

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.006

综合干旱指数研究进展

吴志勇,程丹丹,何海,李源,周建宏

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:干旱时空演变过程复杂,影响因素众多,单一的干旱指数往往难以反映干旱的多类型和多尺度特征,融合多源信息构建综合干旱指数是干旱监测的重要发展趋势。系统回顾了综合干旱指数的研究进展,总结了3种常用的综合干旱指数构建方法:权重组合、多变量联合分布和机器学习方法,分析了这几类综合干旱指数的优势与不足;详细介绍了综合干旱指数在美国、欧洲和中国干旱监测业务中的应用情况;最后指出综合干旱指数应从加强内在机理性、提高多源信息融合水平、完善评价体系等方面继续深入研究。

关键词:干旱监测;综合干旱指数;多源信息;数据融合

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0036-10

Research progress of composite drought index// WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, LI Yuan, ZHOU Jianhong (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Drought has very complex spatiotemporal evolution process and is highly impacted by various factors. Drought indices or indicators assimilated from only one drought-related variable are typically insufficient in characterizing different drought types at multiple scales. To overcome this problem, composite drought indexes via integrating multi-source information have been proposed in recent years. This study reviews the current status of composite drought indexes and summarizes three commonly utilized methods for constructing the indexes including weight combination method, multivariable joint distribution function method, and machine-learning-based modelling method. Moreover, we introduce the applications of composite drought indicators in the operational drought monitoring services in the United States, Europe, and China. Further research should focus on the mechanism of drought propagation, multi-source data merging, and the evaluation of composite drought indexes.

Key words: drought monitoring; composite drought index; multi-source information; data merging

干旱是一种渐变的复杂自然现象,持续时间长,影响范围广^[1-2]。建立完善的干旱信息系统,对于及时准确地评估区域干旱状况、提高干旱风险防范能力、减轻旱灾带来的损失及影响,具有重要的科学意义和应用价值^[3-5]。然而,干旱的发生强度和影响范围等特征变量,一般难以直接观测,通常基于实测或模拟水文气象资料,采用干旱指数进行描述^[6]。选取适用的干旱指数,是准确监测和评估区域干旱状况的基础。

目前,国内外学者已提出了上百种干旱指数。根据指数表征的干旱类别,大致可分为3类:①气象干旱指数,一般用来描述降水的短缺,如降水百分位指数^[7]、帕默尔旱度指数(Palmer drought severity

index, PDSI)^[8-9]、自适应帕默尔干旱指数(self-calibrating Palmer drought severity index, sc-PDSI)^[10]、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[11-12]和标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[13-14]等,以及结合PDSI和SPEI两者优势改进得到的标准化水分异常指数(standardized moisture anomaly index, SZI)^[15-16]。②水文干旱指数,主要描述地表水的不足,如帕默尔水文干旱指数(Palmer hydrological drought index, PHDI)^[17]、地表供水指数(surface water supply index, SWSI)^[18]、标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)^[19]和径流干旱指数(streamflow drought index, SDI)^[20]等。③农业干旱

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502403);国家自然科学基金(51779071);中央高校基本科研业务费专项(2019B10214)

作者简介:吴志勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律及水文预报研究。E-mail: zywu@hhu.edu.cn

指数,一般有两种构建思路,一种是基于土壤湿度、蒸散发等数据来反映土壤和作物的水分亏缺,如作物水分指数(crop moisture index, CMI)^[21]、标准化土壤湿度指数(standardized soil moisture index, SSI)^[22]、土壤含水量距平指数(soil moisture anomaly percentage index, SMAPI)^[23]、土壤湿度亏缺指数(soil moisture deficit index, SMDI)^[24]和蒸散发亏缺指数(evapotranspiration deficit index, ETDI)^[24]等;另一种是基于遥感反演的植被状况、地表温度等陆面信息进行大范围农业干旱监测,如归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[25]、植被状态指数(vegetation condition index, VCI)^[26]、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)^[27]和温度条件指数(temperature condition index, TCI)^[28]等。

对于一场严重的干旱事件,其发生发展过程往往对应着不同类型的干旱,存在旱情传播和递进的联系,由降水持续性缺少引起的气象干旱作用于下垫面,对土壤、植被和水体产生不同程度的影响,从而触发农业干旱和水文干旱。然而,上述提到的干旱指数大多用于某一种干旱类型的监测,不能综合反映干旱事件的多尺度特征及其带来的多重影响。仅仅基于某一类干旱指数来评估干旱状况,容易出现干旱情势的误报和漏报^[29-30]。因此,需要利用多种来源的水循环要素信息,综合多种干旱指数的评估结果,向管理部门和公众传达全面可靠的实时旱情^[31]。为了更准确地监测和评估干旱状况,越来越多的研究开始发展融合多源信息的综合干旱指数,即在一个综合的框架下去刻画干旱的时空演变特征及其影响程度^[32-34]。

目前,国内外学者已经提出了多种综合干旱指数,但是学术界对于这一概念的理解并未达成共识,综合干旱指数至今没有统一明确的定义。Niemyer等^[35]将融合多学科数据的干旱指数划分为两类:①考虑多种水文、气象、农业致旱因子的综合干旱指数(comprehensive drought indices);②基于多种单一干旱指数构建的组合干旱指数(combined drought indices)。Hao等^[36]将综合了多个致旱因子或指数的干旱指数定义为多元干旱指数(multivariate drought index, MDI),从指数构建方法的角度介绍了MDI指数的研究进展。世界气象组织(world meteorological organization, WMO)^[37]将基于加权或建模方法合并不同干旱指数得到的结果统称为综合(或混合)干旱指数(composite/hybrid drought indicators)。本文在前人研究的基础上,结合近几年的趋势,从指数构建理论方法和业务化应用两个方

面总结综合干旱指数的研究进展。需要指出的是,本文论述的综合干旱指数是通过集成多类型的干旱指数来表征干旱的多种尺度和多重影响,是一种广义的综合指数,可以是由公式直接计算得到的数值,也可以是基于多指数集成的综合模型的输出结果。

1 综合干旱指数构建方法

1.1 权重组合方法

权重组合方法是目前最常见的综合干旱指数构建方法^[38-40]。基于该法的综合干旱指数是通过选取各种单一干旱指数进行加权得到的,结构简单,易于理解;然而参与组合的指数分量及其权重的合理性,在很大程度上决定了这一类综合干旱指数能否大范围推广应用。指数分量及其权重分配方案,一般依据专家的经验判断和特定的服务需求,或者通过与站点上的干旱指数(如PDSI、SPI)或实际干旱影响(如实测土壤湿度、作物产量等)的相关分析来确定。Zhang等^[41]综合了多传感器微波遥测的降水、土壤湿度、地表温度等信息,对降水条件指数、土壤水分条件指数、温度条件指数进行线性组合,构建了一种综合干旱指数(microwave integrated drought index, MIDI),在与多种时间尺度的SPI指数进行相关分析时,MIDI指数展现了其在短期干旱监测方面的出色潜力;Lu等^[42]基于归一化处理的降水量指数、土壤湿度指数、地表温度指数和归一化植被指数,以及预设的15套权重方案,通过与PSDI指数、Palmer Z指数和多尺度的SPI等多个站点上的干旱指数进行相关性分析,构建具有最佳权重组合的综合干旱指数(integrated scaled drought index, ISDI),用于监测美国农业干旱事件,具有较好的稳健性和实用性。

当综合考虑的变量较多时,常采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)进行数据降维,将可能存在相关性的多个变量转换为少数几个彼此独立的新变量(即主成分),再按照主成分携带原始数据信息量的能力进行权重分配^[43-44]。卢金利等^[45]对分别考虑降水、蒸发、径流、土壤湿度的多种单一干旱指数进行主成分分析,构建了表征气象干旱、农业干旱的短期综合干旱指数和表征水文干旱的长期综合干旱指数。PCA能够降低旱情分级分类的难度,但由数据降维引起的信息损失,在一定程度上可能影响干旱监测结果的可靠性;此外,该法依赖于原始变量线性相关的假设,不适用于非线性情况。基于此,Rajsekhar等^[46]采用核熵成分分析方法(kernel entropy component analysis, KECA),综合

基于降水、土壤水分、径流量和蒸散发的多种指数变量,构建了非线性综合干旱指数(multivariate drought index, MDI),该指数基于核方法和信息熵理论,能以最小化的特征集最大限度地保留输入数据集的信息量,同时不受限于数据转换的线性假设。

1.2 多变量联合分布方法

多变量联合分布法也是一种构建综合干旱指数的常见方法,最具代表性的是 Copula 联合分布法。该法通过构造多个单一干旱指数的 Copula 联合概率分布函数,对其累积联合概率求逆得到综合干旱指数,既保留了各指数变量本身的边际分布,又能描述多种干旱指数之间复杂的依存关系^[47]。Hao 等^[48]通过计算 SPI 和 SSI 的 Copula 联合分布函数,提出了一种可对气象干旱和农业干旱进行综合评估的多变量标准化干旱指数(multivariate standardized drought index, MSDI),该指数已成功应用于全球综合干旱监测预测系统(global integrated drought monitoring and prediction system, GIDMaPS)^[49-51]。基于 Copula 联合分布的气象水文综合干旱指数研究也取得了一定进展,如张迎等^[52]采用 Frank Copula 函数,联合 SPI 和 SRI 两种指数构建了一种新型综合干旱指数 MSDIp(multivariate standardized drought index, parametrically);栗晓玲等^[53]基于 Gumbel Copula 函数,发展了联合 SPEI 和 SDI 的气象水文综合干旱指数(meteorology-hydrology drought index, MHDI);为了集成更多的气象水文要素信息,Shah 等^[51]采用 Gaussian Copula 函数,构造 SPI、SRI、SGI、SSI 等多种类型干旱指数的联合分布,得出的综合干旱指数(integrated drought index, IDI)成功捕捉到研究区内多场严重干旱事件,以及植被响应、径流和地下水异常。

然而,基于参数化 Copula 函数构造的综合干旱指数对统计检验和参数估计的要求十分严格,为了避免对于变量分布的假设,减轻拟合参数的计算负担,Hao 等^[50]基于非参数化联合分布方法对 MSDI 指数进行了改进,即采用 Gringorten 位置划分经验公式估算 SPI 和 SSI 的经验联合概率;李勤等^[54]考虑了潜在蒸散发对干旱的影响,采用经验 Copula 方法计算 SPEI、SSI 两种指数的经验联合分布,提出改进的 MSDI 指数(modified multivariate standardized drought index, MMSDI),提高了气象农业综合干旱监测的效果。

基于联合分布的综合干旱指数构建方法,通过描述多种干旱指数之间的依存关系来实现干旱的综合监测。然而,当综合的干旱指数数量较多时,不同指数之间的依存关系变得更加复杂,这将加大多元

分布估计和高维相关性建模的难度;另外,联合分布只能描述不同致旱因子之间的统计特性,对于干旱的内在机理仍缺乏充分合理的解释。

1.3 机器学习方法

随着干旱监测手段的发展与进步,干旱基础数据的丰富性和可用性不断提高;然而,不同来源数据之间的复杂联系及其时空尺度的不一致性,也给干旱分析工作带来了较大挑战。构建基于机器学习方法的综合干旱指数,为解决与干旱相关的数据挖掘问题提供了有效途径。采用机器学习算法,对由致旱因子或干旱指数序列组成的大量数据样本进行训练分析,求解相关分类问题或回归问题的决策函数,建立多种干旱指数与实际干旱状况之间的关联模型,从而基于模型输出结果(即综合干旱指数)来识别干旱事件并对其发生发展过程进行监测^[55-57]。常采用的机器学习算法包括决策树(decision tree)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)和支持向量机(support vector machine, SVM)。

决策树是指从无序的样本数据集中归纳分类规则并以树形结构表示的分类方法,代表算法为分类与回归树(classification and regression tree, CART)。CART 算法采用二分递归分割技术来划分自变量空间,经过多重决策生成二叉树结构,使用验证数据对决策树进行修剪,然后基于已分类的变量组,分别建立各自的统计回归规则和线性拟合模型。Brown 等^[58]采用 Cubist 分类回归软件,综合两种气象指数(SPI、sc-PDSI)、两种植被指数(季平均植被绿度百分比、植被异常起始点)和土地覆盖、土壤有效含水量、灌区、生态区等生物物理信息,建立基于规则的分类回归模型,提出了植被干旱响应指数(vegetation drought response index, VegDRI),该指数考虑了植被在不同生长阶段对水分胁迫的敏感性差异,在美国干旱业务监测中取得了较好的应用效果;综合地表干旱指数(integrated surface drought index, ISDI)^[59]在 VegDRI 指数的基础上还进一步考虑了地表水热条件和高程等信息,具有较高的空间分辨率,适用于大范围 and 局地两种尺度的干旱监测^[60-61]。刘高鸣等^[62]综合大气异常、土壤水分和植被状态等多方面的信息,基于 SPI、SPEI、TCI、VCI、TVDI 等指数构建了决策树模型,用于河南省农业干旱监测。

相较于决策树方法,ANN 和 SVM 更适合用于处理复杂非线性的干旱问题。ANN 是一个大规模的自适应系统,具有很强的非线性映射能力,可以避免致旱因子间的线性假设,Karamouz 等^[60]基于两种人工神经网络方法,使用 SPI、PDSI、SWSI 等不同类

型干旱指数对逐月干旱损失进行定量描述,再通过计算干旱损失的累积概率得到混合干旱指数(hybrid drought index, HDI),该指数考虑了研究区的气候、农业、水文、社会、经济等多种因素来评估干旱综合损失,可帮助干旱管理决策者全面了解干旱的严重程度及影响。然而,ANN方法对训练样本具有较强的依赖性和敏感性,可能导致过拟合现象^[61]。SVM是一类基于统计学习理论的机器学习算法,通过引入非线性映射和核函数,可将样本空间中的高度非线性问题转化为特征空间内的线性问题进行求解^[63],该法分类精度高,求解速度快,适合解决小样本问题,具有良好的泛化推广能力,但对参数调节和核函数的选择较为敏感^[56]。

基于机器学习方法构建的综合干旱指数,不仅能高效处理非正态分布数据,还能解决干旱指数时空尺度不一致的问题,但这类综合干旱指数基于对大量样本的模糊数据挖掘,适用于特定区域的干旱监测,外延性一般不理想,这与模型结构对训练数据以外的新鲜样本的适应能力(即模型泛化能力)有很大关系,应用时应格外关注模型优化算法和参数的合理性。

2 综合干旱指数业务化应用实例

2.1 美国干旱监测业务

由美国国家干旱减灾中心(national drought mitigation center, NDMC)牵头,联合美国农业部、商务部和内务部等多部门共同开发的干旱监测系统(USDM, U. S. drought monitor)(<https://droughtmonitor.unl.edu/>),综合利用了站点实测和遥感监测的水文气象资料,是美国现行的业务化干旱监测工具^[64-66]。该系统集成了基于站点计算的气候指数、数值模式模拟结果和全国400多位水文气候专家的经验知识,还考虑了干旱的实际影响,对全美当前的干旱状况以及近两周内的干旱演变情势进行监测。USDM产品由一幅描述全美范围干旱的监测图和概括干旱状况与影响的评述文字组成,每周发布一次。

USDM基于百分位法,将干旱严重程度划分为偏干(D0)、轻旱(D1)、中旱(D2)、重旱(D3)、特旱(D4)5个等级。干旱等级的阈值标准,最初由PDSI、SPI、标准化降水百分位数、气候预测中心模拟的土壤湿度(CPC/SM)、地质勘探局(U. S. geological survey, USGS)观测的周流量以及植被健康指数(vegetation health index, VHI)等6个关键指数和CMI、森林火险指数、水库蓄量等辅助指数来确定^[67]。为适应干旱监测业务的更高需求, SPEI、

VegDRI等干旱指数也被用于确定各级干旱触发水平^[68]。USDM采用干旱指数客观综合方法进行干旱状况分析,选取了PDSI、CPC/SM和30天降水等指数,计算这些单一指数的当前值在历史序列中的百分位数,再进行加权平均得到客观综合指数(objective blend of drought indicators, OBDI),用于确定干旱监测图上的各州干旱等级。然而,OBDI值仅代表当前干旱状况在多种时间尺度上的平均水平,难以区分由短期降水亏缺、长期降水亏缺导致的干旱影响。为了向用户提供不同时间尺度上的干旱信息,USDM使用两种客观综合干旱指数来同时监测短期干旱和长期干旱:短期综合干旱指数(short term OBDI, stOBDI)选取了Palmer Z指数、1个月的SPI指数(SPI-1)、3个月的SPI指数(SPI-3)、CPC/SM、PDSI等指数作为组合变量,如式(1)所示;长期综合干旱指数(long term OBDI, ltOBDI)则是由SPI-6、SPI-12、SPI-24、SPI-60、CPC/SM、PHDI等指数线性加权得到的,如式(2)所示。

$$I_{stOBDI} = a_1 Z + a_2 I_{SPI1} + a_3 I_{SPI3} + a_4 I_{SM} + a_5 I_{PDSI} \quad (1)$$

$$I_{ltOBDI} = b_1 I_{SPI6} + b_2 I_{SPI12} + b_3 I_{SPI24} + b_4 I_{SPI60} + b_5 I_{SM} + b_6 I_{PHDI} \quad (2)$$

式中: I_{stOBDI} 和 I_{ltOBDI} 分别为stOBDI值和ltOBDI值; Z 为Palmer Z指数值; I_{SPI1} 、 I_{SPI3} 、 I_{SPI6} 、 I_{SPI12} 、 I_{SPI24} 、 I_{SPI60} 分别为1个月、3个月、6个月、12个月、24个月、60个月的标准降水指数; I_{SM} 为CPC/SM值; I_{PDSI} 为PDSI值; I_{PHDI} 为PHDI值; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 分别为各指数分量的权重。

需要指出的是,这些综合干旱指数中的各指数分量及其权重不是固定的,在特定地点和季节会有所变化^[69]。USDM产品制作者将基于区域干旱特征和当地干旱影响报告,合理选取用于加权的各项单一指数,并调整其权重系数。例如,针对美国西部地区,考虑到长期干旱对当地积雪和地表水资源的影响,该区的ltOBDI指数采取了一套自定义的指数加权方案,将SPI-6替换为60个月的Palmer Z指数。

然而,仅仅凭借OBDI指数计算的一个干旱等级去表征区域整体的干旱状况,不足以体现更精细空间分辨率下的干旱细节。对此,USDM采取的解决策略是利用综合干旱指数掌握全局的干旱状况,确定干旱集中区,再针对特定部门的需求和具体影响采用专门的指数进行干旱监测,如USGS和NDMC研发的植被干旱响应指数VegDRI,具有1km的空间分辨率,能够提供连续、大范围、实时的干旱信息^[70],可协助OBDI指数监测干旱事件的强度和范围,便于当地干旱响应和减灾计划的实施;同时,

开展 OBDI 指数在不同区域或季节的反复评估试验,以期将干旱监测产品的空间分辨率整体提高至县级水平^[69]。USDM 成熟的专家反馈机制,能够及时获取各州市干旱状况及其影响的真实信息,可有效校正 OBDI 的监测结果^[66]。

2.2 欧洲干旱监测业务

欧洲干旱观察(European drought observatory, EDO)是欧盟委员会联合研究中心(Joint Research Center, JRC)为开发欧洲干旱信息系统而设立的一种监测预测工具^[71]。EDO 通过多渠道整合欧洲大陆、国家、地区和流域的气象、水文和遥感等多源信息,基于一系列不同类型的干旱指数来监测干旱事件的发生和演变(<https://edo.jrc.ec.europa.eu>),可为欧洲干旱准备和预警提供及时权威的在线信息服务。

EDO 采用综合干旱指数(combined drought indicator, CDI)来识别和监测农业干旱及其影响,时间尺度为 10 d,空间分辨率为 5 km,能够较为准确地捕捉区域的农业干旱事件。CDI 指数考虑了降水亏缺、土壤水分不足以及卫星观测的植被生长异常等因素,综合了 EDO 系统中使用的 3 个主要干旱指数:标准化降水指数 SPI、土壤水分异常指数(soil moisture anomaly, SMA)和植被光合有效辐射比(fraction of absorbed photosynthetically active radiation, fAPAR)。采用 5 个干旱级别来划分干旱影响水平,分别对应农业干旱演变过程的不同阶段^[72]:观察级别(watch)表示出现降水亏缺;警戒级别(warning)表示土壤湿度异常和降水亏缺相伴发生;警报级别(alert)表示干旱开始影响植被的正常生长;部分恢复级别(partial recovery)表示经过一段时间干旱后,气象条件恢复正常但植被生长还未恢复;完全恢复级别(full recovery)表示气象条件和植被生长均恢复正常状态。

CDI 指数综合利用了大气降水、土壤墒情和遥感反演的植被状况等多源观测信息,可在一定程度上减少农业干旱监测中的虚假警报;同时提供相对统一的指数形式,有利于农业部门进行有效的干旱风险管理和决策^[64]。然而,CDI 指数也存在一些局限性,如没有考虑不同地区不同类型植被的生长季差异,在有云的情况下无法监测植被水分胁迫,应进一步引入作物生育期等物候学指数,结合地表温度指数和其他植被指数来更好地表征植被对干旱的响应^[72]。

2.3 中国干旱监测业务

中国气象局国家气候中心于 1995 年开发的“全国旱涝气候监测、预警系统”,经过 20 多年的发展

和实践,在干旱业务方面已经实现了降水量距平百分率(precipitation anomaly in percentage, PA)、相对湿度指数(relative moisture index, MI)、SPI、SPEI、PSDI 等多种指数的实时监测^[65,73]。目前该系统采用气象干旱综合指数(meteorological drought composite index, MCI)对全国范围内的干旱发生、发展情势进行逐日监测(http://cmdp.ncc-cma.net/extreme/dust.php?product=dust_moni)。

MCI 指数是在综合气象干旱指数(comprehensive meteorological drought index, CI)(参考 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》)的基础上改进得到的。CI 指数基于权重组合方法综合了近 30 天和近 90 天的 SPI 指数以及近 30 天的相对湿度指数,考虑了月、季尺度的降水异常和影响作物生长的短期水分亏缺,适用于实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估^[74-75]。然而,CI 指数对降水过程的反应过于敏感,对重大干旱事件的旱情描述偏轻,且存在不连续的旱情加重现象。针对这些问题,学者们从调整降水量权重、增加 60 天降水、引入不等权重思想等方面对 CI 指数进行了许多改进^[76-79]。国家气候中心提出的 MCI 指数引进了 60 天的标准化权重降水指数,补充考虑了 150 天降水对干旱累积的影响,同时添加了季节调节系数,根据不同季节不同地区农作物生长发育各个阶段对土壤水分的敏感程度差异来调整,计算公式如式(3)所示,具体计算步骤见 2017 年发布的 GB/T 20481—2017《气象干旱等级标准》。MCI 指数充分考虑了前期不同时间尺度的降水和蒸散发,使得干旱发展的累积效应更加突出,适用于作物生长季逐日气象干旱的监测评估。然而,GB/T 20481—2017《气象干旱等级标准》中基于南北方气候的差异对 MCI 指数制定的两套权重组合方案,已然无法满足各省的干旱监测业务需求,在实际应用中一般根据当地旱灾情势修正各组合分量系数,以增强 MCI 指数的本地化应用效果和区域适用性^[80-82]。

$$I_{MCI} = K_a(aI_{SPIW_2} + bI_{MI1} + cI_{SPI3} + dI_{SPI5}) \quad (3)$$

式中: I_{MCI} 为 MCI 值; K_a 为季节调节系数; I_{SPIW_2} 为 SPIW₂值; I_{SPI5} 为 5 个月的标准化降水指数; I_{MI1} 为 1 个月(近 30 d)的相对湿度指数; a 、 b 、 c 、 d 分别为各指数分量的权重系数,在南北方取值有差异。

3 研究展望

3.1 加强干旱过程内在机理性研究

干旱的形成与大气、土壤、地表水、地下水以及植被生理等过程密切相关,这些物理过程是高度非线性的,且存在多种反馈机制,气候变化与人类活动

更加剧了干旱过程的复杂性。目前的干旱研究常将一个完整的自然水循环过程割裂开来考虑,现有综合干旱指数大多难以反映多种干旱相关过程之间的物理联系,不能全面地揭示干旱过程的内在机理^[83-84]。因此,为了更准确地监测干旱的时空变化和广泛影响,构建能够体现干旱物理机制的综合干旱指数很有必要。今后的干旱指数研究应深入认识不同时空尺度水循环过程的干旱形成机理,明晰降水、土壤水、温度、植被等多种因素在干旱发生发展过程中的作用机制,尤其是作物对干旱的响应和滞后效应;此外,也要关注工业、城乡居民、生态等干旱影响对象的用水需求,将干旱对社会经济造成的影响纳入综合干旱指数中。

3.2 提高多源信息融合水平

基础数据的丰富性和可靠性,在很大程度上影响着综合干旱指数的精度。目前干旱相关变量的主要数据来源是地面站点观测和卫星遥感监测,水文气象站网能够获取长期、连续、稳定的观测资料,但受站点密度的限制,获取的数据量有限,且空间覆盖不连续,难以用于大范围区域干旱监测;遥感卫星通过搭载多种不同类型的传感器,可获取大范围近实时的降水、土壤湿度、地表温度、土地覆盖、植被状况等信息,具有较高的空间分辨率,为全球干旱监测提供了丰富的数据来源^[85-86]。然而卫星遥感产品也深受反演算法、射频干扰、复杂气象条件和下垫面特性等因素的影响^[87-88],具有较大的不确定性,且不同遥感产品的时空分辨率和监测精度差异较大,综合应用有一定难度。陆面数据同化系统利用资料同化技术对多种来源的历史观测资料进行质量控制和同化处理,重构长系列、高时空分辨率的再分析资料,在一定程度上改善了遥测数据的不确定性问题,但也受制于数据同化采用的误差估计与处理方法^[75,85]。因此,结合地面站点、卫星遥感、雷达探测等多种观测手段,整合水文、气象、农业、生态和社会经济等多种信息,进一步改进多源数据的时空同化技术,提高资料的综合利用水平,是未来综合干旱指数研究的重要方向。

3.3 完善精度评价体系

精度评价是检验干旱指数应用效果的重要环节。目前,干旱指数精度评价的常用方法有:①与USDM、EDO等业务化干旱监测产品的监测结果进行对比;②与一些公认的干旱指数(如SPI、PDSI)评估的干旱状况进行相关分析,根据相关系数大小评估所选干旱指数的监测精度;③结合当地新闻报道或文献资料对已发生的重大干旱事件的旱情描述,对指数的监测效果进行定性评价。然而,这些验证

方法都有一定的区域适用性限制,不同类型干旱指数的精度评价方法也不尽相同,这使得用户难以对各指数监测效果进行一致的比较,从而给特定区域和季节的干旱监测增加了难度。为了提高综合干旱指数在实际干旱监测中的准确性和适用性,需要构建统一的干旱指数精度验证体系。可借鉴美国干旱监测中采用专家验证反馈的成功经验,基于主客观证据融合方法对综合干旱指数进行一系列定性和定量评估,以全面了解各指数的优势和不足,从而为研究区选取合适的综合干旱指数;此外,当地干旱影响报告也是一种干旱指数精度评估的手段,结合作物受旱/成灾面积、河流断流情况、人畜饮水困难等统计资料进行验证分析,但应注意辨明这些影响或损失的成因是否与干旱有关。

4 结 语

融合多源信息的综合干旱指数,能够较为准确及时地监测干旱的发生发展过程、客观全面地评估干旱的影响程度和范围,可为减少干旱造成的损失提供技术支撑。目前,综合干旱指数的常用构建方法有权重组、联合分布和机器学习方法等,权重组合方法的关键在于指数分量的选取及合理赋权,联合分布方法通过构造联合分布函数来推求多种干旱指数的联合累积概率,机器学习方法则基于对大量干旱基础数据的训练来挖掘干旱指数与干旱状况之间的模糊空间关联性。然而,这些方法多从统计学的角度去整合多种干旱指数,而对于干旱发生发展过程中各致旱因子的相互作用反映不足,无法给出关于干旱形成演变机制的科学合理的解释;此外,对于综合干旱指数的监测效果,仍缺乏有效的评估方法和手段。为进一步加强综合干旱指数在区域干旱监测评估中的适用性,今后的综合干旱指数研究应聚焦以下几个方面:①从水循环过程各致旱因子的相互作用机制出发,强化综合干旱指数的内在机理研究;②改进多源数据的时空同化技术,提高综合干旱指数的信息融合水平;③发展统一有效的干旱监测验证方法,完善综合干旱指数精度评价体系。

参考文献:

- [1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions [M]. London: Routledge, 2000.
- [2] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [3] 吕娟, 高辉, 孙洪泉. 21世纪以来我国干旱灾害特点及成因分析 [J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(5): 38-43. (LYU Juan, GAO Hui, SUN Hongquan. Analysis of the characteristics and causes of drought disasters in China

- since the 21st century [J]. China Flood & Drought Management, 2011, 21(5) :38-43. (in Chinese))
- [4] 冯杰. 我国抗旱减灾技术需求分析及推广应用 [J]. 水利水电技术, 2010, 41(10) :1-5. (FENG Jie. Demand analysis on technology of drought resistance and disaster mitigation and its promotion and application in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10) :1-5. (in Chinese))
- [5] UNISDR. Global assessment report on disaster risk reduction: revealing risk, redefining development [R]. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2011.
- [6] LLOYD-HUGHES B. The impracticality of a universal drought definition [J]. Theory Apply Climatology, 2014, 117:607-611.
- [7] HAYES M J. Drought indices [M]. Atlanta: American Cancer Society, 2006.
- [8] PALMER W C. Meteorological drought [R]. Washington D. C. : US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [9] ALLEY W M. The palmer drought severity index as a measure of hydrological drought [J]. Water Resources Bulletin, 1985, 21(1) :105-114.
- [10] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2004, 17(12) :2335-2351.
- [11] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scale [C] // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [12] GUTTMAN N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 34(1) :113-121.
- [13] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MOREN O. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7) :1696-1718.
- [14] 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))
- [15] ZHANG B Q, ZHAO X N, JIN J M, et al. Development and evaluation of a physically based multi-scalar drought index: the standardized moisture anomaly index [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120:11575-11588.
- [16] ZHANG B Q, AGHAKOUCHAK A, YANG Y T, et al. A water-energy balance approach for multi-category drought assessment across globally diverse hydrological basins [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 264:247-265.
- [17] GUTTMAN N B. A sensitivity analysis of the Palmer hydrologic drought index [J]. Water Resources Bulletin, 1991, 27(5) :797-807.
- [18] SHAFER B A, DEZMAN L E. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas [C] // Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference. Kalispell: AIP Publishing, 1982:164-175.
- [19] NALBANTIS I. Evaluation of a hydrological drought index [J]. European Water, 2008, 23(24) :67-77.
- [20] NALBANTIS I, TSAKIRIS G. Assessment of hydrological drought revisited [J]. Water Resources Management, 2008, 23(5) :881-897.
- [21] PALMER W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index [J]. Weatherwise, 1968(21) :156-161.
- [22] AGHAKOUCHAK A. A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(7) :2485-2492.
- [23] 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 Earth System Science, 2011, 15:2881-2894.
- [24] NARASIMHAN B, Srinivasan R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1) :69-88.
- [25] ROUSE J W, HAAS R H, DEERING D W, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation [R]. College Station: Remote Sensing Center, Texas A & M University, 1974.
- [26] KOGAN F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8) :1405-1419.
- [27] KOGAN F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11) :91-100.
- [28] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1) :195-213.

- [29] HEIM J, RICHARD R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [30] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of drought indices[J]. Dossiers Environment, 2011, 19(1): 333-349.
- [31] 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. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763-778. (in Chinese))
- [32] 吕娟, 苏志诚, 屈艳萍. 抗旱减灾研究回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 437-441. (LYU Juan, SU Zhicheng, QU Yanping. Review and prospect of research on drought mitigation[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 437-441. (in Chinese))
- [33] 粟晓玲, 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. Progress and perspective of drought index [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 9-18. (in Chinese))
- [34] 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 multisource information [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 275-287. (in Chinese))
- [35] NIEMEYER S. New drought indices [J]. Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens, 2008, 80: 267-274.
- [36] HAO Z, SINGH V P. Drought characterization from a multivariate perspective: a review [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 668-678.
- [37] SVOBODA M, FUCHS B A. Handbook of drought indicators and indices[M]. Geneva: World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016.
- [38] 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(12): 2875-2887.
- [39] XIA Y, EK M B, MOCKO D, et al. Uncertainties, correlations, and optimal blends of drought indices from the NLDAS multiple land surface model ensemble [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 15(4): 1636-1650.
- [40] XIA Y, EK M B, PERTERS-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(6): 2947-2965.
- [41] ZHANG A, JIA G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134(7): 12-23.
- [42] 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: 10-20.
- [43] KEYANTASH J A, DRACUP J A. An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage [J]. Water Resources Research, 2004, 40(9): 333-341.
- [44] 常文娟, 梁忠民, 马海波. 基于主成分分析的干旱综合指标构建及其应用 [J]. 水文, 2017, 37(1): 33-38. (CHANG Wenjuan, LIANG Zhongmin, MA Haibo. Construction of drought composite indicator based on principal component analysis and its application [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1): 33-38. (in Chinese))
- [45] 卢金利, 徐向红, 王国平, 等. 西南地区短期/长期综合干旱指数的构建与应用 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 681-688. (LU Jinli, XU Xianghong, WANG Guoping, et al. Development and application of the short-term/long-term composite drought index in the southwestern China [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4): 681-688. (in Chinese))
- [46] RAJSEKHAR D, SINGH V P, MISHRA A K. Multivariate drought index: an information theory based approach for integrated drought assessment [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526(11/12): 164-182.
- [47] KAO S C, GOVINDARAJU R S. A copula-based joint deficit index for droughts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1/2): 121-34.
- [48] HAO Z, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. Advances in Water Resources, 2013, 57(9): 12-18.
- [49] HAO Z, AGHAKOUCHAK A, NAKHJIRI N, et al. Global integrated drought monitoring and prediction system [J]. Scientific Data, 2014, 1: 140001.
- [50] HAO Z, AGHAKOUCHAK A. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework [J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(1): 89-101.
- [51] SHAH D, MISHRA V. Integrated drought index (IDI) for drought monitoring and assessment in India [J]. Water Resources Research, 2020, 56(2): WR026284.

- [52] 张迎, 黄生志, 黄强, 等. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 703-714. (ZHANG Ying, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (6): 703-714. (in Chinese))
- [53] 栗晓玲, 梁箏. 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))
- [54] 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))
- [55] 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.
- [56] 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))
- [57] 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(1): 137-159.
- [58] BROWN J F, WARDLOW B D, TADESSE T, et al. The vegetation drought response index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation[J]. GIScience and Remote Sensing, 2008, 45: 16-46.
- [59] WU J, ZHOU L, LIU M, et al. Establishing and assessing the integrated surface drought index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, 2013, 23: 397-410.
- [60] KARAMOUZ M, RASOULI K, NAZIF S. Development of a hybrid index for drought prediction: a case study [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(6): 617-627.
- [61] LIU X F, ZHU X F, ZHANG Q, et al. A remote sensing and artificial neural network-based integrated agricultural drought index: index development and applications [J]. Catena, 2020, 186: 104394.
- [62] 刘高鸣, 谢传节, 何天乐, 等. 基于多源数据的农业干旱监测模型构建[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11): 1811-1822. (LIU Gaoming, XIE Chuanjie, HE Tianle, et al. Agricultural drought monitoring model constructing based on multi-source data[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(11): 1811-1822. (in Chinese))
- [63] 陈永义, 俞小鼎, 高学浩, 等. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(I): 支持向量机方法简介[J]. 应用气象学报, 2004(3): 345-354. (CHEN Yongyi, YU Xiaoding, GAO Xuehao, et al. A new method for non-linear classify and non-linear regression (I): introduction to support vector machine [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004(3): 345-354. (in Chinese))
- [64] 姚国章, 袁敏. 干旱预警系统建设的国际经验与借鉴[J]. 中国应急管理, 2010(3): 43-48. (YAO Guozhang, YUAN Min. International experience and reference for the construction of Drought Early Warning System[J]. China Emergency Management, 2010(3): 43-48. (in Chinese))
- [65] 苏志诚, 孙洪泉. 国内外干旱监测评估信息化建设现状分析及建议[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 19-21. (SU Zhicheng, SUN Hongquan. Analysis and suggestions on the research status of drought monitoring and evaluation information construction [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(3): 19-21. (in Chinese))
- [66] 王芝兰, 周甘霖, 张宇, 等. 美国干旱监测预测业务发展及其科学挑战[J]. 干旱气象, 2019, 37(2): 183-197. (WANG Zhilan, ZHOU Ganlin, ZHANG Yu, et al. Progresses and challenges on drought monitoring and forecast in the United States [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(2): 183-197. (in Chinese))
- [67] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [68] SVOBODA M, HAYES M, MICHAEL J, et al. Recent advances in drought monitoring [C]// Proceedings of the 14th Conference on Applied Climatology. Seattle: Drought Mitigation Center Faculty Publications, 2004.
- [69] SIVAKUMAR MANNAVA V K, RAYMOND P, MOTHA D A. Agricultural drought indices [C]// Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices. Murcia: WMO, 2010.
- [70] HAO Z, YUAN X, XIA Y, et al. An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(9): 1879-1896.
- [71] HORION S, CARRAO H, SINGLETON A, et al. JRC experience on the development of drought information systems. Europe, Africa and Latin America [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [72] SEPULCRE-CANTO G, HORION S, CARRAO H, et al.

- Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12: 3519-3531.
- [73] 王有民, 张强, 邹旭恺. 干旱指标研究进展及国家级干旱监测业务介绍 [C] // 中国气象学会 2007 年气候学会分会论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 8.
- [74] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinese))
- [75] 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))
- [76] 赵海燕, 高歌, 张培群, 等. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性 [J]. *应用气象学报*, 2011, 22(6): 698-705. (ZHAO Haiyan, GAO Ge, ZHANG Peiqun, et al. The modification of meteorological drought composite index and its application in southeast China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(6): 698-705. (in Chinese))
- [77] 杨丽慧, 高建芸, 苏汝波, 等. 改进的综合气象干旱指数在福建省的适用性分析 [J]. *中国农业气象*, 2012(4): 133-138. (YANG Lihui, GAO Jianyun, SU Rubo, et al. Analysis on the suitability of improved comprehensive meteorological drought index in Fujian Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012(4): 133-138. (in Chinese))
- [78] 李红梅, 王钊, 高茂盛. CI 指数的改进及其在陕西省的适用性分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3): 260-266. (LI Hongmei, WANG Zhao, GAO Maosheng. The improved of comprehensive meteorological drought index and its application in Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 260-266. (in Chinese))
- [79] 陈家宁, 孙怀卫, 王建鹏, 等. 综合气象干旱指数改进及其适用性分析 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 71-77. (CHEN Jianing, SUN Huaiwei, WANG Jianpeng, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(16): 71-77. (in Chinese))
- [80] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 气象干旱综合监测指数在湖北的本地化应用及其适用性分析 [J]. *气象科技*, 2014, 42(2): 341-347. (QIN Pengcheng, LIU Min, WAN Suqin, et al. Modification and applicability evaluation of comprehensive monitoring index of meteorological drought in Hubei Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(2): 341-347. (in Chinese))
- [81] 杨玮, 谢五三, 王胜, 等. 气象干旱综合监测指数在安徽省的适用性分析 [J]. *气象科技*, 2018, 46(5): 988-998. (YANG Wei, XIE Wusan, WANG Sheng, et al. Comparison of comprehensive meteorological drought index with other drought indices and its applicability in Anhui province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(5): 988-998. (in Chinese))
- [82] 王春学, 张顺谦, 陈文秀, 等. 气象干旱综合指数 MCI 在四川省的适用性分析及修订 [J]. *中国农学通报*, 2019, 35(9): 115-121. (WANG Chunxue, ZHANG Shunqian, CHEN Wenxiu, et al. Applicability and revision of MCI in Sichuan Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(9): 115-121. (in Chinese))
- [83] 章树安, 王爱平, 杨桂莲, 等. 旱情监测与评价进展研究与思考 [J]. *水文*, 2010, 30(3): 15-21. (ZHANG Shuan, WANG Aiping, YANG Guilian, et al. Thought and research on progress of drought severity monitoring and assessment [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(3): 15-21. (in Chinese))
- [84] 郝增超, 侯爱中, 张璇, 等. 干旱监测与预报研究进展与展望 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(11): 30-40. (HAO Zengchao, HOU Aizhong, ZHANG Xuan, et al. Study progresses and prospects of drought monitoring and prediction [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(11): 30-40. (in Chinese))
- [85] 摆玉龙, 李新, 韩旭军. 陆面数据同化系统误差问题研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 795-804. (BAI Yulong, LI Xin, HAN Xujun, et al. A review of error problems for land data assimilation systems [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 795-804. (in Chinese))
- [86] MUKHERJEE S, MISHRA A, TRENBERTH K E. Climate change and drought: a perspective on drought indices [J]. *Current Climate Change Reports*, 2018, 4(2): 145-163.
- [87] AGHAKOUCHAK A, FARAHMAND A, MELTON F S, et al. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities [J]. *Review of Geophysics*, 2015, 53: 452-480.
- [88] CROW W T, KOSTER R D, REICHLER R H, et al. Relevance of time-varying and time-invariant retrieval error sources on the utility of spaceborne soil moisture products [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): L24405.

(收稿日期: 2020-11-25 编辑: 王 芳)