

基于流域储水量精细化模拟的干旱指数构建及应用

何海¹, 白博宇^{1,2}, 刘杨合³, 李瞳⁴, 徐健¹, 李源¹, 吴志勇¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 黄河水利委员会河南水文水资源局, 河南郑州 450003;
3. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443000; 4. 河南水利投资集团有限公司, 河南郑州 450002)

摘要:为构建一种客观反映河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量联合亏缺的干旱指数,以秦淮河流域为研究区,基于500 m×500 m分辨率的VIC-FLASH模型,通过精细化模拟流域河道、水库和土壤中存储水量的变化过程,构建了标准化流域储水指数(SWSI),并应用SWSI对1980—2019年秦淮河流域历史干旱事件和干旱特征进行分析,验证了其可靠性和应用优势。结果表明:高分辨率VIC-FLASH模型可以较好地模拟流域储水量时空分布,流量过程模拟结果平均相对误差为10.6%,流域内6座水库实测与模拟蓄水量相关系数为0.53~0.86;SWSI可以准确识别干旱事件和反映区域干旱严重程度,干旱烈度与实际受旱面积的相关系数为0.88;1980—2019年逐日SWSI与标准化径流指数和土壤含水量距平指数的相关系数分别为0.89和0.98;SWSI不仅可以定量反映流域储水量的亏缺状态,而且可以更加客观地反映旱情时空演变过程。

关键词:干旱指数;河道槽蓄量;水库蓄水量;土壤含水量;VIC-FLASH模型;秦淮河流域

中图分类号:P426.616 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)05-0029-10

Construction of drought index based on high-resolution simulation of watershed water storage and its application// HE Hai¹, BAI Boyu^{1,2}, LIU Yanghe³, LI Tong⁴, XU Jian¹, LI Yuan¹, WU Zhiyong¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Henan Hydrology and Water Resources Bureau, Yellow River Water Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China; 4. Henan Water Conservancy Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to construct a drought index that can reflect the combined water deficit of river channel water storage, reservoir water storage, and soil moisture content, a standardized watershed water storage index (SWSI) was constructed based on VIC-FLASH (variable infiltration capacity-flexible large scale hydrological routing) model with a resolution of 500 m × 500 m. The reliability and advantages of SWSI were verified through its application in the Qinhuai River Basin to identify historical drought events and analyze drought characteristics from 1980 to 2019. The results showed that the high-resolution VIC-FLASH can well simulate the spatiotemporal distribution of water storage in the basin, with the average relative error of the flow process simulation being 10.6%, and the correlation coefficients between the measured and simulated water storage of six reservoirs in the basin were 0.53 to 0.86. SWSI can accurately identify drought events and reflect the severity of regional drought, with the obtained correlation coefficient between the drought severity and the actual area affected by drought reaching 0.88, and the correlation coefficients of daily SWSI with standardized runoff index and soil moisture anomaly percentage index from 1980 to 2019 were 0.89 and 0.98, respectively. SWSI can not only quantitatively and objectively reflect the deficit state of water storage in the basin, but also describe the spatiotemporal evolution process of drought more objectively.

Key words: drought index; river channel water storage; reservoir water storage; soil moisture content; VIC-FLASH model; Qinhuai River Basin

干旱指数是监测、评估和研究干旱事件发生发展的基础,是表征干旱严重程度的重要指标。由于干旱影响因素复杂,且时间和空间跨度大,难以直接

采用水文变量进行干旱描述,客观、定量、合理的干旱指数研究一直是干旱研究领域的难点之一。

已有干旱指数可以分为单一干旱指数和综合干

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U2240225);长江电力股份有限公司科技项目(Z242302050)

作者简介:何海(1975—),女,研究员,博士,主要从事水文过程模拟研究。E-mail:hehai_hhu@hhu.edu.cn

通信作者:徐健(1977—),女,助理研究员,博士,主要从事智慧水利研究。E-mail:xujian@hhu.edu.cn

旱指数^[1]。单一干旱指数通常基于单一水分亏缺或异常情况来反映单一类型的干旱,如标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)通过降水亏缺来表征气象干旱,土壤含水量距平指数(soil moisture anomaly percentage index, SMAPI)通过土壤水分亏缺来反映农业干旱,标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)通过河道径流的亏缺来反映水文干旱。但在实际干旱发生过程中,不同水分之间存在互相补给关系,使得单一干旱指数难以综合反映干旱事件的多尺度特征及其带来的多重影响,尤其在南方湿润区,利用单一干旱指数进行干旱分析可能会造成对干旱情势的误判^[2]。综合干旱指数大多采用联合多种单一指数并赋予权重的方法来综合反映干旱情势。例如:通过综合 SPI 和土壤湿度指数构建表征生态状况的综合干旱指数^[3];通过综合降水距平百分率指数、SPI、河道来水量距平百分率指数和帕尔默干旱指数构建描述气象与水文干旱的综合干旱指数^[4];通过加权不同时间尺度 SRI、SMAPI 和作物缺水指数,构建考虑地表-土壤-作物水分联合亏缺的综合旱情指数等^[5]。此外,在综合干旱指数中还有一类指数考虑了多种水分亏缺,从储水量角度揭示流域水量异常状况,评估流域的干旱特征。此类指数相比于采用赋权方法构建的综合干旱指数更具有物理基础,更能准确揭示干旱真实演变特征^[6]。由于真实的流域储水量信息难以获取,已有研究通过重力卫星观测数据验证了基于流域储水量监测干旱的可行性,越来越多基于储水量的干旱指数被用来反映区域干旱缺水程度,如储水量亏缺指数(total storage deficit index, TSDI)^[7]、总储水量(total water storage, TWS)指数^[8]等。但由于重力卫星反演的陆地水储量数据时空分辨率相对较低,在应用于中小流域干旱研究时仅能反映流域旱涝状态变化,对于干旱事件识别及特征分析的结果并不理想^[9-12]。

为了定量获取流域储水量,构建客观反映河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量联合亏缺的干旱指数,本文以秦淮河流域为研究区,基于高时空分辨率的 VIC-FLASH(variable infiltration capacity-flexible large scale hydrological routing)模型模拟了包含流域内河道、水库和土壤水分状态的流域储水量变化过程,构建了反映流域储水量异常的干旱指数——标准化流域储水指数(standardized watershed water storage index, SWSI)。应用 SWSI 对秦淮河流域 1980—2019 年历史干旱事件和干旱特征进行分析,验证 SWSI 的可靠性及应用优势,以期对干旱精细化识别和评估提供更可靠的支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

秦淮河流域位于长江下游江苏省境内西南部,流域面积 2 684 km²。流域属亚热带湿润、半湿润季风气候区,四季分明,多年平均降水量为 1 031 mm。降水量自北向南递增,年内分配不均匀,年际变化大。流域内分布着北山水库、句容水库等中小型水库 10 余座,另分布着赤山湖、卧龙湖等天然湖泊。秦淮河流域概况如图 1 所示。由于秦淮河流域低山丘陵和岗地占比 80%,天然蓄水能力较低,旱涝灾害发生频繁,历史干旱以伏旱和秋冬旱居多,对农业生产造成了严重的影响。

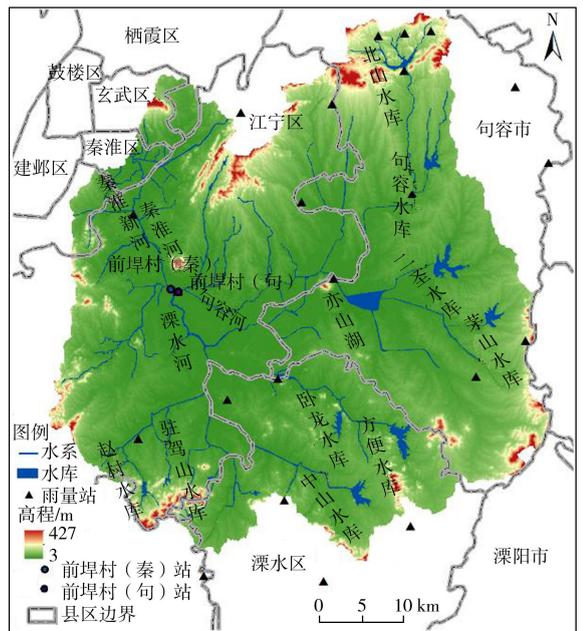


图 1 秦淮河流域概况

Fig. 1 Overview of the Qinhuai River Basin

1.2 数据来源

研究所需的气温、辐射、风速等气象资料来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>)逐日气象要素,降水资料摘自秦淮河流域 22 个雨量站实测时段雨量数据。为了模拟时程更精细的产汇流过程,本文将气象驱动文件的时间步长由 24 h 缩短为 6 h,即将逐日气象要素数据进一步划分为 4 个时段。流量资料摘自流域前埠村(秦)、前埠村(句)站 2009—2017 年汛期洪水摘录表,并将时段数据处理为日流量过程。植被数据来源于 NASA 网站发布的 500 m 分辨率 MODIS 遥感数据(<https://modis-land.gsfc.nasa.gov>),植被参数确定参考陆面数据同化系统(land data assimilation system, LDAS)成果。土地利用类型数据来源于 30 m 分辨率 Landsat 8 遥感数据(<http://www.gscloud.cn>),本文使用的数据成像

时间为 2015 年 3 月 10 日。地形资料摘自中国科学院云数据网站 (<http://www.csdb.cn>) 提供的中国区域 30m 分辨率 DEM 数据。

2 研究方法

2.1 流域储水量模拟方法

传统的流域储水量指流域内地表水、土壤水、地下水 and 冰雪水的总和。对于干旱研究而言,河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量是表征流域储水状态最直接的变量。本文通过构建秦淮河流域 500 m×500 m 分辨率的 VIC-FLASH 模型,在模型率定和验证基础上,模拟研究区 1980—2019 年网格化的土壤含水量、径流量和水库蓄水量,由此反映流域储水量。VIC 模型是网格化分布式水文模型,可以充分考虑降水、复杂下垫面、土地利用变化等因素的时空不均匀性,精细化刻画复杂下垫面条件下产流过程。FLASH 模型是具有灵活架构、参数自适应的大尺度精细化分布式汇流模型,通过子流域融合单元和分布式汇流参数解决了汇流模拟过程过于概化等问题,使模型在不同网格尺度下具有较高的模拟精度^[13]。

流域储水量模拟具体方法为:基于 Landsat 8 遥感数据提取秦淮河流域城镇、耕地和水体等精细化下垫面;利用 30 m 分辨率 DEM 数据提取更加真实的河网信息,通过网格与子流域融合的河网划分方法将流域划分为若干个子流域融合单元;结合扩散波解析法和河道特征参数公式完善汇流模型的结构和参数空间分布,在此基础上构建秦淮河流域高时空分辨率的 VIC-FLASH 模型。将水文模型输出的网格尺度流量模拟结果累积到日尺度,转化为逐日河道槽蓄量;通过网格尺度的逐日土壤含水量与网格单元面积(500 m×500 m)乘积,将模拟土壤含水量转化为逐日土壤含水量。将水库功能概化为防洪调度与兴利调度两个方面,汛期防洪调度按照水库水位-库容-下泄流量关系曲线进行调度,非汛期采用水库对周围城镇的供水方案和供水量进行统一供给,并结合水库死水位和兴利水位控制水库供水方案,由此确定水库蓄水量。网格尺度的河道槽蓄量、土壤含水量和水库蓄水量之和即为流域网格尺度的储水量。

2.2 SWSI 构建

对于非水库所在网格,流域储水量由土壤含水量和河道槽蓄量共同组成,因此储水量系列权重更接近径流量序列的分布特征。基于此,本文借鉴 SRI 的构建方法^[14],选择对数正态分布作为构建流域储水指数的函数分布,将其标准化后得到 SWSI:

$$I_{SWSI,d} = (\ln W_{y,d} - \overline{\ln W_d}) / \delta(\ln W_d) \quad (1)$$

式中: $I_{SWSI,d}$ 为第 y 年第 d 日 SWSI 值; $W_{y,d}$ 为第 y 年第 d 日储水量; $\overline{\ln W_d}$ 为第 d 日储水量对数序列的多年平均值; $\delta(\ln W_d)$ 为第 d 日储水量对数序列的均方差。

采用距平相对值反映流域储水量偏离正常值的干旱指数构建方法,可以实现逐网格逐日、月、年的干旱分析,具有较好的时空可比性。SWSI 越小,表示流域储水量低于同期正常水平的程度越大,干旱越严重。

考虑到 SWSI 主要通过流域内河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量的综合盈亏状态反映干旱情况,且与 SRI 一样进行了标准化变换,因此参照 SRI 的干旱等级划分标准确定 SWSI 干旱等级划分阈值,如表 1 所示。

表 1 SWSI 干旱等级划分阈值

Table 1 SWSI threshold for drought grade classification

干旱等级	SWSI 阈值	发生频率/%
无旱	>-0.5	68
轻旱	>-1~-0.5	15
中旱	>-1.5~-1	10
重旱	>-2~-1.5	5
特旱	≤-2	2

3 结果与分析

3.1 流域储水量模拟结果分析

3.1.1 模拟产流量空间分布

为验证流域储水量模拟结果的合理性,首先对实测降水量和模拟产流量的空间分布进行了比较。以秦淮河流域 20150615 场次洪水为例,图 2 为 2015 年 6 月 15—17 日秦淮河流域降水量和模拟产流量空间分布。从图 2 可以看出,本次降雨中心发

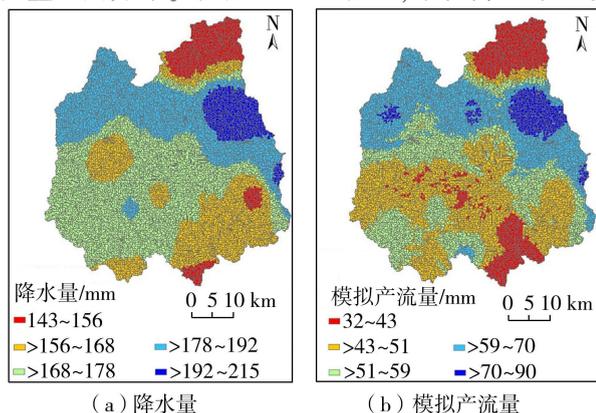


图 2 2015 年 6 月 15—17 日降水量和模拟产流量的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of precipitation and simulated runoff during Jun. 15 to 17, 2015

生在流域东北部,以网格为单元的降水量最大值为 215.0 mm;流域北部和南部降雨较少,最小值为 143.0 mm,降水量空间分布不均。产流量分布与降水量空间分布基本一致,尤其是降雨中心区和降雨低值区位置与产流高值区和低值区分布完全一致。此外,在流域西北部非降雨中心区也出现了产流高值区,分析其原因,该地区为城镇地区,下垫面硬化和不透水面积较大,在一定程度上导致降雨过程中产流量偏大。总体而言,高分辨率水文模型可以较好地模拟产流量的空间分布。

3.1.2 流量过程模拟结果

由于秦淮河流域存在武定门闸和秦淮新河闸双出口,缺水年份分别通过上述两个闸门从长江引水,受人类活动影响较大,实测资料难以获取。本文选取秦淮河流域上游句容河前圩村断面 7 场实测洪水过程进行模型参数率定,选取秦淮河前圩村断面 8 场实测洪水过程进行验证。流量过程模拟精度如表 2 所示,率定期平均相对误差为 9.8%,平均纳什效率系数(NSE)为 0.81;验证期平均相对误差为 11.3%,平均 NSE 为 0.85。

验证期场次洪水过程模拟结果如图 3 所示。验证期秦淮河前圩村断面 4 个年份 8 场洪水过程模拟结果中,NSE 最小值为 0.71(20150626 场次洪水),最大值为 0.96(20170610 场次洪水),表明模拟与实测流量过程具有很好的一致性,尤其是模拟结果

表 2 秦淮河场次洪水流量过程模拟精度

Table 2 Simulation accuracy of flood flow process in the Qinhuai River

断面	时期	洪水编号	相对误差/%	NSE
句容河前圩村	率定期	20150602	-8.8	0.74
		20150615	-27.9	0.76
		20150626	-4.9	0.89
		20160701	2.9	0.91
		20170610	-15.9	0.90
		20180705	2.9	0.75
		20180817	-5.5	0.74
秦淮河前圩村	验证期	20090707	-22.6	0.91
		20090721	-9.9	0.86
		20150602	2.0	0.93
		20150615	-16.8	0.80
		20150626	11.2	0.71
		20160701	14.4	0.87
		20170610	-1.7	0.96
		20170922	-11.5	0.80

的峰现时间与实测洪峰时刻基本吻合。从图 3 可以看出,2015 年和 2016 年汛期模拟流量相对偏大,2009 年和 2017 年汛期模拟流量相对偏小。分析其原因主要有两个方面:①受网格降雨数据空间插值方法影响。文中网格降雨数据是基于秦淮河流域 22 个雨量站逐小时实测降雨通过反距离权重插值方法获得。虽然反距离权重法能够反映出降雨的时空变异性,但是在对某一网格进行插值时,采用与该网格距离最近的多个实测雨量站所在位置距离倒数赋权重来获取该网格降水量,一定程度上会造成局

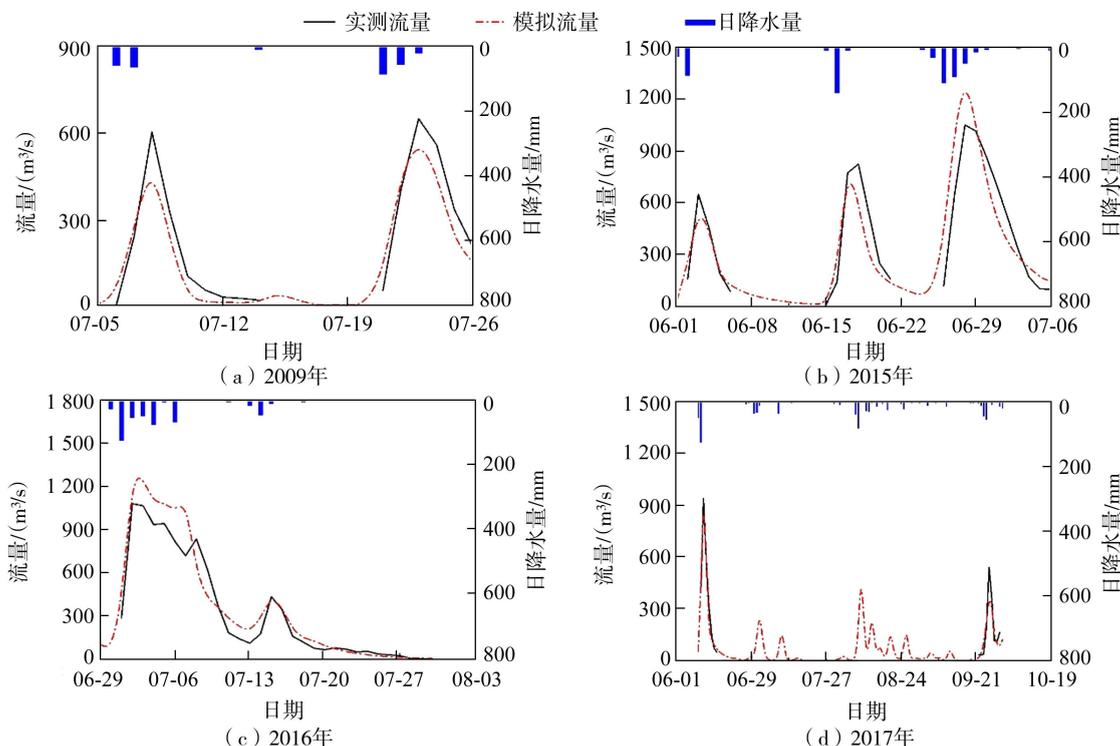


图 3 验证期场次洪水过程模拟结果

Fig. 3 Flood process simulation results in validation period

部降雨极值都位于实测站点处的现象,这与实际降雨中心分布并非完全一致。②受秦淮河流域水库、闸门等水利工程调度影响。秦淮河流域为特殊的双出口流域,双出口分别位于武定门闸和秦淮新河闸,其具有节制闸、抽水站等功能,运行和管理方式的资料难以获取,无法考虑其对水文过程模拟的影响。本文在水库模块构建时虽然同时考虑了水库汛期防洪调度和非汛期兴利调度的影响,但仍不能全面考虑水利工程对水文过程的影响。不同年份和月份,水库、闸门等水利工程的运行和管理方式不同,会导致模拟与实测流量的不一致性。总体而言,考虑复杂下垫面的高分辨率 VIC-FLASH 模型在秦淮河流域水文过程模拟中具有较好的适用性。

3.1.3 水库蓄水量模拟结果

为验证水库蓄水量的模拟效果,选取 2015 年秦淮河流域 6 座水库实测与模拟蓄水量进行对比,结果显示,北山、句容、二圣、茅山、方便、中山水库 2015 年实测蓄水量与模拟蓄水量的相关系数分别为 0.53、0.77、0.76、0.86、0.64、0.81,为中度及以上相关,其中茅山水库和中山水库为高度相关。北山和方便水库实测与模拟蓄水量相关系数偏低的主要原因是,这两座水库的兴利调度方式受人为因素影响偏大。如对于北山水库,当非汛期周围城镇供水不足时先由北山水库供水,当北山水库供水不足时,再由长江提水站提水补给北山水库。其调度方式受人为控制难以在模型中概化出明确的调度规则,进而影响了模拟效果。

图 4 为 2015 年秦淮河流域 6 座水库实测与模

拟蓄水量变化过程对比结果。从图 4 可以看出,各水库汛期蓄水量过程的模拟效果优于非汛期。分析其原因,汛期水库通常会根据入库流量以及蓄泄关系进行调蓄。本文采用的 VIC-FLASH 模型一方面通过精细化刻画下垫面和采用融合单元河网划分方法提高水库入库流量过程的模拟效果;另一方面基于水位-库容-下泄流量关系曲线建立蓄泄方程模拟汛期水库出流过程,可以较好地模拟水库蓄水量变化过程。而在非汛期,水库兴利调度受人为因素影响大,很难形成严格的兴利调度规则,且应急状态下水库供水和补库措施难以在模型中考虑。因此,非汛期水库蓄水量的模拟结果受到影响,但模型亦能够很好地反映出蓄水量的涨落趋势。总体而言, VIC-FLASH 模型能够较好地模拟秦淮河流域水库蓄水量及其变化过程。

3.1.4 秦淮河流域储水量分布特征

基于 VIC-FLASH 模型模拟河道径流量、土壤含水量和水库蓄水量,计算得到秦淮河流域 1980 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日逐日流域储水量。结果显示 1980—2019 年秦淮河流域日均流域储水量为 15.02 亿 m^3 ,年内分布呈季节性周期变化,年际分布总体稳定。分析时段内 1991 年 6 月 14 日流域储水量最大,为 20.9 亿 m^3 ;2019 年 11 月 16 日最小,为 10.47 亿 m^3 ,这与研究区 1991 年发生超标洪水和 2019 年发生严重干旱事件相一致。流域多年平均储水量的空间分布如图 5 所示,空间上流域储水量从高到低分为 3 个级别,依次为水库、河道和非河道区域。整体上,流域北部和东南部储水量相

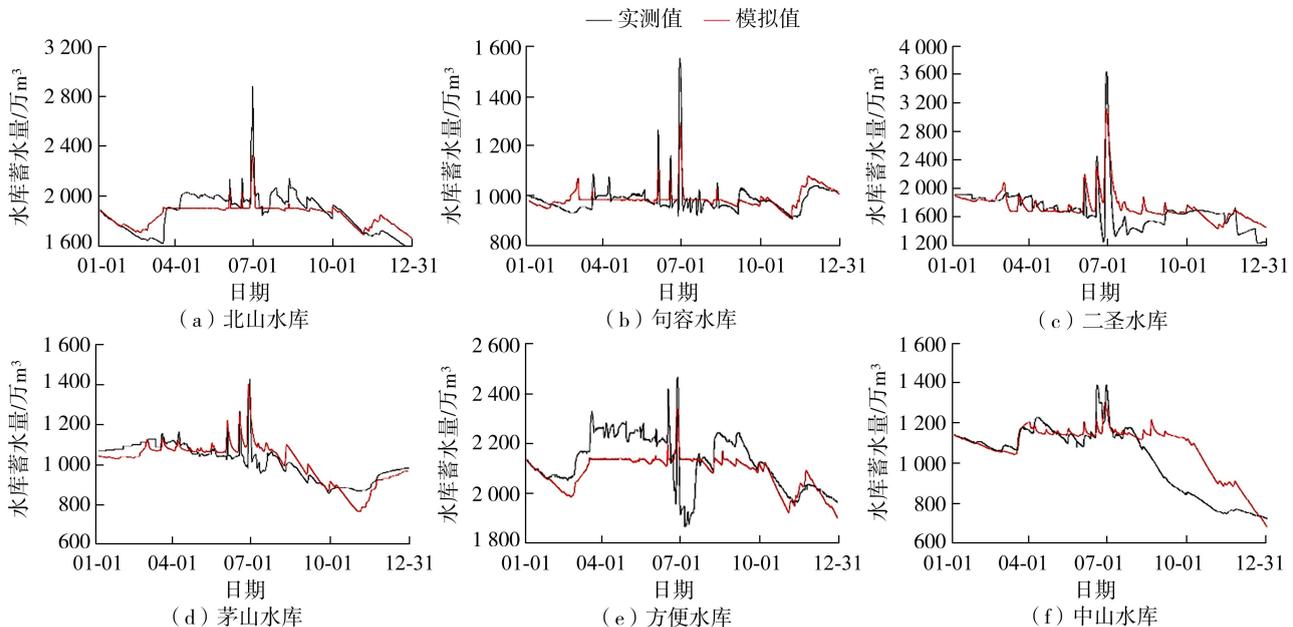


图 4 2015 年秦淮河流域 6 座水库实测与模拟蓄水量变化过程对比结果

Fig. 4 Comparison of measured and simulated water storage processes of six reservoirs in the Qinhuai River Basin in 2015

对较低,中部和南部储水量较高,这与流域地形地貌和水源涵养能力区域分布相一致。因此,流域储水量的空间分布特征从侧面验证了储水量模拟结果的合理性。

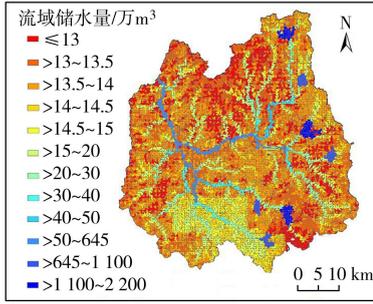


图5 秦淮河流域多年平均储水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-year average water storage in the Qinhuai River Basin

3.2 SWSI 的验证

3.2.1 基于 SWSI 的干旱事件识别

本文应用游程理论进行干旱事件识别^[15]。根据表1的干旱等级划分标准,以-0.5为干旱阈值对秦淮河流域逐网格逐日 SWSI (I_{SWS}) 序列进行截取, $I_{SWS} \leq -0.5$ 的负游程即为干旱事件,负游程长度为干旱历时;同一场干旱 $I_{SWS} \leq -0.5$ 的网格累积面积为干旱面积。通过对比秦淮河流域历史干旱事件发生的面积和历时,确定干旱面积阈值为15%,干旱历时阈值为60 d,干旱合并阈值(两场干旱之间间隔的最大天数)为5 d。对于网格干旱事件识别而言,当网格 $I_{SWS} \leq -0.5$ 的连续时间不少于60 d时,则被识别为一场网格干旱事件;若两场网格干旱事件间隔不超过5 d则将其合并为一场干旱事件。当网格干旱面积超过区域总面积15%时,被识别为区域干旱事件。

基于逐日 SWSI 序列识别出秦淮河流域1980—2019年26场干旱事件(表3),干旱强度指场次干旱期间干旱指数 I_{SWS} 与干旱阈值之差累积值绝对值的平均值,反映了场次干旱的相对严重程度。根据历史旱情资料以及前人的研究成果^[16-19],基于 SWSI 识别的26场干旱事件与秦淮河流域发生的历史干旱具有较好的一致性。特别是2011—2014年秦淮河流域进入了连旱期,从表3可以看出发生于2011—2014年的几场干旱,都较好地识别出来,结果依次为2010-11-25至2011-07-16、2012-04-19至2012-12-16、2013-01-03至2013-06-05、2014-05-03至2014-07-23。表明基于 SWSI 的区域干旱识别具有一定的可靠性。

3.2.2 对区域干旱严重程度的反映

为进一步验证 SWSI 对区域干旱严重程度的反

表3 基于 SWSI 的干旱事件识别

Table 3 Drought event identification based on SWSI

序号	起止时间	干旱历时/d	干旱面积占比/%	干旱强度
1	1982-05-09 至 1982-07-21	74	62.82	36.10
2	2000-06-30 至 2000-09-30	93	71.45	34.47
3	1994-06-23 至 1995-06-10	362	92.12	25.08
4	1997-06-15 至 1998-01-08	208	80.89	23.29
5	2010-11-25 至 2011-07-16	234	68.11	22.22
6	1995-06-26 至 1996-07-01	371	90.18	21.96
7	2007-04-10 至 2007-07-05	87	48.12	20.60
8	1996-08-06 至 1996-10-31	87	38.79	18.23
9	1982-08-30 至 1982-11-26	89	46.15	16.99
10	1990-09-08 至 1990-11-17	71	46.36	16.16
11	1983-01-27 至 1983-04-29	93	39.42	15.84
12	2001-05-10 至 2002-04-28	354	82.54	15.31
13	2013-08-03 至 2014-03-15	223	75.41	14.25
14	2019-09-01 至 2019-12-28	103	76.15	13.86
15	1980-01-01 至 1981-10-05	643	66.79	13.70
16	1997-01-09 至 1997-03-10	61	26.57	12.87
17	1986-08-13 至 1987-03-07	207	73.67	12.35
18	2014-05-03 至 2014-07-23	82	35.20	11.45
19	1986-02-21 至 1986-04-24	63	21.70	11.25
20	1985-07-05 至 1985-10-12	100	34.28	10.92
21	1998-11-04 至 1999-06-07	216	54.52	9.77
22	1988-09-17 至 1989-06-13	270	50.23	9.48
23	2012-04-19 至 2012-12-26	252	45.59	7.94
24	2004-07-24 至 2005-05-17	279	73.57	7.42
25	2013-01-03 至 2013-06-05	154	33.31	7.23
26	2008-08-22 至 2009-07-20	333	55.60	6.78

映效果,根据逐日 SWSI 序列,计算了秦淮河流域逐年干旱烈度(干旱强度与干旱历时的乘积),并与流域2010—2019年实际受旱面积进行了相关分析,二者相关系数为0.88,干旱烈度可以较好地反映区域的受旱面积。2010—2019年秦淮河流域干旱烈度与受旱面积见表4。由表4可见,秦淮河流域2011—2014年连续发生了干旱,平均干旱烈度为2048.8。2011年流域干旱烈度最大,为3372.8,实际受旱面积高达1969.6 hm²,占播种面积的36.78%。2013年干旱烈度为1764.0,实际受旱面积为899.1 hm²,占播种面积17.08%。此外,2014和2019年基于 SWSI 计算的干旱烈度较强,但是受旱面积相对较低。分析其原因,本次干旱主要发生在南京市区,受城市下垫面条件影响,统计的实际受旱面积偏低,致使干旱烈度与实际受旱面积不一致。综上分析,SWSI 可以较为准确地反映秦淮河流域干旱的严重程度。

3.2.3 与河道和土壤水分亏缺干旱指数对比

3.2.3.1 干旱指数变化过程比较

根据 VIC-FLASH 模型模拟的秦淮河流域逐日、逐网格流量和土壤含水量序列,计算得到表征河道

表 4 2010—2019 年秦淮河流域干旱烈度与受旱面积

Table 4 Drought severity and drought-affected area in the Qinhuai River Basin from 2010 to 2019

年份	受旱面积/hm ²	受旱面积在播种面积中的占比/%	干旱烈度
2010	0	0	344.1
2011	1969.6	36.78	3372.8
2012	341.6	6.41	1538.9
2013	899.1	17.08	1764.0
2014	13.0	0.25	1519.3
2015	0	0	105.0
2016	261.2	5.27	122.3
2017	0	0	133.9
2018	0	0	154.7
2019	16.3	5.24	1427.6

水分亏缺的逐日 SRI 和表征土壤水分亏缺的逐日 SMAPI 序列,与表征流域储水量亏缺的干旱指数 SWSI 进行了比较分析,结果如图 6 所示。结果显示,SWSI 与 SRI 和 SMAPI 的变化趋势表现出很强的一致性,波峰、波谷出现的时间也十分一致。SWSI 与 SRI 的相关系数为 0.89,SWSI 与 SMAPI 的相关系数为 0.98,皆表现出较强的相关性。表明基于流域储水量的 SWSI 构建方法具有一定可靠性。

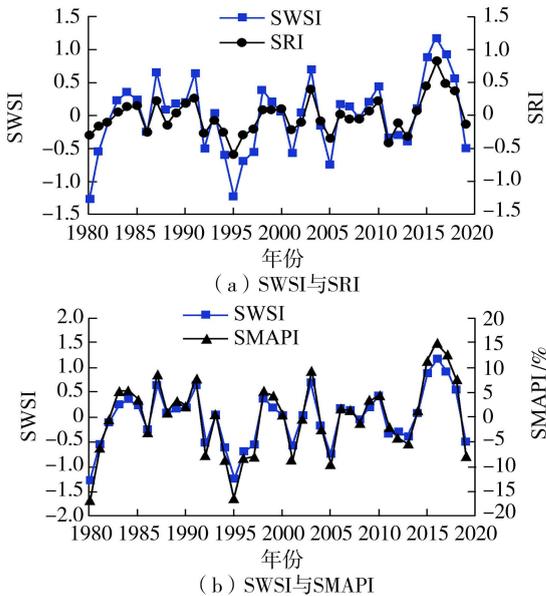


图 6 1980—2019 年秦淮河流域 SWSI 与 SRI 和 SMAPI 的变化过程对比

Fig. 6 Comparison of change process of SWSI with SRI and SMAPI in the Qinhuai River Basin from 1980 to 2019

3.2.3.2 场次干旱变化过程比较

秦淮河流域 2004 年 7 月至 2005 年 5 月、2010 年 11 月至 2011 年 7 月、2013 年 7 月至 2014 年 4 月 3 场干旱事件 SWSI 与 SMAPI 变化过程比较结果如图 7 所示。在场次干旱发生、发展、持续和缓解整个过程中,两个指数反映的干旱变化趋势具有较好的一致性。此外,SWSI 反映的干旱发生

时间与 SMAPI 反映的干旱发生时间相比滞后 1~2 周,SWSI 反映的干旱状态变化更为剧烈且比较敏感。分析其原因,通常情况下土壤水分亏缺首先会导致农作物受旱而表现出农业干旱,随着干旱持续发展导致河川径流和水库水位持续下降而发生水文干旱。由于 SWSI 同时考虑了土壤含水量和河道槽蓄量,当土壤含水量亏缺时,河道槽蓄量处于正常状态,一定程度上抵消了土壤水分亏缺,因此 SWSI 反映的干旱发生时间滞后于 SMAPI 反映的干旱发生时间。同时,干旱期间有降水事件发生时,河道槽蓄量会在短时间内迅速增加,因此 SWSI 相较于 SMAPI 反映的干旱状态变化更为敏感。该研究结果与沈柏竹等^[17]的研究结果一致,说明基于 SWSI 进行干旱事件和干旱过程的描述具有一定的科学性。

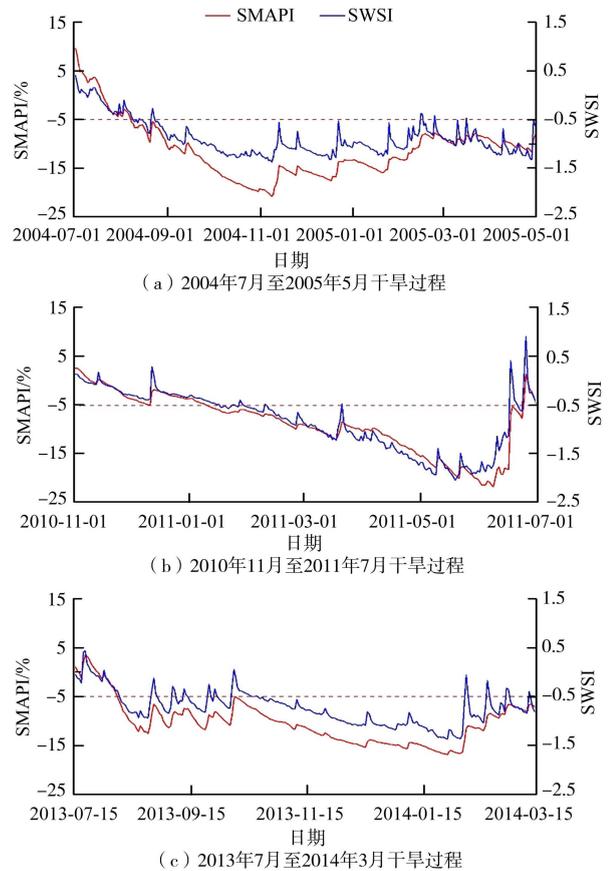


图 7 场次干旱事件 SWSI 与 SMAPI 变化过程对比

Fig. 7 Comparison of SWSI and SMAPI change processes in drought events

3.2.3.3 场次干旱空间分布结果比较

基于 SMAPI 和 SWSI 对秦淮河流域 2010 年 11 月至 2011 年 7 月场次干旱旱情等级空间分布进行分析,结果如图 8 所示,两个干旱指数识别的旱情等级和干旱发生区域基本一致。这场干旱覆盖了秦淮河流域 80% 以上的面积,仅流域西北部、西南部、南部的小部分地区为无旱状态,其他区域均出现了

旱情;流域北部北山水库周围地区、中南部以及南部小部分地区旱情达到了中旱等级。与 SMAPI 识别的旱情结果相比较,基于 SWSI 的旱情识别结果反映出了更多旱情细节。首先,SWSI 识别的旱情进一步反映了河道槽蓄量、水库蓄水量在干旱期间的变化情况。从图 8 可以看出秦淮河干流、句容河、溧水河以及流域内水库所在区域皆表现为无旱状态(图 8(b)),而 SMAPI 揭示的是土壤含水量和同期多年平均值的差异,未能反映出河道槽蓄量、水库蓄水量的变化情况(图 8(a))。其次,基于 SWSI 的旱情识别结果表现出由干旱向无旱的过渡和衔接,而不是直接由无旱突然转变为干旱或者由干旱突然转变为无旱,这种自然过渡更加符合干旱发生、发展和缓解的变化过程。综上所述,相较于 SMAPI,SWSI 可以更科学地反映旱情发生发展过程中的空间分布特征。

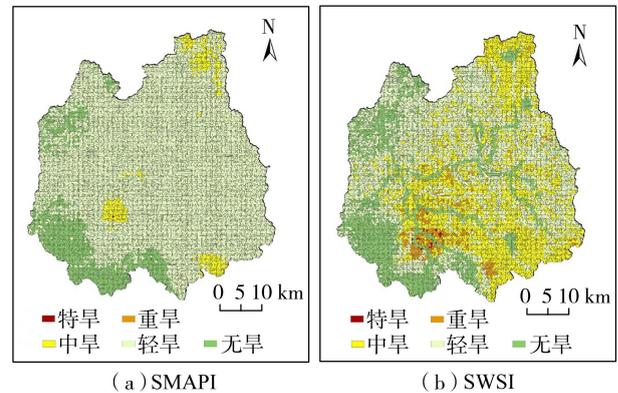


图 8 基于 SMAPI 与 SWSI 的旱情等级识别结果
Fig. 8 Drought grade identification results based on SMAPI and SWSI

3.3 SWSI 应用

3.3.1 秦淮河流域干旱空间分布特征

应用 SWSI 计算分析的秦淮河流域 1980—2019 年干旱特征变量平均值空间分布如图 9 所示。可以看出,干旱发生的频率从低到高依次为水库、河道、非河道地区,距离河道越远干旱频率越高。这是因为 SWSI 同时反映了土壤含水量和河道槽蓄量,能在一定程度上反映出干旱发生过程中土壤水分与河道流量的相互补给过程。此外,水库和河道的干旱历时较短,其他区域较长。流域尺度上,秦淮河流域北部和东南部干旱频率相对较高,流域西部和东北部干旱频率相对较低。干旱烈度和干旱强度的空间分布比较一致,秦淮河流域从西到东干旱烈度和干旱强度均呈现出高-低-高的分布特点,流域北部干旱烈度和干旱强度明显高于南部。分析其原因,流域西部和东北部地区城镇化程度较高,下垫面中不透水面积占比较大,水源涵养能力相对较低,易发

生干旱。而流域南部城市化程度相对较低,植被覆盖度也相对较高,水源涵养能力相对较高。同时,流域南部分布着茅山水库、卧龙水库、方便水库和中山水库等多座水利工程,从水资源量供需平衡角度,在干旱发生时,水库控制范围内的区域可以更快地得到水分补给,在一定程度上缓解了干旱的严重程度。

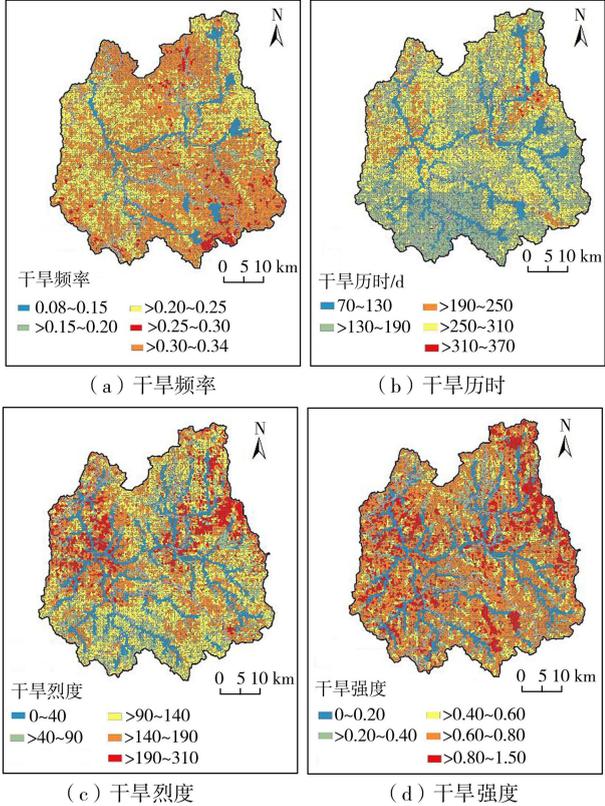


图 9 1980—2019 年秦淮河流域干旱特征变量平均值空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of mean values of drought characteristic variables in the Qinhuai River Basin from 1980 to 2019

干旱强度空间分布结果显示秦淮河流域水库分布区的干旱强度相对较高,并不表示库区干旱更严重,而是因为当区域干旱发生时,水库会以高于供水方案的调度方式向周围供水,导致水库蓄水量和水库水位大幅度下降,甚至远低于正常水位,进而使得水库所在融合单元出现计算的干旱强度偏高的情况。综上,基于流域储水量构建的 SWSI 能够综合反映干旱期流域内各水量的补给关系,对干旱特征空间分布的描述更加客观。

3.3.2 典型场次干旱事件旱情变化过程评估

SWSI 识别秦淮河流域历史干旱事件中,1980 年、1995 年、2001 年、2004 年、2005 年、2011 年、2013 年的干旱持续时间长,干旱程度较为严重。选取 2010—2011 年作为典型干旱年,基于 SWSI 评估了秦淮河流域旱情空间分布演变过程,评

估结果如图 10 所示。2010 年 11 月底,秦淮河流域发生了轻度干旱,旱情自秦淮河流域东北部、南部和中部区域开始发展,轻旱等级区域约占流域面积的 40%。随后,旱情迅速向周边蔓延,至 2011 年 3 月基本发展成为全流域干旱,轻旱及以上等级的干旱面积约占流域面积的 80%,在流域西南、东部和东北部还出现了小面积重旱及特旱旱情。2011 年 5 月旱情进一步加重,流域内半数以上地区达到特旱等级,河道的旱情等级明显低于其他地区,仅达到了轻旱或者中旱等级。2011 年 6 月旱情缓解,大部分地区转变为中旱,河道旱情缓解较快,基本转变为无旱状态。基于 SWSI 的旱情评估结果与历史资料记载的实际旱情时空演变状况一致^[17],表明 SWSI 不但对于干旱发生、发展、持续和缓解整个过程具有较好的反映能力,而且可以反映流域内包含河道、水库和土壤水分在内的旱情信息时空演变过程,可以为干旱精准监测提供有效支撑。

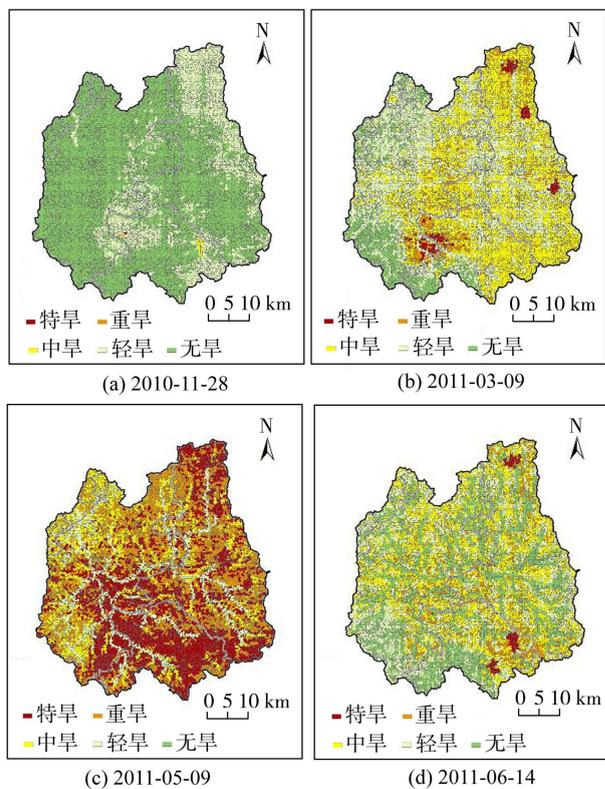


图 10 基于 SWSI 识别的秦淮河流域 2010—2011 年干旱空间分布演变过程

Fig. 10 Evolution of spatial distribution of drought identified based on SWSI in the Qinhuai River Basin from 2010 to 2011

4 结论

a. 考虑复杂下垫面及水库调蓄作用的 VIC-FLASH 模型可以精细化模拟包含河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量在内的流域储水量。率定期和

验证期 15 场洪水过程模拟结果平均 NSE 为 0.83, 1980—2019 年流域平均储水量模拟结果可以较好地反映秦淮河流域储水量空间分布特征。

b. 构建的综合考虑流域内河道、水库和土壤水量联合亏缺的 SWSI 能够较好地识别秦淮河流域历史干旱事件和反映区域干旱严重程度。相较于 SRI 和 SMAPI, SWSI 综合反映了干旱期河道槽蓄量、水库蓄水量和土壤含水量变化及补给关系,对干旱过程反映和干旱空间分布特征描述更加客观。

c. SWSI 在秦淮河流域干旱监测中可以定量客观地反映干旱发生发展时空变化过程。通过对秦淮河流域 1980—2019 年干旱特征时空演变及场次干旱发展过程分析发现,1980 年、1995 年、2001 年、2004 年、2005 年、2011 年、2013 年发生了比较严重的干旱;流域北部和东南部为干旱高频区,流域东部和西部为干旱严重程度较高的区域;基于高分辨率 VIC-FLASH 模型的优势, SWSI 可以客观监测场次干旱发生、发展、持续和缓解的整个过程。

d. 基于流域储水量构建的 SWSI 定量反映了流域内河道、水库和土壤水分的综合亏缺状态,相较于单一水分亏缺指数,其反映的干旱状态变化更加敏感,且对干旱过程和干旱空间分布特征的描述更加精细,反映出更多的旱情细节。

参考文献:

[1] 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))

[2] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of drought indices [J]. Environmental Reviews, 2011, 19: 333-349.

[3] 粟晓玲,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 drought risk analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 50-58. (in Chinese))

[4] 朱悦璐,张阳. 多变量综合干旱指数在渭河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(1): 31-38. (ZHU Yuelu, ZHANG Yang. Application of multivariate comprehensive drought index in the Weihe River Basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(1): 31-38. (in Chinese))

[5] 吴志勇,张静杰,程丹丹,等. 考虑地表-土壤-作物水分

- 联合亏缺的综合旱情指数研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 55-64. (WU Zhiyong, ZHANG Jingjie, CHENG Dandan, et al. Study of comprehensive drought index based on water deficits of surface, soil, and crop [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 55-64. (in Chinese))
- [6] YIRDAW S Z, SNELGROVE K R, AGBOMA C O. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(1/2): 84-92.
- [7] AGBOMA C O, YIRDAW S Z, SNELGROVE K R. Intercomparison of the total storage deficit index (TSDI) over two Canadian Prairie catchments [J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(3/4): 351-359.
- [8] AWANGE J L, KHANDU, SCHUMACHER M, et al. Exploring hydro-meteorological drought patterns over the Greater Horn of Africa (1979-2014) using remote sensing and reanalysis products [J]. Advances in Water Resources, 2016, 94: 45-59.
- [9] 陈芳, 刘绥华, 阮欧, 等. 基于 GRACE 重力卫星数据监测分析贵州干旱特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 201-205. (CHEN Fang, LIU Suihua, RUAN Ou, et al. Monitor and analyze the drought characteristics of Guizhou based on GRACE gravity satellite data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 201-205. (in Chinese))
- [10] 王杰龙, 陈义. 利用 GRACE 时变重力场数据监测长江流域干旱[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 196-200. (WANG Jielong, CHEN Yi. Drought detection over Yangtze River Basin from GRACE time-variable gravity data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 196-200. (in Chinese))
- [11] 赵雅娴, 张子占, 郑硕, 等. 长江流域陆地水储量异常的卫星重力监测与干旱指数对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(2): 121-127. (ZHAO Yaxian, ZHANG Zizhan, ZHENG Shuo, et al. Comparison of satellite gravimetry of terrestrial water storage anomaly and drought indices in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(2): 121-127. (in Chinese))
- [12] LIU Mengzhu, GUO Ying, ZHANG Xiaolong, et al. China's black soil granary is increasingly facing extreme hydrological drought threats [J]. Science Bulletin, 2023, 68(5): 481-484
- [13] LU Guihua, LIU Jingjing, WU Zhiyong, et al. Development of a large-scale routing model with scale independent by considering the damping effect of sub-basins [J]. Water Resources Management, 2015, 29(14): 5237-5253.
- [14] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))
- [15] 李琼芳, 方凯悦, 韩幸焯, 等. 基于多维 Copula 函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 52-59. (LI Qiongfang, FANG Kaiyue, HAN Xingye, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in the Lancang-Mekong River Basin based on multi-dimensional Copula function [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 52-59. (in Chinese))
- [16] 张蓬勃, 姜有山, 刘蕾, 等. 1971—2011 年江苏持续干旱过程的对比分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 444-454. (ZHANG Pengbo, JIANG Youshan, LIU Lei, et al. Comparative analysis of sustained drought processes in Jiangsu during 1971-2011 [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(2): 444-454. (in Chinese))
- [17] 沈柏竹, 张世轩, 杨涵洳, 等. 2011 年春季夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析[J]. 物理学报, 2012, 61(10): 109202. (SHEN Baizhu, ZHANG Shixuan, YANG Hanwei, et al. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011 [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(10): 109202. (in Chinese))
- [18] HE Hai, CAO Rui, WU Zhiyong, et al. Diagnosing anomalous characteristics of atmospheric water cycle structure during seasonal-scale drought events: a case study in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(2): 103-113.
- [19] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 23-30. (MENG Changqing, DONG Zijiao, LIU Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 23-30. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-31 编辑: 施业)

