

干旱指数应用研究综述

沈彦军^{1,2}, 李红军¹, 雷玉平¹

(1. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 石家庄 050022;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 干旱指数作为干旱程度的量化指标, 在干旱监测、预测和水资源管理中起着重要作用, 同时也是水文水资源研究领域的有效工具。近十几年来, 对干旱指数的开发和改进取得了重要进展, 包括将影响干旱的耗水指标-蒸散引入了指数计算、提高了模型模拟参数的精度、与水文过程模型算法相结合等方面。在干旱指数应用方面的研究, 主要包括区域干旱反演与预测、作物产量预测、森林火险检测、古气候重建等。干旱指数的开发及应用为区域干旱监测和水资源管理提供了有效手段, 但还需要把定量化和综合评估作为主要发展方向, 提高模型监测的精确度和可靠性, 从而为快速监测干旱提供新的选择和技术途径。

关键词: 干旱指数; 干旱监测; 产量预测; 火险检测; 古气候重建; 研究进展

中图分类号: S166; P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0128-06

Research Review on Application of Drought Index

SHEN Yan Jun^{1,2}, LI Hong Jun¹, LEI Yu Ping¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a quantitative indicator of drought, drought index plays an important role in the monitoring and forecasting of drought and water resources management, and it is also a useful research tool in the field of hydrology and water resources. Over the last decade, the primary progress in the development and improvement of drought index involved the introduction of evapotranspiration as a factor of the index calculation, which can improve the parameter accuracy in model simulation and combine with the model algorithm of hydrological process. The application of drought index included the inversion and prediction of regional drought, crop yield prediction, forest fire detection, and paleoclimate reconstruction. The development and application of drought index provided an effective tool for regional drought monitoring and water resources management; however, the quantification and comprehensive evaluation of drought index should be considered as research priorities, which can help improve the accuracy and reliability of model monitoring and thus provide new options and technical approaches for rapid monitoring of drought.

Key words: drought index; drought monitoring; yield prediction; forest fire detection; paleoclimate reconstruction; research progress

干旱是世界上主要的自然灾害之一, 发生频率高, 发生过程缓慢。干旱灾害不仅较其他自然灾害影响范围广^[1], 而且危害巨大, 造成水资源短缺、作物减产或绝收、饥荒与流行病扩散, 甚至导致人口迁移。随着社会经济发展、人口持续增长、全球变化引起的气候变暖等问题的影响, 水资源短缺等问题日趋严重, 这也直接导致了干旱地区不断扩大和干旱化程度加重。干旱灾害对北美、欧洲、亚洲、澳大利亚、非洲

等均造成了极其严重的危害, 已成为全球关注的问题^[2,3]。

干旱及其影响的分析和评估需要一定的量化标准。干旱指数作为一种最常用的评价指标, 结合影响干旱的气象、水文等参数, 可以对干旱强度、持续时间、频率、危害等进行客观地时空比较, 一方面是旱情监测和发布等干旱管理的重要工具, 另一方面在区域干旱评价和资源环境研究领域也有较多的应用。近年来, 干旱指数开发以及应用取得了较大的

收稿日期: 2013-01-30 修回日期: 2013-05-28 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1309.005.html>

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-EW-J5); 河北省自然科学基金(D2013503039)

作者简介: 沈彦军(1986), 男, 内蒙正镶白旗人, 硕士研究生, 主要从事3S技术与干旱指数方面研究。E-mail: sheryanjun860517@163.com

通讯作者: 雷玉平(1964), 男, 江西进贤人, 副研究员, 主要从事区域蒸散模拟与生态水文方面研究。E-mail: Leiyip@sjziam.ac.cn

发展,对干旱指数及其应用加以综述和评价,可以为干旱的监测和评估、特别是干旱指数在区域资源环境、跨学科多领域的应用提供方法和依据。

1 干旱的定义和指数分类

1.1 干旱的定义

鉴于对干旱研究的角度和侧重点不同,目前世界上没有一个统一的干旱定义可以充分表述干旱的强度、持续时间、危害以及对不同用户的潜在影响^[4]。Palmer^[5]提出干旱为“持续异常的水分亏缺”;Heddinghaus^[6]定义干旱为“一个地区持续一段时间的水分亏缺”;国际气象界定义干旱:“长时期缺乏降水或降水明显短缺”^[4];中国国家气象局定义干旱为“因水分的收与支或供与求不平衡而形成的持续的水分短缺现象”。美国气象学会^[7]在总结各种干旱定义的基础上把干旱大致概括为四类:气象干旱(一个地区一段时间内的降水亏缺)、农业干旱(在无地表水资源供给情况下,一段时期土壤水分减少而造成的作物减产或失收现象)、水文干旱(一段时间降水减少导致的地表和地下水资源亏缺现象)、社会经济干旱(水资源供需的时空不平衡影响相关社会经济活动的现象)。

1.2 干旱指数分类

1.2.1 基于地面气候数据的干旱指数

传统的干旱监测方法是基于地面台站观测或实验观测,对观测数据进行统计分析来对干旱情况进行量化分析。但由于干旱特征及其影响的复杂性,很难找到一种普遍适用于各种用途的干旱指数,因此应用于不同需求的干旱指数得到发展,见表1。经过近几十年的发展,出现的干旱指数不下几十种。各种干旱指数在特定地域及时间范围内都有其相对的合理性,具有重要的理论和应用价值。

1.2.2 基于遥感监测的干旱指数

遥感具有覆盖范围广、空间分辨率高、时效性强等优点,可直接或间接反演大范围干旱所需的地表参数,使大区域、实时动态的干旱监测成为可能。基于遥感监测的干旱分析通常应用于农业领域,其本质是反演土壤水分及由此引起的植物生长生理及形态指标的变化。微波遥感法和热惯量法被认为是较具潜力的土壤湿度遥感反演方法,而基于遥感参数的作物形态指标和生理指标衍生出了遥感干旱监测综合指标^[19,21]。以遥感手段来获取地球表面的气象和生物物理特征,在干旱反演和监测方面潜力巨大,因此基于遥感监测的干旱指数的开发和应用得到了广泛关注,见表2。

2 干旱指数的开发

传统的干旱定量方法主要依靠气候统计,部分指数忽略了气温、土壤等因素对干旱的影响,在评估不同水文系统的干旱和区别不同类型的干旱时,缺乏针对性。科技工作者们致力于解决这些问题,针对影响干旱的因素及不同的应用领域,不断研发与应用相关的干旱指数。

2.1 基于蒸散角度的干旱指数开发

蒸散(Evapotranspiration, ET)作为一个有效反演地表干旱的参数,被广泛用来监测陆地表层干旱。近些年,学者们致力于提高干旱反演的精度,把影响干旱的耗水指标——蒸散

表1 主要干旱指数及其应用

Table 1 The main drought indices and their applications

干旱指数	分析变量	优缺点
降水距平百分率 Pa	降水量	直观反映降水异常引起的干旱;降水单因素不够全面
标准降水指数 SPI ^[8]	降水量	表征时段降水量出现的概率。资料容易获取,具有多时间尺度特征,计算性能稳定;但没有考虑前期径流蒸散,容易受极端降水事件的影响,无法识别旱涝频发的地区 ^[9] 。
Palmer 指数 ^[5]	土壤水分平衡各分量(降水、蒸散量)	把所有降水处理成雨水不精确 ^[10] ;参数根据美国台站设计,实际应用中需要调整,不能很好区分干旱起止点 ^[11] ;难以反映交替干旱现象;潜在蒸发计算误差大,缺乏人为因素的影响 ^[12,13]
综合气象干旱指数 CMI ^[4]	降水、潜在蒸散	计算简便,适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估 ^[15] ;未考虑人类活动影响,不能完全反映农业干旱 ^[16]
土壤相对湿度干旱指数 R	土壤含水量、田间持水量	适于某时刻土壤水分盈亏监测,由于土壤有效水分受土壤特性的影响,使用时需根据当地土壤性质的具体情况对等级划分范围做适当调整
作物水分指数 CMI ^[17]	温度、降水	增加了潜在蒸散的因素,能快速反映农作物的土壤水分状况;适宜作物生长季短期干旱的监测 ^[4]
地表供水指数 SW-SI ^[18]	积雪、水库蓄水、流量、降水	可以很好的指示降雪的情况和地表水的供应,但不同的流域不能相比,只能计算季节的指数 ^[4]

引入了指数计算。T sakiris 等^[33]结合蒸散变量开发了侦测干旱指数 RDI, RDI 基于降水和潜在蒸散的累积值,可以计算多种时间尺度,但相比 SPI 增加了蒸散因素,可以有效地评估气象干旱。Yao 等^[34]开发了蒸发干旱指数 EDI, 取值的范围为 0~ 1, 值越大指数水分缺乏越严重,可作为土壤表层水分的干旱指示器。EDI 计算简单、所需参数少,但计算 ET 是指数的最关键部分。2011 年, Yao 等^[35]对影响 ET 的空气温度、净辐射等进行了线性组合,简化了蒸发部分,利用 EDI 对全球地表干旱模拟,很好地反演长期大尺度的地表水分干旱情况。

2.2 基于径流角度的干旱指数开发

径流量受降水等因素的影响,是反映水文干旱的一个主要指标,在水资源干旱管理及流域水循环模拟过程中有着重要作用。Shukla^[36]基于标准降水指数 SPI 的原理,开发了标准径流指数(SRI)来反演水文干旱。SRI 基于月、季尺度,尽管参数简单,但基于长时间序列数据可以很好的反演气象干旱对水文过程的影响和进行水资源管。Wang 等^[37]基于河西走廊内陆河月径流量定义了径流量干旱指数 Zrd。作者考虑径流量并不是正态分布而是泊松分布,因此将径流分布转换成标准正态分布,并且对干旱指数分为 5 级来指示水文旱涝,同时对径流干旱指数和作物产量的相关性做了有意义的探索。

2.3 基于土壤水分平衡原理的干旱指数开发

将土壤水分平衡和植物需水特征结合起来,可以有效反映土壤水分亏缺情况和进行水分管理。基于此, Narasimhan^[38]等利用周尺度土壤水分和蒸散计算了土壤水分亏缺

表 2 典型遥感干旱监测指数及其适用性

Table 2 Typical remote sensing indices for drought monitoring and their applications

指数名称	指数算法	优缺点
归一化植被指数	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$	NDVI 反映植被覆盖度和作物长势
增强型植被指数	$EVI = \frac{2.5(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + 6R_{Red} - 7.5R_{blue} + 1)}$	较真实反映区域内植被空间变异 ^[27] ; 对数据质量要求高, 需要地面参数验证 ^[23]
植被状态指数 ^[24]	$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	比 NDVI 更能反映水分胁迫状况 ^[25] ; 指示植被生长状况及时空变化, 季节性明显 ^[26]
温度植被干旱指数 ^[27]	$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{a + b \times NDVI - LST_{min}}$	反演土壤湿度, 容易受土壤背景的影响
条件植被温度干旱指数 ^[28]	$VTCl = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}$ $LST_{max} = a + b \times NDVI$ $LST_{min} = a' + b' \times NDVI$	监测特定年内特定时期区域级的相对干旱程度的空间变化, 具有地方专一性和时域专一性的特点
温度条件指数 ^[29]	$TCI = \frac{(LST_{max} - LST)}{(LST_{max} - LST_{min})}$	不受作物生长季的限制, 但因作物的冠层温度随时间的变化而导致旱情的标准难以确定
归一化水分指数 ^[30]	$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}}$	客观体现地表植被水分信息, 指示水分异常; 对作物生长前期或植被覆盖度较低情况下的旱情监测效果欠佳
植被供水	$VS WI = \frac{NDVI}{LST}$	指数反映土壤水分不如 TVDI 效果好 ^[31] , 监测生长季干旱动态时要求植被覆盖度良好, 下垫面差异较小 ^[32]

注: R_{Red} 、 R_{NIR} 、 R_{blue} 分别代表红、近红、蓝波段的反射率; $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 分别代表 NDVI 同期多年的最小值和最大值; LST 代表地表温度, 单位为 K; a 、 b 分别为植被温度特征空间中干边的截距和斜率, a' 、 b' 分别为湿边的截距和斜率; R_{860} 、 R_{1240} 分别代表 860 nm 和 1 240 nm 波长的地表反射率。

指数 SMDI 和蒸散亏缺指数 ETDI 来指示农业干旱。SMDI 基于作物不同生长阶段对各层土壤水利用率来进行分层计算, SMDI 值的范围从 -4~4, 分别代表干旱和湿润情况, 很好地指示了短期干旱情况及土壤水分的变化情况。Vijendra^[39]等在分析作物生育期各生育阶段水需求的基础上开发了土壤水分指数 SMI, SMI 为实际蒸散与作物需水的比值。SMI 基于日尺度计算, 从 0~1 指示来反演作物受水胁迫的程度, 本质上仍以降水为主要变量。Hunt 等^[40]基于实际土壤含水量、田间持水量及萎蔫点开发了土壤水分指数 (SMI)。SMI 可以有效的分析作物生长季干旱, 描述干旱的起止时间和土壤水分盈亏。Champagne^[41]等利用被动微波遥感开发了表层土壤水分异常指数 SMA, 对空间尺度土壤水分遥感反演进行了尝试。

2.4 基于模型算法角度的干旱指数开发

模型可以综合考虑影响干旱的影响因子, 为干旱评估和预测提供丰富的基本参数, 同时, 为理解各种干旱的相互关系奠定了基本条件。Mendicino 等^[42]基于分布式水文模型参数提出了能够多方面反映区域干旱状况的地下水资源指数 GRI。GRI 整合了气象、农业、水文等各方面影响, 基于模型模拟参数来计算和预测干旱的情况。指数计算对参数的精确度和时间序列要求较高, 可以在不同的时间尺度上来区别干旱现象的发生。Rhee 等^[43]结合地表温度 (LST)、NDVI 和降水数据, 开发了尺度干旱条件指数 SDCI, 模拟干旱的结果在干旱和湿润地区均优于 VHI 和 NDVI。Caccamo 等^[44]基于 MODIS 数据开发了 NDIIb6 指数来监测干旱并且与利用 SPI 进行印证对比, 结果显示, NDIIb6 指数与 SPI 高度相关, 可以很好的指示区域干旱。多种尺度的遥感加上降水观测数据, 可以为区域干旱检测提供很好的借鉴, 但模型参数的准确性还有待检验。

3 干旱指数的应用

干旱指数是衡量、比较和综合分析区域旱情的一种简便易行的方法, 应用广泛。国内外学者利用不同干旱指数开展了干旱的反演和预测、作物产量预测、森林火险预警、古气候重建等方面研究。

3.1 区域干旱反演

干旱指数被用来量化和分析地区的干旱事件是干旱研究的一个重要方面, 有利于研究区域的气候、水文等状况。干旱指数本身的时空局限性, 使得指数的适用性局限于不同的研究区域, 区别在于分析方法和指数选择的不同。Szp 等^[45]利用 PDSI 的季节变化和时空变化分析来反应区域土壤水分干旱, 分析了匈牙利西部地区的干旱情况。Logan 等^[46]利用多时间尺度的 SPI, 量化了美国中部区域尺度上的干旱时空特征。近些年, 不同数学分析方法的引入, 丰富了 SPI 在干旱评估中的作用^[47-48]。此外, Elagib 等^[49]利用基于温度和降水数据的 Pedj 干旱指数反演了苏丹长时间尺度干旱的起点和重要的干旱期。国内学者们也利用不同的干旱指数对区域干旱进行了分析研究^[12, 50-52]。

3.2 干旱预测

干旱发展过程缓慢, 在造成严重问题之前, 对干旱的估测试比较困难。如果能在干旱发生的早期阶段对干旱发展有所评估, 就会有充裕的时间来准备应对干旱造成的影响。干旱的预测是干旱风险管理的重要部分, 国内外科技工作者对干旱预测方面进行了探索。

Paulo^[53]等利用马尔科夫链及对数线性模型对葡萄牙南部 SPI 等级转换进行模拟, 并且对干旱发生概率、预期发生时间、特殊干旱的返回期及干旱等级转化进行了预测分析, 证实随机模型可以模拟干旱并提供干旱预警。Yoo^[54]等利用矩形脉冲冲松过程模型 (RPPM) 结合 SPI 数据分析了韩

国干旱的时空特征,量化和分析了干旱严重程度、持续时间、发生频率并对干旱时间序列的返回期进行了预测。Jiang^[55]等基于权重马尔科夫链模型对干旱及干旱作物的面积进行了预测模拟。Kim^[56]等在SPI的基础上在利用经验正交函数EOF及多变量时间序列模型可以对干旱的返回期进行预测,分析了韩国农业干旱的特点。混合模型加上大尺度的干旱指数可以用来对干旱进行预测和评估管理。

3.3 作物产量预测

利用干旱指数来反演作物水分亏缺对产量的影响也成为干旱指数应用的一个重要方面。Quiring等^[57]对比分析了4种干旱指数(PDSI、Palmer Z指数、SPI、NOAA干旱指数)在加拿大西部草原的适用性,并与模型模拟产量和观测产量进行对比分析,发现Palmer Z指数可以很好的指示农业干旱和估测春小麦产量。Bannayan等^[58]利用线性相关的方法分年、季、月尺度分析了伊朗区域尺度的麦和大麦的产量与干旱指数AI(降水/潜在蒸散)的关系,结果显示AI可以很好的预测地区的作物产量。Mkhabela等^[59]利用历史气象数据,分水供给、水需求、水平衡和水利用四个方面的来计算春小麦各个生长阶段的干旱指数,同时利用小区试验获得作物的产量与质量性状,通过相关分析来指示作物不同生长阶段的干旱程度和产量、性状的关系,结果显示水需求和水平衡指数可以很好的估测加拿大春小麦的产量和性状。

干旱指数在预测区域作物产量时具有一定的适用性,但受作物本身性状以及地区气候条件和人为因素的影响,预测结果和适用范围还需要更为细致的研究验证。

3.4 森林火险检测

干旱指数不仅在反演区域的干旱方面得到认可和应用,并且在森林火险检测上也取得了良好的效果。传统的森林火险指数KBDI(Keetdr Byram干旱指数)基于水平衡模型建立,在森林火险监测中得到了广泛的应用和发展。Dolling等^[60]利用KBDI分析了夏威夷地区森林火险,统计分析了KBDI与森林总燃烧面积(TAB)的关系,发现KBDI与TAB高度相关。Ganatsas等^[61]通过对不同森林经验干旱指数(KBDI、NI、MNI、ZI等)在地中海地区火险预测中的适用性作对比,结果证实KBDI指数在此地区具有广泛的适用性;同时根据地中海地区情况对KBDI进行了修正,新指数可以更好的指示森林火险。随着遥感技术的发展,基于不同数据形式的火险监测手段得到了一定发展。Wang等^[62]则计算比较了基于MODIS数据的归一化多波段干旱指数NMDI、NDWI、归一化燃烧比率(NBR)来检测火险。NMDI综合植被和土壤像元的指数值,指数值越低,植被越干旱,可以监测大尺度的火险灾害。通过在美国佐治亚洲南部和希腊南部的实验结果证实,NMDI监测效果很好,并且可在不同地区适用。

3.5 干旱指数在古气候学上的应用

时间尺度的拓展是研究历史气候变化的关键问题。干旱指数可以反映区域水分状况变化,同时揭示气候影响下植物的生长状态。鉴于温度和降水对树木生长特别是年轮记载有着极大的影响,因此,根据已知气候情况下的干旱指数来反推过去的气候,受到了学者们的重视。

Li等^[63-64]利用PDSI对树木年轮生长宽度进行了校正,分别对中国天山地区、中北部贺兰山区干旱气候进行了重建,大体上指示了地区气候变化的动态。Stambaugh等^[65]计算了Palmer水文干旱指数PHDI,并利用PHDI对古气候学上得树木年轮(栎树亚化石)宽度指数进行校准,再现了美国谷物种植地区过去近千年干旱持续时间、频率和循环周期,使年轮气候学现有记录在美国农业地区向前推进了500年。基于生长季温度和降水特征的干旱指数把树轮宽度和气候联系起来,是研究气候历史的重要思路。

4 研究展望

气候变化已是不争的事实,水资源短缺日益加重使干旱问题的研究成为了全球关注的焦点。现有的干旱指数应用提供了很多的有价值的信息,但由于干旱发生的随机性、隐蔽性等特点,给干旱的监测和评估带来了严峻挑战。未来应该从以下几个方面进行更深入的研究。

(1) 干旱指数的适用性。干旱指数在区域干旱反演方面文章较多,但就当前的干旱指数而言,没有统一的技术指标来进行衡量,区分干旱等级时有人主观因素的作用;同一地区可能几类干旱指数都可用,干旱指数在不同地区应用的结果又有可能不同,适用性根据区域差异显著不同。干旱指数的开发应综合考虑指数的普适性、实用型、易理解性、理论性、时效性和无量纲性^[66]。

(2) 干旱综合评估的研究。农业干旱不是出现在降水减少时,而是出现在植物根系不能获取到所需水分时,因此指数的标定应该更多地关注干旱的发生时间和持续时间而不只是干旱强度。另外,在灌溉农业发达的地区,农业依靠地表水或抽取地下水灌溉弥补了气象上干旱对农业的影响,但却引起了水文干旱。由于干旱随机、隐蔽等特点和其对各部门的广泛影响,使干旱监测和影响评估还不能达到定量化和客观化,因此,需要把定量化和综合评估作为主要发展方向,注重各种干旱之间的联系。

(3) 干旱预测研究。关注于分析影响干旱的降水、气温、蒸散等因素的变化趋势,借助模型、数学工具来分析干旱的概率、返回期、影响范围等,难以反映干旱的机理。因此,建立气象预报、水文模型、植被需水模型相结合的联合干旱预测模型,提高检测精度,将是开展干旱预测研究很有生命力的发展方向。

(4) 遥感技术在干旱监测中的应用。遥感可以提供近乎实时的高时空分辨率的数据,遥感干旱监测应向精细化方向发展,提高模拟参数精度。同时,遥感监测和地面观测数据支持的综合指数发展极为必要。随着科学技术的进步,期望会有更多新的手段促进对干旱领域的研究。

参考文献(References):

- [1] Wilhite DA. Global Drought Preparedness Network. Creating a Network of Regional Drought Preparedness Networks [Z]. 2002.
- [2] Mishra AK, Singh VP. A Review of Drought Concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1-2): 202-216.
- [3] Brewer MJ, Heim RR. International Drought Workshop Series

- [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92 (7): E29-E31.
- [4] Heim RR. A Review of Twentieth Century Drought Indices Used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1166.
- [5] Palmer WC, Bureau EU W. Meteorological Drought[M]. US Dept. of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [6] Heddinhaus TR, Sabol P. A Review of the Palmer Drought Severity Index and Where Do We Go from Here[C]. 1991: 242-246.
- [7] Council A. Policy Statement: Meteorological Drought[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78: 847-849.
- [8] McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[A]. American Meteorological Society Boston[C]. MA, 1993.
- [9] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, (4): 523-529. (YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Comparison Between Standardized Precipitation Index and Z index in China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, (4): 523-529. (in Chinese))
- [10] Mishra V, Cherkauer KA. Retrospective Droughts in the Crop Growing Season: Implications to Corn and Soybean Yield in the Midwestern United States[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7-8): 1036-1045.
- [11] Alley WM. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(7): 1100-1109.
- [12] 卫捷, 马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报, 2003, (S1): 117-124. (WEI Jie, MA Zhuguo. Comparison of Palmer Drought Severity Index, Percentage of Precipitation Anomaly and Surface Humid Index[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, (Supp. 1): 117-124. (in Chinese))
- [13] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, (4): 21-27. (LIU Gengshan, GUO An hong, AN Shunqing, et al. Research Progress in Palmer Drought Severity Index and its Application[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, (4): 21-27. (in Chinese))
- [14] 张强, 高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. 科技导报, 2004, (7): 21-24. (ZHANG Qiang, GAO Ge. The Spatial and Temporal Features of Drought and Flood Disasters in the Past 50 Years and Monitoring and Warning Services in China[J]. Science & Technology Review, 2004, (7): 21-24. (in Chinese))
- [15] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, (4): 371-378. (ZOU Xukai, REN Guoyu, ZHANG Qiang. Droughts Variations in China Based on a Compound Index of Meteorological Drought[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, (4): 371-378. (in Chinese))
- [16] 李树岩, 刘荣花, 师丽魁, 等. 基于 CI 指数的河南省近 40 年干旱特征分析[J]. 干旱气象, 2009, (2): 97-102. (LI Shuyan, LIU Ronghua, SHI Likui, et al. Analysis on Drought Characteristic of Henan in Recent 40 Years Based on Meteorological Drought Composite Index[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, (2): 97-102. (in Chinese))
- [17] Palmer WC. Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index[M]. 1968.
- [18] Shafer B, Dezman L. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas[A]. Proceedings of the Western Snow Conference[C]. 1982: 164-175.
- [19] 闫娜, 杜继稳, 李登科, 等. 干旱遥感监测方法研究应用进展[J]. 灾害学, 2008, (4): 117-121. (YAN Na, DU Jiwen, LI Dengke, et al. Progress in Research and Application of Drought Monitoring Method by Remote Sensing[J]. Journal of Catastrophology, 2008, (4): 117-121. (in Chinese))
- [20] 杨绍镔, 闫娜娜, 吴炳方. 农业干旱遥感监测研究进展[J]. 遥感信息, 2010, (1): 103-109. (YANG Shaobin, YAN Nanna, WU Bingfang. Advances in Agricultural Drought Monitoring by Remote Sensing[J]. Remote Sensing Information, 2010, (1): 103-109. (in Chinese))
- [21] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, (14): 147-154. (SUN Hao, CHEN Yunhao, SUN Hongquan. Comparisons and Classification System of Typical Remote Sensing Indexes for Agricultural Drought[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 147-154. (in Chinese))
- [22] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究[J]. 地理科学进展, 2007, (1): 26-32. (LI Hongjun, ZHENG Li, LEI Yuping, et al. Comparison of NDVI and EVI Based on EOS/MODIS Data[J]. Progress in Geography, 2007, (1): 26-32. (in Chinese))
- [23] 王正兴, 刘闯, Alfredo H. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, (5): 979-987. (WANG Zhengxing, LIU Chuang, Alfredo H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in Vegetation Index Research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, (5): 979-987. (in Chinese))
- [24] Kogan F. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Nonhomogeneous Areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405-1419.
- [25] Kogan F, Sullivan J. Development of Global Drought Watch System Using NOAA/AVHRR Data[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(5): 219-222.
- [26] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的全国干旱遥感监测试验研究(Ⅰ)—资料分析与处理部分[J]. 干旱区地理, 2004, (2): 131-136. (FENG Qiang, TIAN Guoliang, WANG Angsheng. Experimental Study on Drought Monitoring by Remote Sensing in China by Using Vegetation Condition Indexes (VCI) Data Analysis and Processing[J]. Arid Land Geography, 2004, (2): 131-136. (in Chinese))
- [27] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 213-224.
- [28] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, (5): 412-418. (WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen. Vegetation

- tion Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, (5): 412-418. (in Chinese)
- [29] Kogan FN. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100.
- [30] Gao B c. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [31] 孙丽, 王飞, 吴全. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J]. *农业工程学报*, 2010, (1): 243-249. (SUN Li, WANG Fei, WU Quan. Drought Monitoring by Remote Sensing in Winter wheat-growing Area of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 243-249. (in Chinese))
- [32] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. *遥感信息*, 2012, (5): 48-54. (ZHANG Jie, WU Jianjun, ZHOU Lei, et al. Comparative Study on Remotely Sensed Methods of Monitoring Agricultural Drought Based on MODIS Data[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, (5): 48-54. (in Chinese))
- [33] Tsakiris G, Vangelis H. Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration [J]. *European Water*, 2005, 9(10): 3-11.
- [34] Yao Y, Liang S, Qin Q, et al. Monitoring Drought Over the Conterminous United States Using MODIS and NCEP Reanalysis 2 Data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(8): 1665-1680.
- [35] Yao Y, Liang S, Qin Q, et al. Monitoring Global Land Surface Drought Based on a Hybrid Evapotranspiration Model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(3): 447-457.
- [36] Shukla S, Wood AW. Use of a Standardized Runoff Index for Characterizing Hydrologic Drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02405.
- [37] Wang J, Feng J, Yang L, et al. Runoff denoted Drought Index and its Relationship to the Yields of Spring Wheat in the Arid Area of Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4): 666-676.
- [38] 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(1-4): 69-88.
- [39] Vijendra K B. Improving a Drought Early Warning Model for an Arid Region Using a Soil moisture Index[J]. *Applied Geography*, 2009, 29(3): 402-408.
- [40] Hunt ED, Hubbard KG, Wilhite DA, et al. The Development and Evaluation of a Soil Moisture Index[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(5): 747-759.
- [41] Champagne C, McNairn H, Berg AA. Monitoring Agricultural Soil Moisture Extremes in Canada Using Passive Microwave Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2434-2444.
- [42] Mendicino G, Senatore A, Versace P. A Groundwater Resource Index (GRI) for Drought Monitoring and Forecasting in a Mediterranean Climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3-4): 282-302.
- [43] Rhee J, Im J, Carbone GJ. Monitoring Agricultural Drought for Arid and Humid Regions Using Multi-sensor Remote Sensing Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2875-2887.
- [44] Caccamo G, Chisholm LA, Bradstock RA, et al. Assessing the Sensitivity of MODIS to Monitor Drought in High Biomass Ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2626-2639.
- [45] Szp IJ, Mika J, Dunkel Z. Palmer Drought Severity Index as Soil Moisture Indicator: Physical Interpretation, Statistical Behaviour and Relation to Global Climate[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(1-3): 231-243.
- [46] Logan KE, Brunsell NA, Jones AR, et al. Assessing Spatiotemporal Variability of Drought in the U. S. Central Plains[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 247-255.
- [47] Moreira EE, Paulo AA, Pereira LS, et al. Analysis of SPI Drought Class Transitions Using Loglinear Models[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1-2): 349-359.
- [48] Karavitis CA, Alexandris S, Tsemelis DE, et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece[J]. *Water*, 2011, 3(3): 787-805.
- [49] Elagib NA, Elhag MM. Major Climate Indicators of Ongoing Drought in Sudan[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(3-4): 612-625.
- [50] 王越, 江志红, 张强, 等. 用 Palmer 湿润指数作西北地区东部冬小麦旱涝评估[J]. *应用气象学报*, 2008, (3): 342-349. (WANG Yue, JIANG Zhihong, ZHANG Qiang, et al. Evaluating Aridity and Wetness of the Wheat with Palmer Moisture Anomaly Index in the East of Northwest China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2008, (3): 342-349. (in Chinese))
- [51] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年(1965-2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. *中国农业气象*, 2010, (1): 137-143, 150. (CHE Shaoping, LI Chunqiang, SHEN Shuanghe. Analysis of Drought-flood Spatiotemporal Characteristics Based on Standard Precipitation Index(SPI) in Hebei Province During 1965-2005[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, (1): 137-143, 150. (in Chinese))
- [52] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J]. *地理学报*, 2011, (5): 599-608. (BAO Yunxuan, MENG Cuili, SHEN Shuanghe, et al. Temporal and Spatial Patterns of Droughts for Recent 50 Years in Jiangsu Based on Meteorological Drought Composite Index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, (5): 599-608. (in Chinese))
- [53] Paulo AA, Ferreira E, Coelho C, et al. Drought Class Transition Analysis Through Markov and Loglinear Models, An Approach to Early Warning[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 77(1-3): 59-81.
- [54] Yoo C, Kim D, Kim T-W, et al. Quantification of Drought using a Rectangular Pulses Poisson Process Model[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1-4): 34-48.
- [55] Jiang X-c, Chen S-f. Application of Weighted Markov SCGM (1, 1) c Model to Predict Drought Crop Area[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2006, 26(5): 135-139.

- chuan University(Engineering Science), 2004, (4): 10-14. (in Chinese))
- [9] 赵春菊, 周宜红. 龙开口碾压混凝土重力坝施工过程仿真研究[J]. 湖北水力发电, 2008, (S1): 14-20. (ZHAO Chunju, ZHOU Yirong. Simulation Research on Construction Course of Longkaikou Roller Compacted Concrete Gravity Dam[J]. Hubei Water Power, 2008, (Supp. 1): 14-20. (in Chinese))
- [10] 丁世来, 胡志根, 刘全. 大坝混凝土浇筑块排序方法的评价研究[J]. 红水河, 2004, (2): 97-100, 109. (DING Shilai, HU Zhigen, LIU Quan. Study on the Assessment of Sequencing Concrete Grouting Blocks on Dam[J]. Red River, 2004, (2): 97-100, 109. (in Chinese))
- [11] 吴庆鸣, 陈东. 混凝土大坝浇筑安排计算机仿真求解[J]. 人民长江, 2000, (5): 41-43. (WU Qingming, CHEN Dong. Computer Simulation to Solve the Problem about the Concrete Dam Pouring Arrangement[J]. People Yangtze River, 2000, (5): 41-43. (in Chinese))
- [12] 肖文, 吴庆鸣, 巫世晶. 碾压混凝土坝施工分仓跳仓方法研究[J]. 红水河, 2000, (1): 31-34. (XIAO Wen, WU Qingming, WU Shijing. Study on Concreting Sequence Methods about RCC Gravity Dam Construction[J]. Red River, 2000, (1): 31-34. (in Chinese))
- [13] 刘全. 施工导流风险分析与施工过程仿真的可视化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003. (LIU Quan. Construction Diversion Risk Analysis and Visual Analysis of Construction Process Simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese))
- [14] 钟登华, 吴康新, 练继亮, 等. 基于模糊规则的大坝混凝土施工跳仓排序研究[J]. 系统仿真学报, 2008, (5): 1099-1102, 1166. (ZHONG Denghua, WU Kangxin, LIAN Jiliang, et al. Research on Concreting Sequencing for Dam Construction Based on Fuzzy Rule[J]. Journal of System Simulation, 2008, (5): 1099-1102, 1166. (in Chinese))
- [15] 郭佳乐, 杜志达. 混凝土坝施工过程仿真研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, (6): 116-118, 162. (GUO Jiayue, DU Zhida. Simulation Study on Construction Process of Concrete Dam [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, (6): 116-118, 162 (in Chinese))

(上接第 133 页)

- [56] Kim DH, Yoo C, Kim T-W. Application of Spatial EOF and Multivariate Time Series Model for Evaluating Agricultural Drought Vulnerability in Korea[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(3): 340-350.
- [57] Quiring SM, Papakryiakou TN. An Evaluation of Agricultural Drought Indices for the Canadian Prairies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118(1-2): 49-62.
- [58] Bannayan M, Sanjani S, Alizadeh A, et al. A Association between Climate Indices, Aridity Index, and Rainfed Crop Yield in Northeast of Iran[J]. Field Crops Research, 2010, 118(2): 105-114.
- [59] Mkhabela M, Bullock P, Gervais M, et al. Assessing Indicators of Agricultural Drought Impacts on Spring Wheat Yield and Quality on the Canadian Prairies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(3): 399-410.
- [60] Dolling K, Chu P-S, Fujioka F. A Climatological Study of the Keetch/Byram Drought Index and Fire Activity in the Hawaiian Islands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1-4): 17-27.
- [61] Ganatsas P, Antonis M, Marianthi T. Development of an Adapted Empirical Drought Index to the Mediterranean Conditions for Use in Forestry[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(2): 241-250.
- [62] Wang L, Qu JJ, Hao X. Forest Fire Detection Using the Normalized Multiband Drought Index (NMDI) with Satellite Measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1767-1776.
- [63] Li J, Gou X, Cook ER, et al. Tree-ring Based Drought Reconstruction for the Central Tien Shan Area in Northwest China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07715.
- [64] Li J, Chen F, Cook ER, et al. Drought Reconstruction for North Central China from Tree Rings: The Value of the Palmer Drought Severity Index[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(7): 903-909.
- [65] Stambaugh MC, Guyette RP, McMurphy ER, et al. Drought Duration and Frequency in the U. S. Corn Belt During the Last Millennium (AD 992-2004)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(2): 154-162.
- [66] Keyantash J, Dracup JA. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83: 1167-1180.