

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.018

CRU 产品在中国大陆的干旱事件时间性效用评估

卫林勇¹, 江善虎^{1,2}, 任立良^{1,2}, 张林齐¹, 陆玉洁¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:基于 1980—2016 年 CGDPA (China gauge-based precipitation daily analysis dataset) 和 PM-Ep (potential evapotranspiration calculated by Penman-Monteith) 资料, 以标准化降水蒸散指数 (SPEI) 为干旱指标, 采用 6 种评估指标综合评价 CRU 降水 (CRU-P) 和潜在蒸散发 (CRU-Ep) 产品在中国大陆对干旱事件时间性的监测效用。结果表明: CRU-P 与 CGDPA 在中国大陆空间分布特征具有较好的相似性, 而 CRU-Ep 与 PM-Ep 有明显差异, 但它们在大部分地区的精度较高; SPEIc (基于 CRU-P 和 CRU-Ep 计算的 SPEI) 在中国东部和西部部分地区的性能较好, 其与 SPEIm (基于 CGDPA 和 PM-Ep 计算的 SPEI) 的相关系数在中国东部、西北、西南地区均大于 0.7, 均方根误差小于 0.8, 命中率大于 0.6; 利用文中提出的干旱率、平均开始时间误差、平均结束时间误差评价得出不同时间尺度的 SPEIc 在中国大陆大部分地区监测干旱事件时间性的精度较高, 且在中国东部地区优于西部地区; 基于长序列 CRU 产品驱动的 SPEI 可适用于中国东部、西北、西南地区的干旱监测。

关键词:降水; 潜在蒸散发; CRU; 标准化降水蒸散指数; 干旱; 中国大陆

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)02-0112-09

Utility assessment of CRU products for temporality of drought events in mainland China // WEI Linyong¹, JIANG Shanhu^{1,2}, REN Liliang^{1,2}, ZHANG Linqi¹, LU Yujie¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the CGDPA (China gauge-based precipitation daily analysis dataset) and PM-Ep (potential evapotranspiration calculated by Penman-Monteith) datasets during 1980-2016, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and six evaluation indicators were used to evaluate the performance of CRU precipitation (CRU-P) and potential evapotranspiration (CRU-Ep) products for monitoring the temporality of drought events in mainland China. The results showed that the spatial distribution characteristics of CRU-P and CGDPA feature better similarity in mainland China, while CRU-Ep and PM-Ep are obviously different, but they are more accurate in most areas. SPEIc (SPEI value based on CRU-P and CRU-Ep) had a good performance in eastern and parts of western China. The correlation coefficient between SPEIc and SPEIm (SPEI based on CGDPA and PM-Ep) is greater than 0.7, the root mean square error is less than 0.8 and the hit rate is greater than 0.6 in eastern, northwest and southwest China. The SPEIc with different timescales, which was assessed by using the probability of drought event, mean start time error and mean end time error proposed in this paper, has a high accuracy in monitoring the temporality of drought events in most parts of mainland China, and it is better in eastern China than in western China. SPEI based on long series CRU products can be applied to drought monitoring in eastern, northwest and southwest China.

Key words: precipitation; potential evapotranspiration; CRU; standardized precipitation evapotranspiration index; drought; mainland China

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFA0601504); 中央高校基本科研业务费项目(2019B10414); 江苏省研究生科研与实践创新计划(2019B72614/SJKY19_0477)

作者简介: 卫林勇(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源及水文过程模拟。E-mail: 2844470175@qq.com

通信作者: 江善虎(1983—), 男, 教授, 主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail: hik0216@163.com

干旱是最严重、最频繁、影响范围广、持续时间长的自然灾害之一^[1-3],易引发水资源短缺、农业生产量减产、生态恶化等自然灾害^[4-5]。随着全球气象气候变化极端化,干旱事件发生频率逐渐增加、强度增大^[6-7],迫切需要更准确的数据集应用于干旱研究。基于降水、蒸发、气温、植被等数据集量化研究干旱特征能够更好地管理流域或区域水资源,目前监测这些数据集的手段有气象站、辐射站、卫星遥感等技术^[8]。随着卫星遥感技术的逐渐成熟,涌现了一批卫星气象数据产品,包括降水^[9-11]、潜在蒸散发^[12-13]产品等。此外,随着先进信息技术的发展及数学算法的深度学习与开发,基于气象站的实测资料生产了全球尺度长时间序列(>100 a)的观测型降水产品,如 GPCC (the global precipitation climatology centre full data) 系列^[14]、CRU (climatic research unit) 系列^[15]、UDEL (center for climatic research-university of delaware) 系列^[16],其中,CRU 产品是含有全球尺度 0.5° 分辨率的潜在蒸散发产品^[17],由东英吉利大学基于若干个知名数据库使用修正插值法开发,已经被广泛应用于全球及尼泊尔、尼日利亚、中国等区域的水文气象研究。基于卫星降水产品使用标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 监测气象干旱,未考虑变化环境下陆地热力对干旱的影响^[18-19]。综合考虑降水和蒸散发,运用标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 监测干旱相对于 SPI 具有一定的优势^[20]。目前,很少同时拥有降水和潜在蒸散发数据集的卫星产品,若将不同源的卫星降水和潜在蒸散发产品用于研究干旱,会为结果带来双源误差或累积误差。地面 CRU 产品在一定程度上既克服了气象站在时空上的缺陷^[21],也避免了卫星产品时间序列短、数据类型单一的缺点^[22]。Shi 等^[23]基于 29 个气象站资料,运用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 变点试验方法、评估指标评价了 CRU 降水产品在 1961—2014 年三江源头地区降水特征的性能;Shiru 等^[24]在尼日利亚基于 GPCC 降水和 CRU 潜在蒸散发产品利用 SPEI 重建干旱;Spinoni 等^[17]基于 GPCC 降水、CRU 降水和潜在蒸散发产品采用 SPI 和 SPEI 分析全球的干旱事件特征以及气温对干旱的影响。这些研究获得了较好的结论,致使 CRU 产品得到了认可与推广。

中国大陆地形复杂,局部气候多样,降水、气温等要素时空分布的差异性大,因而 CRU 降水和潜在蒸散发产品在中国地区的精度需要验证与评估。本文基于 CGDPA (China gauge-based precipitation daily analysis dataset) 降水和采用 FAO 推荐改进的

Penman-Monteith 公式^[25]计算的潜在蒸散发 (potential evapotranspiration calculated by Penman-Monteith, PM-Ep),分别评估中国大陆 1980—2016 年的 CRU 降水和潜在蒸散发产品的精度。此外,本文还提出了 3 种评估指标,结合 SPEI 进一步评估 CRU 产品对干旱事件时间性的监测效用,以期为未来 CRU 降水和潜在蒸散发产品在中国大陆内的干旱研究中的应用提供一定的支撑依据。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

中国大陆大部分区域位于 $30^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 的中纬度地区,少部分区域位于热带地区,局部气候类型多、地貌复杂,具有高原、山区、丘陵、平原、沙漠等独特地理特征。图 1 显示了数字高程模型的中国大陆高程变化、中国大陆 8 个分区、808 个气象站空间分布。中国大陆的高程由西向东大致可以分为 3000 m 以上、1000 ~ 3000 m、1000 m 以下的三级阶梯高程。根据高程变化、降水空间分布、主要山脉将中国大陆划分为 8 个区域^[26],即中国东部的东北、华北、长江中下游地区、东南,中国西部的西北、西南、新疆、青藏高原。气象站在中国东部分布密集,西部分布稀疏。

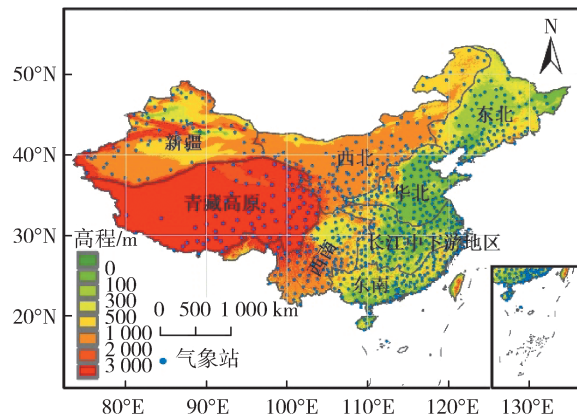


图 1 中国大陆的高程、8 个分区及气象站分布

Fig. 1 Distribution of elevation, 8 subregions and meteorological stations in mainland China

1.2 基准数据

中国地面降水 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集 (v2.0) 的数据来源于各省、市、自治区共 2472 个气象站逐日、逐月降水数据和使用 GTOP030 数据重采样生成的中国大陆数字高程模型数据^[27]。气象站在 1961 年的总数趋于稳定,在 1980 年的数量达 2400 个左右。CGDPA 是在中国独特的气候背景场下,利用薄盘样条法,结合格点数据、统计结果、观测数据,经过数据质量评估生产的降水产品,其空间分辨率为

0.5°^[28],同时引入数字高程数据消除了中国的地形条件下高程对降水空间插值精度的影响。在中国大陆或局部区域的降水、干旱等事件研究方面,该数据集通常作为基准降水数据集^[11],CGDPA 的 1980—2016 年日降水产品可以从网站 <http://data.cma.cn> 下载。

中国地面气候资料日值数据集的数据来源于中国国家级气象站观测资料,通过质量控制法以及数据核查,致使数据集的质量得到有力的保障^[29]。该数据集的时间跨度从 1951 年开始,但在 1970 年之前缺测资料的气象站较多。从中国地面气候资料日值数据集(v3.0)中剔除缺测数据较多的气象站,从而选用时间序列比较完整的 808 个气象站的 1980—2016 年气象资料,包括最高气温、最低气温、平均气温、平均相对湿度、高程、日照时数、风速等,并采用 IDW 空间插值形成 0.5°空间分辨率的栅格 PM-Ep,最后累计成月值。

1.3 CRU 降水和潜在蒸散发产品

CRU 产品覆盖全球大陆(不包括南极洲)、空间分辨率为 0.5°、时间跨度从 1901 年开始^[30]。CRU TS v4.03 是 CRU 产品系列的最新版,于 2019 年 3 月 15 日发布,月数据集包括降水、云量、实际蒸发、潜在蒸散量、最低温度、最高温度等。Harris 等^[30]详细描述了构造 CRU 产品的插值和质量评估,其中潜在蒸散发数据集根据日照时间、温度、蒸汽压力、湿度和风速数据利用 Penman-Monteith 公式进行估算。然而风数据是使用固定的每月气候学数据估算的,日照时长和湿度数据由温度、云量、纬度等其他变量得出^[30],这是因为 Penman-Monteith 方法需要许多变量,这些变量不容易从大范围的历史记录中检索到。因此,CRU 产品提供的潜在蒸散发数据集的质量需要进一步验证。本文从 <http://www.cru.uea.ac.uk/data> 下载 1980—2016 年的 CRU TS v4.03 月降水(CRU-P)和潜在蒸散发(CRU-Ep)产品,以验证其在中国大陆干旱效用的精度。

2 研究方法

2.1 常用的评估指标

为定量分析 CRU-P 和 CRU-Ep 应用于干旱效用的精度,基于 CGDPA 和 PM-Ep,利用常用的 3 种评估指标进行综合评价。采用相关系数 r 用于表示评估数据与基准数据的线性相关程度,最优值为 1;均方根误差 RMSE 用于表示评估数据与基准数据的离散程度,最优值为 0;命中率(probability of detection, POD, I_{POD})用于表示 CRU 产品准确捕捉干旱发生的能力^[31],最优值为 1, I_{POD} 计算公式为

$$I_{\text{POD}} = \frac{H}{H + M} \quad (1)$$

式中: H 为干旱发生被 CRU 产品正确监测到的次数; M 为干旱发生未被 CRU 产品监测到的次数。

2.2 干旱事件时间性的评估指标

干旱具有连续的时间性,一场干旱事件一般可以持续几周或几个月^[24,32]。大多数气象干旱指标是以 1 个月尺度来统计干旱,如 SPI、SPEI。用 I_{POD} 可以表示 CRU 产品探测干旱发生的精度,但不能反映干旱事件的时间性。探测干旱事件的开始与结束时刻的精度是值得研究的。为了全面了解 CRU 产品对于干旱事件的时间捕捉效果,提出了 3 种新的评估指标,可以反映 CRU 产品捕捉一场干旱事件的开始和结束时间的精度。本文中,干旱事件(SPEI 值小于或等于 -0.5)的时间性是指发生连续 1 个月或以上的干旱事件具有开始和结束时间;同一场干旱事件是 CRU 产品模拟的干旱事件与基准数据观测的干旱事件具有重叠时间,且重叠时间在 1 个月以上。在满足重叠时间的条件下,统计 CRU 产品正确监测干旱事件的概率作为干旱率(probability of drought event, PDE, I_{PDE}),即被 CRU 产品正确监测到干旱事件的次数与观测干旱事件的次数的比值;以 CRU 产品模拟的干旱事件与观测干旱事件的开始时间差值绝对值之和除以重叠的次数作为时间序列(1980—2016 年)的平均开始时间误差(mean start-time error, t_{mste} ,单位:月);以 CRU 产品模拟的干旱事件与观测干旱事件的结束时间差值绝对值之和除以重叠的次数作为时间序列的平均结束时间误差(mean end-time error, t_{mete} ,单位:月)。PDE、 t_{mste} 、 t_{mete} 的最优值分别为 1、0、0。

2.3 标准化降水蒸散指数

SPEI 是由 Vicente-Serrano 等考虑变化环境下陆地蒸散发对干旱的影响,在 SPI 基础上提出的干旱指数,其弥补了 SPI 的干旱表征因子单一性的缺陷^[24]。SPEI 计算过程是先基于 Hargreaves 或 Thornthwaite 或 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发,之后以月降水量与潜在蒸散发量的差值取代 SPI 输入的月降水量作为输入数据,其次采用 3 参数的 log-logistic 概率分布对输入数据进行正态化,最后过程同 SPI 计算方法,SPEI 具体计算公式和指标等级可参考文献[18]。本文基于 CGDPA 降水和 PM-Ep 潜在蒸散发计算的 SPEI 简称 SPEIm,1、3、12 个月的 SPEIm 记为 SPEIm1、SPEIm3、SPEIm12;基于 CRU 降水和潜在蒸散发产品计算的 SPEI 简称 SPEIc,1、3、12 个月的 SPEIc 记为 SPEIc1、SPEIc3、SPEIc12。

3 结果分析

3.1 CRU 降水和潜在蒸散发产品的精度评估

图2为1980—2016年的CGDPA、CRU-P月均降水和PM-Ep、CRU-Ep月均潜在蒸散发空间分布。由图2(a)和2(c)可见,CRU-P产品与基准降水数据在中国大陆表现出的降水空间分布特征较为相似。具体来说,月均降水量从西部内陆向东南地区递增。如,月均降水量在新疆地区小于16 mm、西北地区小于49 mm、青藏高原地区和东北地区小于66 mm、西南地区和华北地区小于107 mm、长江中下游地区和东南地区大部分地区大于127 mm。CRU-P产品能够较准确地捕捉到各区域较为明显的降水区域特征。这是因为CRU使用了中国地面交换站气候资料和薄板样条插值法进行插值^[33]。但由于中国地面交换站数量较少、生成CRU栅格数据集过程中的不确定性,导致CRU-P产品在中国大陆有一定的偏差。如,图2(a)和2(c)中显示的降水量分级线有些不一致,以及CRU-P在东北、华北、西北地区的降水量偏小和在青藏高原南部地区的降水量偏大。根据图2(b)、2(d),CRU-Ep与PM-Ep在空间上分布有些不一致。CRU-Ep在新疆南部地区的估值偏高、西北西部地区的估值偏低。这可能是因为CRU估算潜在蒸散发中的风速、日照时长和湿度数据不是实测值。但由于CRU-Ep与PM-Ep都是采用Penman-Monteith公式计算的潜在蒸散发,其中

国大陆部分地区的数值差异较小。

Q-Q(Quantile-Quantile)图^[34]可以直观地评估CRU产品对低值的降水、潜在蒸散发估计能力。图3为区域平均CRU-P对CGDPA和区域平均CRU-Ep对PM-Ep月数据在8个分区和中国大陆的估计值偏大偏小关系。CRU-P在华北、青藏高原地区对低降水(≤ 10 mm/月)估计偏高,在东北、西北地区对低降水估计偏低,尤其在西北地区偏低和青藏高原地区偏高较为明显,这可能是因为CRU-P产品生成的插值方法和所用的气象站数量与基准数据不一致、西北地区降水量常年偏少和青藏高原海拔较高;但是,在各分区上对中、高降水量表现出较好的估计能力。CRU-Ep在华北、长江中下游地区、东南、西南、新疆地区小幅度地高估潜在蒸散发量,但不明显。这些结果与图2具有一致性。整体上,CRU产品对不同大小的月降水、潜在蒸散发量估计能力较好。

为了定量评估CRU产品在中国大陆的精度,图4显示了CRU-P与CGDPA和CRU-Ep与PM-Ep的 r 、RMSE空间分布。针对降水产品,CRU-P与CGDPA在中国大陆的区域 r 平均值为0.85,区域RMSE平均值为24.38 mm/月。由图4(a)可见,除在新疆和青藏高原西部的昆仑山脉地区外,相关系数在其他地区较高($r > 0.7$),尤其在东北、西北东部、西南南部、青藏高原东部的大部分地区的 r 值达0.95以上。由图4(c)可见,RMSE从中国东南沿海地带向内陆逐渐降低;在东南、长江中下游地区大于30 mm/月,但在喜马拉雅山脉地区最高,在西北和新疆地区小于20 mm/月。这与降水在中国大陆的空间分布特征有关(图2(c)),即高降水地区的RMSE大,低降水地区的RMSE小。由图4(b)可见,针对潜在蒸散发产品,CRU-Ep与PM-Ep的 r 在整个中国大陆大于0.7且区域 r 平均值为0.98,RMSE值小于40 mm/月且区域RMSE的平均值为13.89 mm/月。由图4(d)可见,RMSE在新疆中部和昆仑山山脉地区相对于其他区域的值较高,在中国东部的部分地区较小(RMSE值小于10 mm/月)。这与CRU-Ep潜在蒸散发在中国大陆的空间分布特征有关(图2(d)),也体现出了高潜在蒸散发地区的RMSE大,低潜在蒸散发的RMSE小的特征。整体上,CRU-Ep的性能比CRU-P好,尤其在新疆、昆仑山山脉地区较为突出。这些结果表明气象站的数量、复杂地形、降水量的时空分布等原因可能影响CRU的精度。总之,除在新疆部分地区、青藏高原西部和南部地区有一定的偏差外,CRU产品在中国大陆的精度较高。

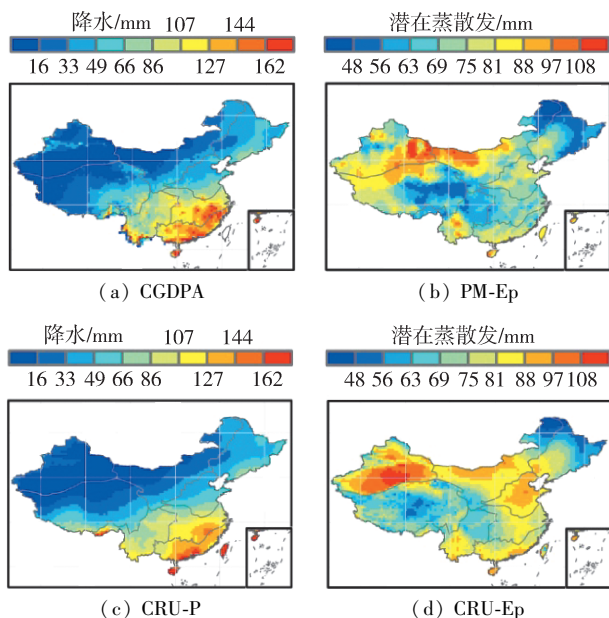


图2 1980—2016年的月均降水和潜在蒸散发
在中国大陆的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of monthly mean precipitation
and potential evapotranspiration in mainland China
from 1980 to 2016

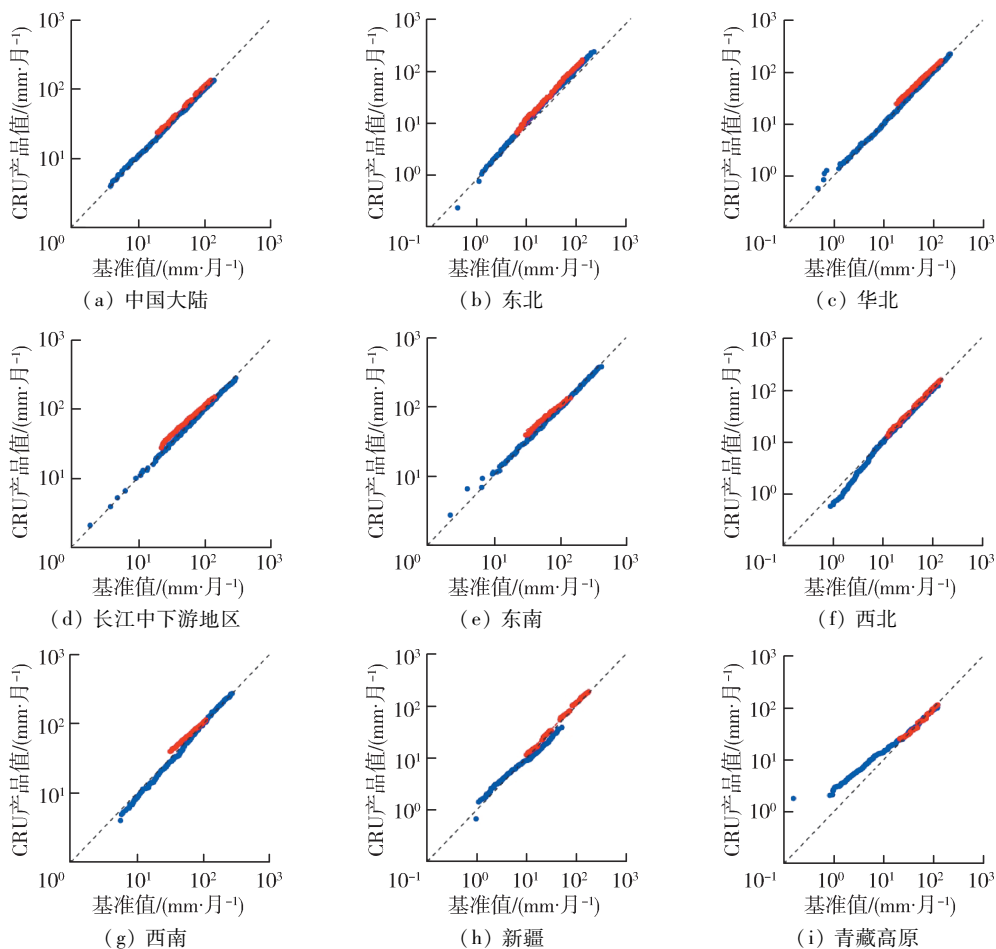


图3 CRU产品与基准数据的对比分析

Fig. 3 Comparative analysis between CRU product and the reference data

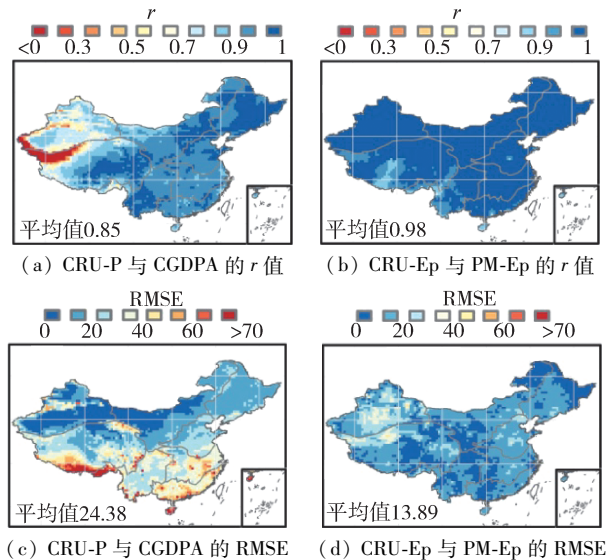


图4 CRU降水和潜在蒸散发产品与基准数据在中国大陆的 r 和RMSE空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of r and RMSE of CRU precipitation and potential evapotranspiration products against the reference data in mainland China.

3.2 SPEIc的精度评估

POD根据SPEIc与SPEIm进行计算,结合 r 和

RMSE,以验证由CRU-P和CRU-Ep产品得出的SPEI估计值可靠性。为了计算POD,以SPEI值小于或等于-0.5的标准来确定干旱条件。图5为不同时间尺度的SPEIc与SPEIm在中国大陆的评估指标空间模式。1、3、12个月的SPEIc与SPEIm在中国大陆的区域平均 r 分别为0.75、0.74、0.72,区域平均RMSE值分别为0.69、0.68、0.71,区域平均POD分别为0.71、0.7、0.71。不同时间尺度的SPEIc在新疆、青藏高原、华北、长江中下游地区、东南地区的性能差异显著(评估指标值随着时间尺度增加呈现下降趋势,在12个月尺度较为突出),但它们也有相似的空间分布特征,即均从西向东逐渐变优的趋势。具体来说,如图5(a)(b)(c), r 在新疆和青藏高原的部分地区小于0.4且在中国西部地区不同格点的值差异大,但在中国东部地区大于0.8且不同格点的值差异小,甚至在华北、长江中下游地区、东南地区的部分区域大于0.9。体现了SPEIc在中国大部分地区的一致性良好。如图5(d)(e)(f),RMSE在新疆和青藏高原西部地区大于0.9,而在中国东部地区小于0.7。如图5(g)(h)(i),POD的空间模式与

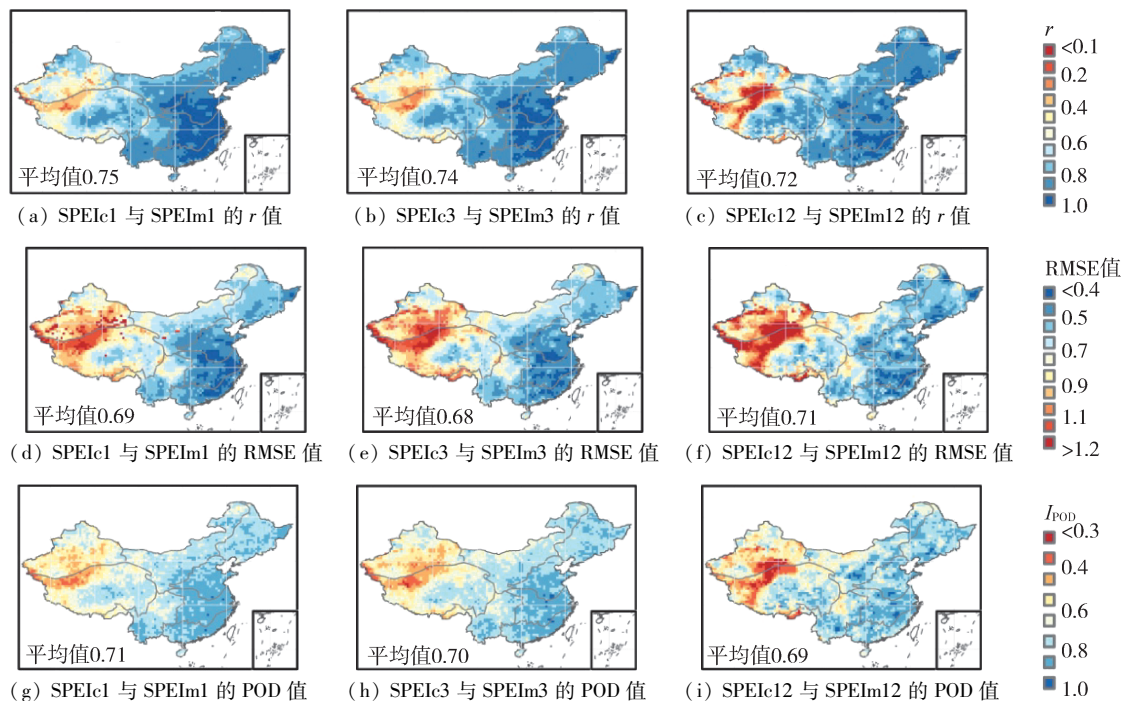


图5 不同时间尺度 SPEIc 与 SPEIm 的统计指标空间分布

Fig.5 Spatial distribution of statistical indicators of SPEIc against SPEIm at different timescales

r 和 RMSE 相似,在中国东部地区的数值($I_{\text{POD}} > 0.7$)高于西部地区。这些结果与 CRU-P 和 CRU-Ep 产品在相应地区的精度有关。总体而言,CRU 产品驱动的 SPEIc 在中国东部的性能优于中国西部地区。

为了更全面地评价 SPEIc 的准确性,计算了 SPEIc 与 SPEIm 在 8 个分区上不同时间尺度的区域平均 r 、RMSE、 I_{POD} ,结果见表 1。从表 1 中可见, SPEIc 在不同时间尺度不同地区表现的性能均较好。具体来说,3 个尺度的 SPEIc 与 SPEIm 在整个研究区域的一致性较高($r \geq 0.69$),均方根误差较小(RMSE 值小于或等于 0.55),命中率较高($I_{\text{POD}} \geq 0.58$)。同时,SPEIc1 与 SPEIm1 的 $r \geq 0.83$,RMSE 值小于或等于 0.42, $I_{\text{POD}} \geq 0.73$;SPEIc3 与 SPEIm3 的 $r \geq 0.799$,RMSE 值小于或等于 0.45, $I_{\text{POD}} \geq 0.68$;除在新疆和青藏高原地区外,各评估指标值在 12 个月尺度相对于在 1、3 个月尺度差异不大。由图 2 ~

4 分析得出 CRU 产品在新疆、青藏高原的精度较差,在其他地区的精度较高。高精度的降水和潜在蒸散发滑动累积计算的 SPEIc3、SPEIc12 对于干旱模拟的误差较小,低精度的降水和潜在蒸散发滑动累积计算的 SPEIc3、SPEIc12 对于干旱模拟的误差较大且误差随着滑动尺度增大而变大。这与图 5 反映 SPEIc 的性能相一致,可能跟 SPEI 具有多时间尺度的特点有关。SPEIc 的性能在空间上也有差异,其在中国东部地区最优($r > 0.94$, RMSE 值小于 0.3, $I_{\text{POD}} \geq 0.85$),在西北和西南地区次之,在新疆和青藏高原地区相对最差。总体而言,3 个时间尺度的 SPEIc 均适合中国东部地区的干旱变化研究,SPEIc1、SPEIc3 也适合西部地区,SPEIc12 也适合西北、西南地区。

3.3 SPEIc 对于干旱事件时间性的捕捉能力评估

针对数据集监测干旱效用的评估工作,用 POD

表 1 不同时间尺度的区域平均 SPEIc 与 SPEIm 的相关系数、均方根误差和命中率

Table 1 Correlation coefficient, root mean-squared error and probability of detection of regional average SPEIc against SPEIm at different timescales

区域	SPEIc1			SPEIc3			SPEIc12		
	r	RMSE 值	I_{POD}	r	RMSE 值	I_{POD}	r	RMSE 值	I_{POD}
东 北	0.946	0.26	0.85	0.944	0.27	0.89	0.948	0.26	0.94
华 北	0.980	0.18	0.97	0.980	0.18	0.96	0.968	0.21	0.93
长江中下游地区	0.985	0.15	0.99	0.982	0.16	0.97	0.979	0.18	0.97
东 南	0.975	0.17	0.92	0.974	0.18	0.93	0.977	0.17	0.95
西 北	0.925	0.24	0.88	0.921	0.25	0.89	0.941	0.25	0.92
西 南	0.961	0.21	0.96	0.950	0.22	0.93	0.917	0.24	0.90
新 疆	0.830	0.42	0.73	0.799	0.45	0.70	0.729	0.55	0.58
青藏高原	0.835	0.31	0.77	0.805	0.32	0.68	0.690	0.33	0.57

评估 CRU 产品监测干旱发生的性能,忽略了一场干旱事件具有连续的时间性。因此,利用文中提出的干旱率 PDE 、平均开始时间误差 t_{mste} 、平均结束时间误差 t_{mete} 评估 SPEIc 在中国大陆监测时间序列上场次干旱事件时间性的精度,结果见图 6。1、3、12 个月尺度的 SPEIc 与 SPEIm 在中国大陆的区域平均 I_{PDE} 分别为 0.78、0.77、0.68,区域 t_{mste} 分别为 0.36、0.88、3.57 个月,区域 t_{mete} 分别为 0.46、1.18、4.52 个月。从这 3 个指标的空间分布状况可以得出,随着 SPEIc 的时间尺度增加评估指标值倾向于差值。这是因为短时间尺度的 SPEI 对短历时的干旱事件比较敏感,而长时间尺度的 SPEI 可以较好地量化长历时的干旱事件;当 SPEIc12 与 SPEIm12 同时量化同一场干旱事件时,会出现 SPEIc12(SPEIm12)量化的一场干旱事件对应 SPEIm12(SPEIc12)量化的多场干旱事件的情形,特别是低精度的 SPEIc 较为明显。然而,不同时间尺度的 I_{PDE} 、 t_{mste} 、 t_{mete} 的空间模式具有相同的特点,即在东部地区优于西部地区且随着时间尺度增大优值区域在缩小。具体来说,如图 6(a)(d)(g),干旱率在中国东部和西部部分地区较高($I_{PDE} > 0.7$),尤其在华北、长江中下游、东南部分地区较为突出($I_{PDE} > 0.8$),在青藏高原的西部地区 $I_{PDE} < 0.5$ 。由前面分析得出 SPEIc 的精度高,

PDE 在一定程度上可以反映在华北、长江中下游、西南、西北地区易出现干旱事件。如图 6(b)(e)(h),干旱的 t_{mste} 在中国东部地区较小(SPEIc1、SPEIc3 的 $t_{mste} \leq 1$ 月, SPEIc12 的 $t_{mste} \leq 4$ 月),说明 SPEIc 监测 1980—2016 年来多场干旱事件的开始时间的精度较高;SPEIc12 的 t_{mste} 在新疆、青藏高原部分地区大于 7 个月。这可能与 SPEI12 值是以连续 12 个月滑动累加的数值作为计算的数据有关。如图 6(c)(f)(i),干旱事件的 t_{mete} 的空间模式与 t_{mste} 相一致(包括在新疆东部的个别格点监测到无干旱),但它们在部分区域略有差异($t_{mete} \geq t_{mste}$),尤其在新疆地区较为明显($t_{mete} \geq 9$ 月)。总体上, I_{PDE} 、 t_{mste} 、 t_{mete} 综合反映了 SPEIc 在中国东部地区监测干旱事件时间性的性能较好且优于西部地区。

4 结 论

a. CRU-P (除在青藏高原南部地区外) 与 CGDPA 在中国大陆空间分布特征具有较好的相似性,而 CRU-Ep 与 PM-Ep 在空间分布的差异较明显。但是,它们在大部分地区的相关系数较高($r > 0.7$),均方根误差较小(RMSE 值小于 40 mm/月),而且 CRU-Ep 的精度比 CRU-P 高,特别是在新疆、青藏高原西部地区较为突出。

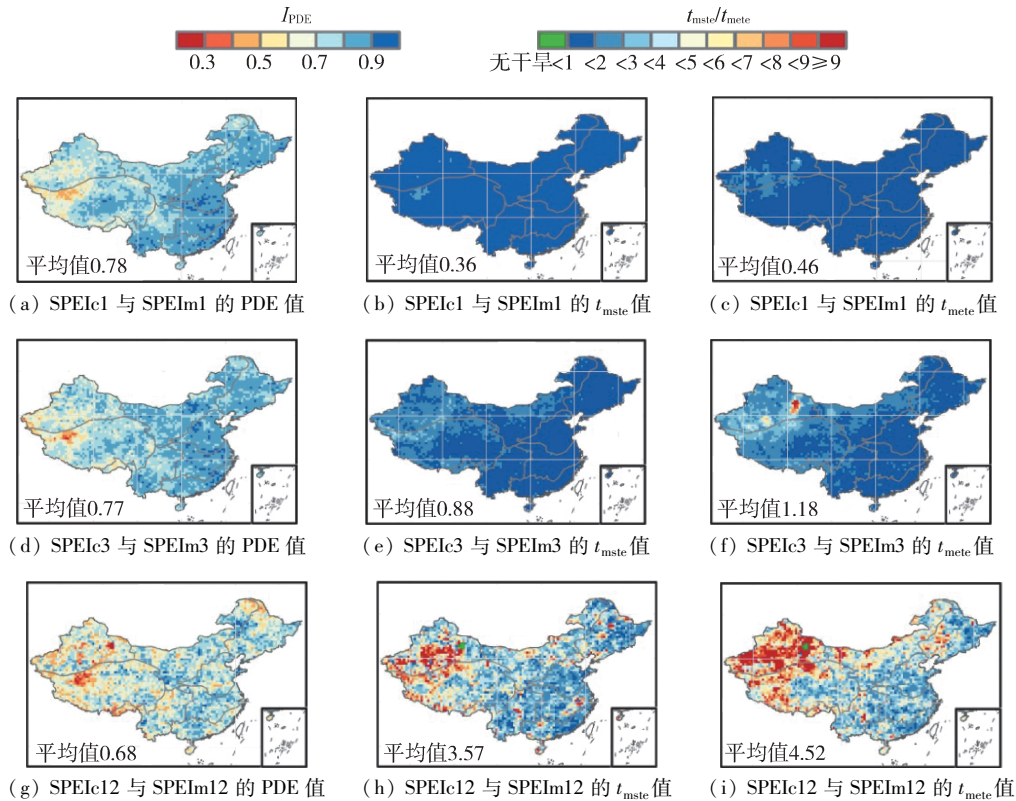


图 6 SPEIc1、SPEIc3、SPEIc12 监测中国大陆干旱事件时间性的统计指标空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of statistical indicators of drought event temporality monitored by SPEIc1, SPEIc3 and SPEIc12 in mainland China

b. SPEIc 在中国东部和西部部分地区的性能较好($r > 0.7$, RMSE 值小于 0.8, $I_{POD} > 0.6$), 尤其在相对湿润地区较为明显。同时, 评估指标体现出区域平均 SPEIc 适合中国东部地区的干旱变化研究, SPEIc1、SPEIc3 也适合西部地区, SPEIc12 也适合西北、西南地区。

c. 利用文中提出的干旱率、平均开始时间误差、平均结束时间误差评估得出不同时间尺度的 SPEIc 在中国大陆大部分地区监测干旱事件时间性的精度较高, 且 SPEIc 的性能在东部地区优于西部地区。

参考文献:

- [1] XU Z, WU Z, HE H, et al. Evaluating the accuracy of MSWEP V2.1 and its performance for drought monitoring over mainland China [J]. Atmospheric Research, 2019, 226:17-31.
- [2] 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))
- [3] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析 [J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] FORD T W, QUIRING S M. Comparison of contemporary in Situ, model, and satellite remote sensing soil moisture with a focus on drought monitoring [J]. Water Resources Research, 2019, 55(2): 1565-1582.
- [7] SUN Z, ZHU X, PAN Y, et al. Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 727-738.
- [8] GOLIAN S, JAVADIAN M, BEHRANGI A. On the use of satellite, gauge, and reanalysis precipitation products for drought studies [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 075005.
- [9] NASTOS P T, KAPSOMENAKIS J, PHILANDRAS K M. Evaluation of the TRMM 3B43 gridded precipitation estimates over Greece [J]. Atmospheric Research, 2016, 169: 497-514.
- [10] JIANG S, REN L, YONG B, et al. Evaluation of latest TMPA and CMORPH precipitation products with independent rain gauge observation networks over high-latitude and low-latitude basins in China [J]. Chinese Geographical Science, 2016, 26(4): 439-455.
- [11] ZHONG R D, CHEN X H, LAI C G, et al. Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 343-359.
- [12] 杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 等. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 132-141. (YANG Xiuqin, WANG Guojie, PAN Xin, et al. Spatio-temporal variability of terrestrial evapotranspiration in China from 1980 to 2011 based on GLEAM data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 132-141. (in Chinese))
- [13] 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 等. 基于数据融合算法的灌区蒸散发空间降尺度研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 215-223. (BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Spatial downscaling of evapotranspiration in large irrigation area based on data fusion algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 215-223. (in Chinese))
- [14] SCHNEIDER U, BECKER A, FINGER P, et al. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115(1/2): 15-40.
- [15] YANG B, QIN C, WANG J, et al. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(8): 2903-2908.
- [16] MATSUURA K, WILLMOTT C J. Terrestrial precipitation: 1900-2014 gridded monthly time series [EB/OL]. (2019-07-26) http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2014/README_GlobalTsP2014.html. 2015.
- [17] SPINONI J, BARBOSA P, De JAGER A, et al. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016 [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2019, 22: 100593.
- [18] 刘小刚, 冷险险, 孙光照, 等. 基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 2105-2115.

- 2018,49(12):236-245. (LIU Xiaogang, LENG Xianxian, SUN Guangzhao, et al. Assessment of drought characteristics in Yunnan Province based on SPI and SPEI from 1961 to 2100[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):236-245. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等. 基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6):95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):95-99. (in Chinese))
- [21] JIANG S, REN L, XU C Y, et al. Statistical and hydrological evaluation of the latest integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) over a midlatitude humid basin in South China[J]. Atmospheric research, 2018, 214:418-429.
- [22] GAO F, ZHANG Y, REN X, et al. Evaluation of CHIRPS and its application for drought monitoring over the Haihe River Basin, China[J]. Natural Hazards, 2018, 92(1):155-172.
- [23] SHI H, LI T, WEI J. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the Three-River Headwaters region [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548:322-332.
- [24] SHIRU M S, SHAHID S, CHUNG E S, et al. Changing characteristics of meteorological droughts in Nigeria during 1901-2010[J]. Atmospheric Research, 2019, 223:60-73.
- [25] LI B Q, LIANG Z M, ZHANG J Y, et al. A revised drought index based on precipitation and pan evaporation [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(2):793-801.
- [26] LU Y, JIANG S, REN L, et al. Spatial and temporal variability in precipitation concentration over mainland China, 1961-2017[J]. Water, 2019, 11(5):881.
- [27] SHEN Y, XIONG A. Validation and comparison of a new gauge-based precipitation analysis over mainland China [J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1):252-265.
- [28] 王兆礼,钟睿达,陈家超,等. TMPA 卫星遥感降水数据产品在中国大陆的干旱效用评估[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19):163-170. (WANG Zhaoli, ZHONG Ruida, CHEN Jiachao, et al. Evaluation of drought utility assessment of TMPA satellite-remote-sensing-based precipitation product in mainland China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19):163-170. (in Chinese))
- [29] 邓越,蒋卫国,王晓雅,等. MSWEP 降水产品在中国大陆区域的精度评估[J]. 水科学进展, 2018, 29(4):455-464. (DENG Yue, JIANG Weiguo, WANG Xiaoya, et al. Accuracy assessment of MSWEP over mainland China [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4):455-464. (in Chinese))
- [30] HARRIS I, JONES P D, OSBORN T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatology observations: the CRU TS3. 10 Dataset [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3):623-642.
- [31] JIANG S, REN L, HONG Y, et al. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method [J]. Journal of Hydrology, 2012, 452:213-225.
- [32] 吴杰峰,陈兴伟,高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学, 2017, 32(1):199-204. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1):199-204. (in Chinese))
- [33] 王丹,王爱慧. 1901—2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(4):446-462. (WANG Dan, WANG Aihui. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013 [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4):446-462. (in Chinese))
- [34] 任立良,卫林勇,江善虎,等. CHIRPS 和 GLEAM 卫星产品在中国的干旱监测效用评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15):146-154. (REN Liliang, WEI Linyong, JIANG Shanhu, et al. Drought monitoring utility assessment of CHIRPS and GLEAM satellite products in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):146-154. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-05 编辑:王 芳)

