湿度指数的贵州省农业干旱评价[J]. 中国农村水利水电,2022(11):1-5,12. (LIU Zhennan, JIAO Weiguo, WANG Xiaoyu, et al. Evaluation of agricultural drought in Guizhou Province based on standardized soil moisture index[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(11):1-5,12. (in Chinese))
- [6] 杨丽萍,白宇兴,朱江山,等. 基于优选植被指数和TVDI的额济纳绿洲旱情监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2021,57(6):727-734. (YANG Liping, BAI Xingyu, ZHU Jiangshan, et al. Drought monitoring in Ejina oasis based on optimal vegetation index and TVDI[J].

- Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2021, 57(6):727-734. (in Chinese))
- [7] 王慧敏,郝祥云,朱仲元. 基于综合气象干旱指数的干旱状况分析:以锡林河流域为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (2): 326-329, 336. (WANG Huimin, HE Xiangyun,ZHU Zhongyuan. Analysis of drought condition based on integrated meteorological drought index;taking the Xilinhe River Basin as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(2):326-329,336. (in Chinese))
- [8] 闫桂霞,陆桂华,吴志勇,等. 基于 PDSI 和 SPI 的综合气象干旱指数研究[J]. 水利水电技术,2009,40(4): 10-13. (YAN Guixia, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Study on integrated meteorological drought index based on PDSI and SPI [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(4):10-13. (in Chinese))
- [9] 黎小燕. 综合干旱指数与干旱区划研究[D]. 南京:河海大学,2014.
- [10] RHEE J, IM J, CARBONE G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114:2875-2887.
- [11] XIA Y, EK M B, PETERS-LIDARD C D, et al. Application of USDM statistics in NLDAS-2: optimal blended NLDAS drought index over the continental United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2014,119:2947-2965.
- [12] LU J, CARBONE G J, GAO P. Mapping the agricultural drought based on the long-term AVHRR NDVI and North American Regional Reanalysis (NARR) in the United States, 1981-2013 [J]. Applied Geography, 2019, 104 (23):10-20. .
- [13] KAO S C, GOVINDARAJU R S. A Copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology,2010, 380: 121-134.
- [14] 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 Zhen. 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))
- [15] TADESSE T, WILHITE D A, HARMS S K, et al. Drought monitoring using data mining techniques;a case study for Nebraska, USA [J]. Natural Hazards,2004,33:137-159.
- [16] 杜灵通. 基于多源空间信息的干旱监测模型构建及其应用研究[D]. 南京:南京大学,2013.
- [17] 张婧娴,沈润平,郭佳. 不同数据挖掘方法在综合干旱监测模型构建中的应用研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39 (5): 1047-1056. (ZHANG Jingxian, SHEN Runping, GUO Jia. A study of application of different data mining methods in integrated drought monitoring[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39 (5): 1047-1056. (in Chinese))
- [18] 林青霞. 西江流域水文干旱演变规律及其与环境因子的交互影响研究[D]. 南京:河海大学,2018.
- [19] WU Z Y, LU G H, WEN L, et al. Reconstructing and analyzing China's fifty-nine year (1951-2009) drought history using hydrological model simulation[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(9):2881-2894.
- [20] 张宇亮,吴志勇,何海. 基于水文-作物耦合模型和 CWAPI 指数的农业干旱评估[J]. 水利学报,2022,53 (10):1168-1179,1193. (ZHANG Yuliang, WU Zhiyong, HE Hai. Agricultural drought assessment based on the coupled hydrology-crop growth model and CWAPI [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (10): 1168-1179,1193. (in Chinese))
- [21] 张宇亮. 耦合水文模型与作物模型的农业干旱评估方法研究[D]. 南京:河海大学,2020.
- [22] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34 (5): 1043-1052. (LI Bozhen, ZHOU Guangsheng. Advance in the study on drought index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (5): 1043-1052. (in Chinese))
- [23] 危润初,李淑雅,欧阳琦,等. 湖南省水库与干旱情势空间匹配关系研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32 (5):27-34. (WEI Runchu, LI Shuya, OUYANG Qi, et al. Spatial matching relationship between reservoirs and drought situation in Hunan Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32 (5): 27-34. (in Chinese))
- [24] 袁飞,章益棋,刘懿,等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. 水资源保护,2021,37(1):46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):46-52. (in Chinese))
- [25] 温馨,周纪,刘绍民,等. 基于多源产品的西南河流源区地表蒸散发时空特征[J]. 水资源保护,2021,37(3): 32-42. (WEN Xin, ZHOU Ji, LIU Shaomin, et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. Water Resources Protection,2021,37 (3):32-42. (in Chinese))
- [26] 曾波. 湖南省农业干旱空间分布研究[D]. 长沙:中南

林业科技大学,2014.

- [27] 白超海. 湖南省干旱成因分析及对策研究[J]. 中国防汛抗旱,2010,20(6):20-22,31. (BAI Chaohai. Cause analysis and countermeasures of drought in Hunan Province[J]. China Flood & Drought Management,2010,20(6):20-22,31. (in Chinese))
- [28] 尹建军,杨奇勇,尹辉. 湖南省农业旱灾灾情评估与分析[J]. 云南地理环境研究,2008(1):37-40. (YIN Jianjun,YANG Qiyong,YIN Hui. Assess and analysis on agriculture drought in Hunan [J]. Yunnan Geographic Environment Research,2008(1):37-40. (in Chinese))
- [29] 黎祖贤,周盛,樊志超,等. 湖南特大干旱时空变化特征分析[J]. 干旱气象,2018,36(4):578-582. (LI Zuxian,ZHOU Sheng,FAN Zhichao, et al. Analysis of temporal and spatial variation of extreme drought in Hunan Province [J]. Journal of Arid Meteorology,2018,36(4):578-582. (in Chinese))
- [30] 符静,旷微,邓运员,等. 湖南省近 56 年降水变化趋势及空间特征[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(2):110-119. (FU Jing,KUANG Wei,DENG Yunyuan, et al. Trends of precipitation variations and their

spatial patterns in Hunan Province over 56 years (1960-2015) [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2021,43(2):110-119. (in Chinese))

- [31] 罗玉琳. 基于遥感土壤水分和遥感降水的湘江流域干旱监测研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [32] 胡国华,李滔,盛丰,等. 基于降水量距平百分率的湘江流域干旱时空特征研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):74-82. (HU Guohua,LI Tao,SHENG Feng, et al. Characteristics and adaptation of drought in Xiangjiang River based on the percentage of precipitation anomalies [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2020,17(1):74-82. (in Chinese))
- [33] 李永亮,林辉,马延辉. 基于 MODIS 数据的湖南省旱情监测研究[J]. 水土保持研究,2010,17(2):111-114. (LI Yongliang,LIN Hui,MA Yanhui. Study on drought monitoring by using MODIS data in Hunan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2010,17(2):111-114. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-05 编辑:彭桃英)

(上接第 31 页)

- [13] YANG Liu,MENG Xuhui,KARNIADAKIS G E. B-PINNs: bayesian physics-informed neural networks for forward and inverse PDE problems with noisy data [J]. Journal of Computational Physics,2021,425:109913.
- [14] KHARAZMI E,ZHANG Zhongqiang,KARNIADAKIS G E. hp-vPINNs:variational physics-informed neural networks with domain decomposition [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2021,374:113547.
- [15] 王昀卓. 求解偏微分方程的神经网络方法[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [16] 李野,陈松灿. 基于物理信息的神经网络:最新进展与展望[J]. 计算机科学,2022,49(4):254-262. (LI Ye,CHEN Songcan. Physics-informed neural networks: recent advances and prospects [J]. Computer Science,2022,49(4):254-262. (in Chinese))
- [17] MAO Zhiping,JAGTAP A D,KARNIADAKIS G E. Physics-informed neural networks for high-speed flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2020,360:112789.
- [18] 尧少波,何伟峰,陈丽华,等. 融合物理的神经网络方法在流场重建中的应用[J]. 空气动力学报,2022,40(5):30-38. (YAO Shaobo,HE Weifeng,CHEN Lihua, et

al. Physics informed neural network in flowfield reconstruction [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2022,40(5):30-38. (in Chinese))

- [19] WANG Yongji,LAI Chingyao,GÓMEZ-SERRANO J, et al. Asymptotic self-similar blow-up profile for 3-D Euler via physics-informed neural networks[J/OL]. Arxiv Math. [2022-04-02]. <https://arxiv.org/abs/2201.06780>.
- [20] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):11-19. (ZHANG Ting,XU Binxin,KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):11-19. (in Chinese))
- [21] 张雪,王新宏,董梁,等. 基于有限差分法的跌坎冲刷一维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1):172-178. (ZHANG Xue,WANG Xinhong,DONG Liang, et al. One-dimensional numerical simulation of riverbed headcut erosion process based on finite difference method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2021,32(1):172-178. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-03 编辑:王芳)