

信息同化融合技术

在旱情评估预警中的应用

顾颖 戚建国 李国文 倪深海 金君良 等 编著



黄河水利出版社

信息同化融合技术 在旱情评估预警中的应用

顾 颖 戚建国 李国文 倪深海 金君良 等 编著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

我国干旱的易发性、持续性、广泛性和危害性的特点,决定了抗旱工作的复杂性和艰巨性。缓解旱情、减少干旱造成的损失是我国当前乃至今后很长一段时间必须面对的艰巨任务。本书通过开发旱情多源信息同化融合技术,提出了利用多种信源进行旱情监视评估的方法,并通过分析和判断旱情发生发展过程,提出了干旱预警判别模式,通过建立旱情预测预警机制,实现了对旱情进行全面监控。研究的技术和方法在示范区进行了实例应用研究,取得了较好成果。本书所提供的技术和方法可为旱情的监测评估、预测预警提供有效的技术途径,对我国实行主动防御干旱、减轻干旱灾害带来的经济损失、提高社会应对严重干旱、防御干旱的能力、保障粮食生产安全等方面有着广泛的实用价值。

本书适合从事旱情监测评估、预测预警系统建设和干旱研究的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

信息同化融合技术在旱情评估预警中的应用/顾颖等编
著. —郑州:黄河水利出版社,2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1015 - 7

I. ①信… II. ①顾… III. ①信息融合 - 应用 - 旱
情 - 评估 - 研究 - 中国②信息融合 - 应用 - 旱情 - 预警系统
- 研究 - 中国 IV. ①S423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 021954 号

组稿编辑:王志宽 电话:0371 - 66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17.75

字数:410 千字

印数:1—1 000

版次:2015 年 1 月第 1 版

印次:2015 年 1 月第 1 次印刷

定价:120.00 元

本书由水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院出版基金资助和水利部公益性行业科研专项经费项目(项目编号:201001042)经费资助

《信息同化融合技术在旱情评估预警中的应用》 主要编著人员及分工

第1章	顾颖	戚建国	李国文	赵凯	倪深海
第2章	顾颖	刘静楠	张东		
第3章	金君良	常胜	顾颖		
第4章	倪深海	常胜	闫娜娜		
第5章	徐金涛	顾颖	刘静楠	张东	
第6章	顾颖	刘艳丽			
第7章	倪深海	金君良			
第8章	顾颖	倪深海	张东		
第9章	戚建国	戴星	王琳	郑文	谢自银 牛帅
第10章	顾颖	李国文	刘静楠	冻芳芳	申瑜 徐金涛

前言

干旱灾害是我国最主要的自然灾害之一,给城乡居民生活和工农业生产造成不同程度的影响,严重制约我国经济社会的可持续发展。20世纪90年代以来,干旱灾害表现出频次增高、范围扩大、持续时间延长和灾害损失加重等特点。据统计,1949~1979年的31年间,我国有8年发生了特大干旱,发生频次为25.8%。而1980~2013年的34年间,全国共有17年发生重大干旱,发生频次增高到50%。干旱发生的范围也在不断地扩大,过去旱灾高发区域主要是在干旱的北方地区,近年来,我国南方和东部湿润半湿润地区的旱情也在扩展和加重,目前旱灾发生的范围已经遍及全国。同时,旱灾影响范围已由农业为主扩展到工业、城市、生态等领域,工农业争水、城乡争水和国民经济挤占生态用水现象越来越严重。许多地区还经常出现春夏连旱或夏秋连旱,有时是春夏秋三季连旱,严重的甚至出现全年干旱乃至连年干旱的趋势,造成重大的损失和影响。明确我国抗旱工作的重点和方向,加强实时旱情监测预测预警研究,提高我国综合抗旱减灾能力,预防和减少我国干旱灾害损失,已成为当前十分迫切的重要工作。

开展旱情实时监测预测预警研究,为政府部门正确判断旱情发生地点、范围、强度、时间提供准确信息,为抗旱指挥部门决策提供科学依据,是抗旱减灾工作中非常重要且不可或缺的。充分利用现代科技手段和通信技术,基于现代观测手段进行大气—地表—地下的立体旱情信息监测,对与旱情密切相关的雨情、水情、墒情、工情数据进行动态分析,可定量描述旱情的动态变化过程,快速、准确地捕捉旱情分布及其演变趋势,准确分析受旱程度和旱情发展,科学评估旱情严重程度,根据不同的旱情等级发布相应的旱情预警并提供实时背景资料,为决策部门及时、准确地提供旱情及早灾信息,为防旱抗旱、减灾决策提供科学支撑。

本书通过开发旱情多源信息同化融合技术,监视、分析和判断旱情发生发展过程,建立旱情预测和预警机制,对两个示范区的旱情进行监控和评估,在以下四个方面取得创新性突破:

(1)开发了旱情多源信息同化融合技术。充分利用气象、水文、农情和遥感等多个信息源的信息,建立旱情评价指标体系,根据信息特征和属性进行数据同化及信息融合处理,达到对旱情的全面综合分析目的,克服了只用单项指标评估旱情的片面性,实现了利用多源信息对综合旱情全方位的监控和评估,提高了综合旱情评估的合理性和准确性,是国内首次将信息同化融合理论应用于综合旱情的评估。

(2)构建了区域土壤墒情综合监测体系。应用数据同化技术,根据实测数据和遥感资料对水文数值模型拟合结果相融合,更新系统状态与参数,进行水文模型参数的优化控制和调整,从而提高分布式水文模型对墒情的模拟精度,实现了土壤墒情点—面关系的转化,由此建立的区域土壤墒情综合监测体系,充分利用了土壤墒情的多源信息,解决了以墒情实测点信息替代面信息误差较大的问题,达到了对区域土壤墒情的多方位监控和

模拟。

(3)构建了基于信息融合的综合旱情评估模型系统。利用气象、水文、农情的多源信息,根据信息的物理属性及其时空特征,对信息进行分级处理和融合,建立了由综合旱情评估指标体系、分布式水文模型、农作物生长模拟模型、旱情指标分析模型、旱情评估模型等组成的综合旱情评估模型系统,实现了对区域旱情的综合评估,克服了只用单项指标评估旱情的片面性,达到了对旱情综合评估的目的。

(4)建立了基于信息挖掘的旱情预警分析模式。该模式通过建立旱情预警指标体系,对当前旱情、抗旱水量、未来旱情以及旱灾潜在损失等信息进行逐层递进深入、分层叠加组合的分析,全面考虑相关预警影响因素,提高了对区域旱情预警信息发布的合理性和针对性,改变了以往只凭当前旱情严重程度来决定预警信号可能存在的偏差,为区域旱情预警信号分析提供了新的思路。所开发的示范区旱情评估预测预警业务应用系统,可为防旱减灾决策提供技术支撑。

本书参加编著人员还有江西省有关部门的谭国良、刘登平、朱建平、周志刚、殷勇,山西省有关部门的卫中平、杨平、杨军生、梁存峰、邢晓东。

本书得到了国家防汛抗旱总指挥部办公室、水利部水文局领导和同行专家的指导,在示范基地考察调研、资料收集和研究过程中,得到了江西省水文局、山西省水文水资源勘测局以及各有关单位的大力协助和帮助,在此一并表示感谢!

编著者

2014年10月

目 录

前 言

第1章 概 述	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 研究目标和研究内容	(11)
1.4 研究示范区简介	(14)
第2章 旱情多源信息同化融合技术	(24)
2.1 多源信息同化融合的概念	(24)
2.2 旱情评估中的多源信息同化融合	(25)
2.3 旱情信息同化融合方法及系统	(28)
2.4 小 结	(39)
第3章 基于信息同化的土壤墒情监测体系	(41)
3.1 土壤墒情监测体系	(41)
3.2 应用模型进行土壤墒情监测	(45)
3.3 利用遥感信息进行土壤墒情监测	(65)
3.4 多源墒情信息相关性分析	(70)
3.5 小 结	(78)
第4章 基于仿真与遥感的农业旱情判别	(80)
4.1 农作物受旱缺水模拟	(80)
4.2 农业旱情的判别	(89)
4.3 应用遥感技术识别农作物受旱	(91)
4.4 农业旱情比对分析	(96)
4.5 小 结	(111)
第5章 基于游程理论的水文干旱识别	(112)
5.1 水文干旱特征及识别指标	(112)
5.2 水文干旱识别方法	(115)
5.3 江西示范区水文干旱识别	(118)
5.4 山西示范区水文干旱识别	(125)
5.5 小 结	(134)
第6章 基于信息融合的旱情综合评估	(135)
6.1 旱情评估指标体系	(135)
6.2 综合旱情评估模型	(143)
6.3 综合旱情评估模型检验	(146)

6.4 小 结	(151)
第7章 基于模拟和概率统计的旱情预测	(153)
7.1 水文过程预测	(153)
7.2 工程供水量预测	(158)
7.3 农作物受旱预测	(166)
7.4 农作物因旱减产模拟	(173)
7.5 小 结	(174)
第8章 基于信息挖掘的旱情预警技术	(175)
8.1 旱情预警概述	(175)
8.2 旱情预警指标等级	(177)
8.3 旱情预警等级及信号分析	(178)
8.4 旱情预警的响应	(185)
8.5 小 结	(188)
第9章 旱情评估与预测预警系统	(189)
9.1 系统概述	(189)
9.2 系统结构及流程	(190)
9.3 旱情专用数据库	(194)
9.4 系统数据的处理	(196)
9.5 旱情信息查询与展示平台	(199)
9.6 小 结	(214)
第10章 示范区实例应用	(215)
10.1 山西示范区综合旱情评估	(215)
10.2 江西示范区综合旱情评估	(238)
10.3 小 结	(266)
参考文献	(267)

第1章 概述

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

干旱灾害是我国最主要的自然灾害之一,每年都给城乡居民生活和工农业生产造成不同程度的影响,严重制约我国社会经济的正常运行。特别是20世纪90年代以来,干旱灾害表现出频次增高、范围扩大、持续时间延长和灾害损失加重等特点。据统计,我国在1949~1979年的31年间,有8年发生了特大干旱,发生频次为25.8%;而1980~2013年34年间,全国共有17年发生重大干旱,发生频次提高到50%。干旱发生的范围也在不断扩大,过去旱灾高发区域主要是干旱的北方地区,近些年来,我国南方和东部湿润半湿润地区的旱情也在扩展和加重,目前旱灾发生的范围已经遍及全国。同时,旱灾影响范围已由农业为主扩展到工业、城市、生态等领域,工农业争水、城乡争水和国民经济挤占生态用水现象越来越严重。许多地区还经常出现春夏连旱或夏秋连旱,有时是春夏秋三季连旱,严重的甚至出现全年干旱乃至连年干旱的趋势,造成重大的损失和影响。如我国2000年和2001年连续两年发生全国性特大干旱,2003年南方地区发生严重夏伏旱,2006年四川、重庆发生百年一遇特大干旱,2009年夏末至2010年春的西南地区五省区发生特大干旱。统计分析,自20世纪90年代以来,因干旱造成的粮食减产占各种自然灾害造成粮食减产总量的60%以上;平均每年因干旱造成工业产值减少2300多亿元;年均有2880万人、2275万头牲畜因旱发生临时性饮水困难。干旱灾害对我国国民经济造成的损失,一般干旱年约占GDP的1.1%,遇严重干旱年占GDP的2.5%~3.5%。2008年入冬到2009年春的气象干旱波及我国15个省、市,全国耕地受旱面积2.99亿亩^①,比常年同期多1.10亿亩,其中作物受旱面积1.53亿亩,重旱4996万亩,干枯394万亩,有442万人、222万头大牲畜因旱发生饮水困难。

随着我国经济社会的快速发展、城市化进程加快和社会主义新农村建设,人口的增长和人民生活水平的不断提高,全球气候变化导致极端气候事件发生概率增加,特大和严重干旱发生越加频繁,因此未来旱灾造成的影响和损失将更加严重,经济损失绝对值及风险程度将呈明显增大的趋势,严重影响社会公共安全、国民经济发展和人民的生存环境。

我国干旱的易发性、持续性、广泛性和危害性的特点,决定了抗旱工作的复杂性和艰巨性。缓解旱情、减少干旱造成的损失是我国当前乃至今后很长一段时间必须面对的艰巨任务。

① 1亩=1/15 hm²。

1.1.2 研究意义

对抗旱减灾关键技术进行广泛而深入研究,尤其是开展对旱情实时监测、评估与预测工作,为政府部门正确判断旱情发生地点、范围、强度、时间提供准确信息,为抗旱部门制定抗旱决策及时提供科学依据,这是抗旱减灾工作中非常重要和不可缺少的内容。充分利用现代科技和通信技术,基于现代观测手段进行地—地表—大气的立体旱情信息监测,对与旱情密切相关的墒情、雨情、水情、工情数据进行动态监测,可定量描述旱情的动态变化过程;快速、准确地捕捉旱情分布及其演变信息,为准确分析受旱程度和旱情发展趋势、科学地评估旱情的严重程度、根据不同的旱情等级发布相应的旱情预警提供实时背景资料,为决策部门及时、准确地提供旱情及旱灾信息,为防旱抗旱、减灾决策提供科学支撑。

因此,明确我国抗旱工作的重点和方向,提高我国综合抗旱减灾能力,预防和减少我国干旱灾害损失,已成为当前一项十分迫切的重要工作。本书通过开发土壤墒情等多源信息综合分析技术,监视、分析和判断旱情发生、发展过程,建立旱情预测和预警模型,对旱情进行全面监控,并通过示范区试点达到向全国推广的目的,可为及时主动防御干旱灾害提供技术支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 旱情监测与评估

1.2.1.1 旱情监测

干旱是一种缓变的自然现象。干旱的实时监测,是指通过实时观测到的降水、蒸发、土壤含水量、河道径流量等水文气象要素,计算相关的干旱指标,通过对干旱指标的分析,评估当前干旱等级。干旱的严重程度是逐渐积累的结果,这为干旱的监测和早期预警带来了可能。

目前,许多国家的不同部门已经针对各国国情和不同行业需求,开始实现干旱实时监测的业务化。国外现已形成地面、航空、航天、多星的立体干旱监测格局。20世纪末,为了加强和集中干旱监测活动,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、农业部(USDA)和国家干旱减灾中心(NDMC)联合研发了一个周干旱监测产品(DM)(SvobodaMark,2002),它提供了一个综合客观的国家干旱指数,旨在提供全美国干旱现状的总体评估。DM是依据对几个关键指数和来自不同部门的辅助指标的分析,研制出最终的分析图。采用的干旱指标包括PDI、CMI(Crop Moisture Index)、土壤水分模式百分位数、日流量百分位数、正常降水百分比、顶层土壤水分(USDA提供)和基于卫星的植被健康指数(VHI)。我国国家气象局气候中心研制的旱涝监测系统,是利用降水量、气温等常规观测要素,依托气象指标计算,实现对全国干旱范围和程度的实时监测和影响评估,发布的产品包括旱涝监测公报、综合气象干旱指数、降水距平百分率图和土壤相对湿度图(20 mm土壤墒情图)等。我国水利部开发了天眼防汛抗旱水文气象综合业务应用系统,发布的产品包括帕尔默指

数图、降水距平指数图、降水百分位数指数图,以逐日定时计算的方式自动获得全国旱情分布图,但目前还仅限于对气象要素的实时动态监视。

旱情监测各种主要参数有:①大气参数:降水量、湿度、气温、风向、风速、积雪及云量等;②农业相关参数:土壤温度、蒸散量、不同深度土壤含水量、作物种类与长势、不同作物种植面积与空间分布等;③水文有关参数:水系分布、径流量、地下水位、江河湖水位、水库蓄水量等;④社会经济参数:灾情资料(如受灾面积、生命财产损失和直接经济损失等)、经济指标(如耕地面积、种植结构、作物产量等)、人口等;⑤遥感参数:地表温度、植被覆盖状况、作物长势、土壤水分状况、农田蒸散、水系分布、各种植被指数等。

当前国内传统旱情监测方法为台站网络监测。它的主要任务是对上述提及的与干旱相关的参数进行监测。观测的台站包括气象站、农业生态站、水文站等,即利用现有的观测台站网进行观测,然后针对不同类型的干旱经统计分析,确定出适合本地区或全国的干旱指标,以确定干旱发生的起止时间、范围及严重程度等。这方面的工作开展的比较多,例如气象局、农气科学研究的科学家利用全国各台站观测到的土壤湿度数据来分析全国旱情的分布。

干旱的发生具有分布范围广、过程缓变以及周期相对较长的特点。对于旱情的实时监测和评价只依靠以人工为主的传统方法显然力不从心,难以满足抗旱工作的需要。目前,随着遥感和地理信息系统技术的发展,遥感具有观测范围广、获取信息量大、速度快、实时性好、动态性强等优点,最适合于灾害的实时监测与预报,而 GIS 提供的空间定位以及定性、定量分析的功能,与遥感技术相结合可实现动态监测、模拟、分析,为防灾减灾辅助决策提供有效的工具。

1.2.1.2 旱情评估

旱情评估是对已经发生的干旱情势进行分析,根据干旱指标等对旱情严重程度进行评价。旱情评估分为历史旱情评估和实时旱情评估。前者主要关注于对干旱的形成条件、原因和灾害的区域性、多发性等特点以及时空演变规律等,通过对历史干旱的评估分析,可以宏观透视旱灾的变化趋势和地域差异,了解干旱发生的起因,掌握我国历史旱情的发生、发展过程以及旱情的时空分布规律,是进行干旱实时评估和预测的基础。干旱实时监测和评估对开展抗旱减灾工作则有着直接的指导作用,但不同的干旱指标往往得出不同的干旱监测产品,反映的干旱区域、干旱等级及灾害严重程度不尽相同,如何正确判断和评估旱情,干旱指标的选用十分关键。

目前,根据研究基础的不同,我国对旱情的评估大致可分为两种不同的研究方法。一是基于我国旱灾的历史统计基础资料,如历史重大旱灾年表的建立、全国灾情系列图的编制。潘耀忠等基于中国省级报刊自然灾害数据库、省级报刊信息源等数据源,借助 GIS 技术和数字地图技术,重建我国不同时期的旱灾时空格局,对干旱及灾害的特点及时空分布进行了讨论。二是根据干旱指标评估结果,恢复不同时段旱灾的时空格局。王劲峰等分别利用干旱频率、降水距平百分率等干旱指数(王劲峰,1995;陈菊英,1991;李克让,1996),建立了中国干旱的时空格局,分析了我国不同地区的旱情发展趋势。历史干旱的评估,不仅可以透视宏观旱灾的变化趋势和地域差异,也是进行干旱实时监测和预测的基础,通过历史统计数据与干旱指数的长期比较分析,互为验证,可以建立更加准确的、基于

干旱指数的干旱研究模型。提高数据共享度,以及比较分析不同源数据的可信度是进行历史干旱评估的前期必要工作。

旱情评价指标是表示干旱程度的特征量,是旱情评估的基础。它是旱情描述的数值表达,在干旱分析中起着度量、对比和综合等重要作用。D. G. Friedman 指出干旱指数应符合 4 个基本标准:①时间尺度应与所考虑问题匹配;②指数应是大尺度长期持续干旱的定量度量;③指数应对所研究的问题有使用价值;④指数应具有或能计算出长期精确的历史记录。干旱指数应能反映干旱的成因、程度、开始、结束和持续时间。不同地点、季节的干旱指标应具有可比性,识别它的过程中所需资料易于获得。根据干旱信息来源,将旱情评价指标分为气象干旱指标、农业干旱指标、水文干旱指标、遥感干旱指标几类。

在气象干旱方面,刘昌明等采用降水距平指标识别和分析了海河流域的水旱灾害情况。徐尔灏在假定年降水量服从正态分布的基础上,提出用降水量的标准差来划分旱涝等级。H. N. Bhalme 和 Mooley 于 1980 年提出 BMDI 指标,其采用的是 n 个月的降水量资料,考虑到了降水量的年内分配,因而采用年降水量的指标较合理。 Z 指标是我国使用最为广泛的气象干旱指标之一,它是在假定降水量服从 $P-III$ 型分布的基础上提出的,通过对降水量进行频率分析来确定干旱的程度。SPI 是基于过去 3、6、9、12、24 或 48 个月降水总量而建立的,是近 30 年来被广泛接受的一种气象干旱指数,其最大优点是能够在不同时间尺度上计算,可以提供干旱早期预警。SPI 计算简单,资料容易获取,而且计算结果与 Z 指标有极好的一致性。

农业干旱研究主要针对作物的供需水关系。1965 年,Palmer 将前期降水、水分供给和水分需求结合在水文计算系统中,提出了基于水平衡的干旱指数(PDSI),它是对监测长期干旱状况的一个非常有用的指标,其在干旱事件的分析、干旱序列重建以及干旱的监测中被广泛应用。安顺清等对 PDSI 指数进行了修正,使之更适应我国的实际情况。考虑到农作物在关键生长季节对短期的水分亏缺十分敏感的现实,W. C. Palmer 在 PDSI 的基础上开发了作物水分指数 CMI 作为监测短期农业干旱的指标,CMI 主要是基于区域内每周或旬的平均温度和总降水来计算,能快速反映农作物的土壤水分状况。另外,还有直接以农作物生长期供水量与同期需水量的比例关系,或用农作物根系层实际土壤含水率与作物适宜生长含水率的关系作为干旱指标等。

在水文干旱方面,一般用由于降水的长期短缺而造成某地区某时段内地表水或地下水收支不平衡,出现水分短缺,使江河流量、水库蓄水等减少的现象来表述水文干旱。Linsley 等(1982)把水文干旱定义为:某一给定的水资源管理系统下,河川径流在一定时期内满足不了供水需要。Yevjevich 应用过程统计理论分析干旱事件,指出大陆尺度的水文干旱应该用持续时间、面积范围、强度、再现概率、开始或结束的时间来描述。地表供水指数(SWSI)是 1981 年为克罗拉多州开发的经验水文指数,作为地表水状况的度量,SWSI 弥补了 PDSI 未考虑降雪、水库蓄水、流量以及高地形降水情况的不足,SWSI 对评估和预测地表供水状况的作用已被很多学者认同。

水文系统的多功能、多目标性,使得降水量与地表水、地下水供给之间的关系异常复杂,因而地表水和地下水的短缺相对于降水偏少有明显的滞后。面向河道流量和地下水水位等,一般采用能反映地表径流偏少和地下水水位偏低造成水分短缺情势的水文干旱指

标来描述缺水历时和时段缺水量等水文干旱特征。如利用多年平均径流量、月径流量、水位等小于某阈值作为干旱指标进行研究。目前,国内外常用的水文干旱指标有水文干旱强度、水文干湿指数、作物水分供需指数、地表水供给指数、区域水量最大供需比指数、水资源总量短缺指数、河道径流距平百分率、水库水位距平百分率、palmer 水文干旱指数等。当前,水利部门往往依据河道径流距平值来评估水文干旱。由于现在大多数河流上都建有水库大坝,水文站对于河道流量的观测值已不能体现流域天然状况下的水文响应,因此该指标的适用性问题值得进一步探讨。

此外,水文干旱频率分析问题也备受关注。干旱历时和干旱烈度频率分布的类型筛选是需要解决的关键问题。冯国章将 Sen 推导出的最大正游程长概率密度函数转换为最大负游程长概率密度函数,并作为极限水文干旱历时的概率密度函数。Guvén 推导了一定时期内极限水文干旱历时的概率分布,周振民和袁超等将其应用到对数正态分布的水库来水量和 P-Ⅲ型分布的 Markov 过程的年径流序列的水文干旱分析中。近年来,多变量的干旱频率分析方法,包括条件概率法、非参数方法和 Copula 函数方法等应用较广。区域水文干旱频率的分析研究,主要采用等高线图、网格图干旱特征频率分析以及划分干旱一致区等方法,但总体来说,理论、方法和应用尚不成熟,需深入研究。

在干旱研究方面,基于分布式水文模型和遥感监测等,依靠多源信息对水文干旱发展趋势进行实时评估也成为国内外众多学者研究的重点和热点。采用具有一定物理机制的分布式水文模型,从流域水循环的角度出发,模拟流域水文过程的各个环节,从而得到各种水文要素在流域的时空分布,为流域旱情特征规律研究提供信息。流域分布式水文模拟可以解决实测资料缺失、可信度偏低等问题,使流域旱情信息在时空上得以连续和完善。

在旱情综合评估方面,张波等根据降雨量、流量和蒸发量的资料,确定其各自影响旱情严重程度的权重系数,构造出综合干旱指标,以指标函数值对旱情进行分级,以等级来反映旱情的严重程度。

1.2.2 旱情预测预警

1.2.2.1 旱情预测

频繁发生的干旱灾害已经促使人们去关注如何更加准确地预测干旱的发生、发展、衰亡及消退的动态过程,以尽可能采取有效及时的措施来减轻或缓解所造成的损失。与洪水、风暴以及地震等自然灾害不同,干旱灾害是一个受天气、水文、地理等因素综合影响的结果,也是一个逐步积累的动态过程,这无疑会给干旱预测的研究工作带来很多的麻烦。以目前的预测研究来看,人们对水文干旱和经济干旱的预测研究相对比较少,只建立了少量的预测模型,其研究主要还是集中在与生活、生产关系比较密切的气象干旱和农业干旱,或者是将两者进行耦合而形成的干旱集成预测方法方面。

总的来说,干旱预测可分为数值预测法和统计预测法。数值预测法是指根据气象学的原理建立预报模型,即一系列的偏微分方程,然后根据初始场求得方程的解,再得出预测结果,其本质是以天气的数值预测作为模型基础的。在气象数值预测中,应用最广的预测产品是模式输出统计量(Model Output Statistics, MOS);近年来,为了解决 MOS 预测模

型过于依赖数值模式性能的缺点,开展了大量关于将 Kalman 滤波技术引入 MOS 预测的研究;同时对中长期气象数值预测的研究,也有了长足的进步,相继推出了海气耦合模式、简化的动力模式等。

数值预测法的最大优点是客观化和定量化,但是大气运动异常复杂。在目前计算机容量和速度有限的情况下,需要对预测方程组适当简化,而简化的方程组的预测结果与实际情况往往呈现一些差距,不可能预测得十分精确,而且只能反映大尺度系统的主要活动和演变,对中小尺度系统的活动和一些次要的过程预测不出来。数值预测的时间不能外延太长,延续时间越长,预测的结果与实际出入就越大。随着计算机技术的普及和天气预测技术的提高,数值预测法已经越来越多地被应用在气象干旱的预测中,是目前气象干旱预测中比较成熟的一种手段。相对气象干旱而言,农业干旱有着更为复杂的发生和发展机理,因为不同的作物有不同的需水量,即使同一作物,在不同发育期、不同地区,其需水量也都不一样。总的来说,农业干旱是气象条件、水文环境、土壤基质、水利设施、作物品种及生长状况、农作物布局以及耕作方式等因素的综合作用结果。因此,与气象干旱预测不同,农业干旱的预测必然要涉及与大气、作物以及土壤等相关的因子。最常见的是对土壤含水量变化进行预测,以反映农业干旱变化。

土壤含水量是农业干旱中应用比较成熟的一种指标,由于土壤含水量指标可以利用农田水量平衡关系,方便地建立起土壤—大气—植物三者之间的水分交换关系或土壤水分预测模型,因此在农业干旱预测中也被广泛地采用。目前,以土壤含水量为指标建立的干旱预测模型通常可以分成两种:一是以作物不同生长状态下土壤墒情的实测数据作为判定指标而建立的预测模型;二是利用土壤消退模式来拟定旱情指标,根据农田水量平衡原理,计算出各时段末的土壤含水量,以此来预测农业的干旱程度。范德新于 1998 年在江苏南通市建立的“农业区夏季土壤湿度预测模式”、王振龙于 2000 年在安徽进行的“土壤墒情预测模型”研究等都是基于土壤含水量指标所建立的干旱预测模型。以农田水量平衡原理建立预测模型是土壤含水量预测的另一种方法。在 1982 年,鹿洁忠就开展了关于“农田水分平衡和干旱的计算预测”的研究;李保国于 1991 年又在鹿洁忠等研究的基础上建立了二维空间的“区域土壤水贮量预测模型”;此后,辽宁黄旭晴利用土壤水平衡方法建立了“农业干旱预测模型”;熊见红在长沙市、陈木兵在湘中采用三层蒸散发模型和蓄满产流原理,建立了“土壤含水量干旱预测模型”。以土壤含水量为指标建立的预测模型往往参数计算复杂,具有明显的区域特征。

国内在研究土壤墒情预报方面的成果主要有土壤水动力学模型、水量平衡模型、时间序列分析方法、神经网络方法和数理统计模型等。周良臣等利用多年实测气象资料和土壤水分资料,建立了 BP 人工神经网络模型来研究多个因素对土壤墒情的影响。杨绍辉采用 ARIMA 模型进行土壤水分时间序列的拟合与趋势预测。刘才良结合根系吸水层深度、灌溉条件以及相关气象要素,根据土壤水分运动基本方程,以水绕地为研究对象,来预报土壤剖面中含水量的变化。康绍忠综合考虑了土壤、大气和作物连续系统中的水分传输进程,提出了玉米农田土壤水分动态预报模型。舒素芳等综合考虑农田土壤水分的收支条件,建立了旱地农田土壤水分动态平衡模式,并模拟了旱地农田土壤水分动态平衡模式。姚奎元结合卫星监测的数据、各地区气候特点、土壤类型及不同阶段的地面植被分布

情况,建立了七种不同的土壤含水量预报模式。

农业干旱的发生是一个综合因素影响的结果,采用单指标开展干旱预测,如降水量指标和土壤含水量指标虽然可以在一定程度上大致反映出农业干旱的发生趋势,但却忽视了对作物光合作用、干物质产量以及籽粒产量的动态变化的描述。大量试验证明,这与作物的蒸腾量以及水分亏缺情况有密切的关系。吴厚水、安顺清等最早开展了以蒸发力和相对蒸散量计算作物水分亏缺情况的研究工作,建立了作物缺水指标。此后,康绍忠、熊运章和张正斌等分别采用了“气孔阻力法”“叶温法”及“土壤含水量法”来计算作物的实际耗水量,并将它作为一种综合指标对作物的水分亏缺状况进行监测和预测。余生虎等也在高寒草甸区以作物蒸散能力和土壤干湿程度相结合的综合指标建立了类似的干旱预测方程。由于作物实际耗水量综合反映了土壤、植物本身因素和气象条件的综合影响,因此以此建立的干旱预测模型比其他指标的预测模型更加的宏观实用。

除作物实际耗水量外,作物供需水关系是农业干旱预测中采用的第二个综合性旱情指标,采用该指标进行农业干旱预测的有:朱自玺在1987年建立的“冬小麦水分动态分析和干旱预测模型”,胡彦华和熊运章等于1993年建立的“作物需水量优化预测模型”,以及王密侠和胡彦华在1996年建立的“陕西省作物旱情预测系统”等。该类模型的优点是其涉及的参数全部可以用气象资料、土壤水分资料以及天气预测数据进行计算获得,更为精确实用且代表性强,可以很方便地在不同的区域内推广使用。

统计预测法是用数理统计方法分析预测因子和预测量之间的数量关系,通过建立数学模式来预测未来的干旱程度。目前,使用较多的方法就是以各种干旱指标为基础,应用时间序列分析、多元回归分析、周期分析、谱分析等数理统计方法来建立预测模型,进行干旱预测。在气象干旱预测中,非线性预测方法有很多,其中比较常见的有安顺清(1986)、王良健(1995)以及程桂福(2001)等采用的灰色系统预测方法,李翠华(1990)、周琐铨(1994)、王革丽(2003)运用的时间序列分析方法,李祚泳(1997)、朱晓华(2000)采用的分形理论以及普布卓玛(2002)、张学成(1998)等采用的均生函数预测方法等。

国外在这方面的研究比国内相对更成熟。20世纪80年代末美国就开始用NOAA极轨气象卫星进行干旱监测,在全国建立了干旱监测系统网络。从2000年开始意大利就应用于干旱预测系统来预测其南部水分的空间变化。该系统是以一个嵌入式的地理信息系统和一个与数据接收系统相连接的模型为基础。随着计算机技术的迅速发展和普及,以及人们对干旱预测精确性和实用性提出了更为严格的要求,一种以计算机为硬件支持,结合多种类型、多种指标以及多种数学方法的干旱集成预测方法逐渐成了学者们研究的重点。干旱的集成预测方法以计算机为硬件支持,同时又集合了多种预测方法的优点,与单类型和单指标的预测模型相比,具有更高的精确性和实用性,因此集成预测方法的研究可以促进干旱预测进入大面积的实际应用阶段,代表着未来干旱预测研究的一个发展趋势。

1.2.2.2 干旱预警

干旱灾害预警是干旱风险管理的关键环节。及时准确的预警信息是有效防旱和应急响应的前提。根据联合国减灾战略秘书处的定义,“预警就是通过确定的预案,向处于风险中的人们提供及时准确信息,以便采取有效措施进行规避风险,并做好灾害应急准备”。2005年世界减灾大会通过了《2005~2015年兵库行动纲领》(Hyogo Framework for

Action),明确提到了预警的重要性,鼓励开发应对灾害的早期预警系统,提高减灾能力,降低灾后重建阶段的风险。作为对实施《2005~2015年兵库行动纲领》预警内容的支持,2006年在德国波恩召开的第三届国际预警大会编写了《发展灾害预警系统》会议文件,讨论了自然危害和风险,以及如何通过预警将危害影响减至最小。2011年11月世界气象组织(WMO)和全球水伙伴(GWP)联合发布了干旱综合管理计划(Integrated Drought Management Programme),建议通过开展干旱监测、风险评估和预测预警,促进被动的危机管理转变为主动的风险管理,为全球范围的干旱管理提供科学基础。

由于干旱发生的隐蔽性和发展的长期性,对于旱灾害进行有效的监控显得十分重要。“预警”作为干旱监控的一种有效手段,已在世界一些国家取得了较好的应用效果。所谓干旱预警(Drought Early Warning),是通过对一系列相关的监控指标实现的,因而干旱预警指标体系是干旱强度和灾情程度的综合反映,是进行干旱监测、预测预警、灾害评估和预警应急响应的重要依据。目前,国际上公认的干旱预警指标体系主要包括以下一些监控指标:降水量百分率或降水量距平百分率指标、降水量分位数指标、标准化降雨指数指标、湿润度和干燥度指标、土壤水分平衡为基础导出的干旱指标以及综合气象指标等。从世界各国干旱预警的实际发展来看,预警指标的选择并没有一个确定的体系,主要是从本国的实际出发,有针对性地选择相应指标进行监控。

美国干旱监测预警系统的建设始于20世纪末,至今走过了十多年的发展历程。长期以来,美国对于旱采取了大量的防护措施,特别是从20世纪80年代开始至今的国家干旱预警监测,取得了理想的成效。美国干旱监测等级划分采用了百分位数方法,用于确定干旱级别的所有数据都考虑了它们在该地点、该时间出现的历史频次等。美国干旱预警系统的建设和发展,为美国提高干旱预警的水平、进而全面提升防范和应对干旱灾害的能力起到了积极的作用。

欧盟同样面临着较为严峻的干旱灾害威胁,于近年启动了规模宏大的“欧洲干旱观察”(European Drought Observatory,EDO)项目的建设,以便积极有效地防范干旱灾害的侵袭。“欧洲干旱观察”项目的主要目标就是为欧洲提供一个基于互联网的干旱监测与预测的平台,为欧洲干旱的发生和演进提供及时权威的信息。“欧洲干旱观察”把干旱管理分成四个阶段,不同阶段的管理活动如下:①干旱发生前的正常时期,重点进行干旱监测与预警准备工作;②干旱预警发布后,一系列相应的措施会被商讨和采纳;③干旱期间,各种应急处置方法会用于减灾;④干旱后期,在监测到干旱减缓的数据后停止行动。“欧洲干旱观察”的监测指标包括标准化降雨指数、土壤湿度、降雨量指数和遥感指标等四大类。每类指标下都有更细的指标。

面对干旱灾害的威胁,印度为了有效地对于旱进行监测和预警,印度空间部和农业部早在1989年就联合开发完成了国家农业旱情评估和管理系统,这一系统可以为全国的邦及县的农业干旱提供近似实时的危害程度、持续时间和地域分布的干旱监测与预警信息。印度国家干旱预警系统由干旱预测和干旱监测两部分组成,干旱预测功能由跨部门国家农业气象监测小组(Inter-Ministerial National Crop Weather Watch Group,CWWG)负责,一旦发现降水不足并达到一定的界限并可能产生大范围的干旱危害时,就会立即发布干旱监测预警公告,从而触发干旱应急计划以应对干旱。

干旱灾害的防范和应对是我国抗御自然灾害的一项重大任务,积极推进干旱预警系统的建设和应用已成为当务之急。目前,我国对于干旱预警预报主要侧重于气象干旱层面,缺乏对不同类型干旱相互作用、相互影响后干旱事件进行预警预报。由于干旱演进过程的缓慢性 and 判断发生时间的困难性,准确和及时的干旱预测预警仍然是广大科技工作者面临的严峻挑战,干旱预警预测技术亟待提高。对旱情发展趋势的概率描述和干旱预警预测的不确定性分析成为众多学者面临的难题。随着科技的发展,依靠强大的信息技术,利用历史和实时的气象、水文、墒情等多源信息进行集合预报已成为众多学者研究的热点。集合预报能够描述预报过程的不确定性,并给出预报结果的概率分布状况,描述方法比传统的预报方法更合理。集合预报方法在干旱预警预测技术中的应用,也代表着未来干旱预警预测研究的一个发展趋势。

从国际干旱预警系统的发展实践来看,值得我们借鉴的有:①把干旱预警作为降低干旱损失的有效措施,要扩大预警的传播面和辐射面,充分发挥信息通信技术在干旱预警中的作用,切实提升干旱预警的管理能力和服务水平。②干旱预警作为干旱灾害防御的一项基础性工程,其成效很大程度上取决于它的管理能力和服务水平。③健全的组织体系、完善的管理制度和可靠的服务保障,是发挥干旱预警系统作用的重要条件。④我国在干旱预警的组织体系、管理制度和服务措施的落实等方面还存在着较大差距,需要通过多种方式和手段加以推进,以弥补这方面的不足。

1.2.3 遥感技术应用

传统的干旱监测依赖观测农业气象站的数据来监测干旱的程度和发生干旱地区的分布,常规的土钻取土称重法和中子仪法不仅费时、费力,而且观测点少、代表性差,难以实现大面积土壤水分的实时动态监测。随着遥感技术的发展,遥感卫星的多时相、多光谱、高光谱数据在反映大面积地区的地面信息的实时性方面有了一定程度的飞跃,这些信息定位、定量地反映了土壤水分状况,为实现大面积地区的土壤水分(土壤湿度)实时、动态监测创造了良好的条件。遥感技术的优点是可以提供不同空间、时间、光谱分辨率的地表信息,为获取复杂环境下的孕灾环境、致灾因子提供了丰富的信息,干旱信息的遥感定量反演已经成为了国际前沿研究领域的一个热点。张春桂等利用 MODIS 卫星数据,采用基于 NDVI-LST(陆地表面温度) VTCI 模型,对 2001~2002 年福建省发生的严重秋冬春连续干旱灾害进行了监测验证。郑宁等基于 2001~2006 年 NOAA/AVHRR 遥感影像资料和农业气象观测站的旬土壤墒情资料,同时根据安徽省淮北地区干旱特点,利用距平植被指数与 20 cm 土壤墒情建立了干旱监测模型。热红外遥感方法依据水分平衡与能量平衡的基本原理,通过土壤表面发射率(比辐射率)和地表温度之间的关系估算土壤水分。田国良等利用遥感方法建立试验区土壤表观热惯量与土壤水分的经验统计关系,然后根据冬小麦需水规律和土壤有效水分含量来定义干旱指数模型。

几十年来,旱情遥感监测技术的发展经历了从光学、热红外、微波到联合多波段旱情监测模型反演的研究历程。光学旱情遥感是根据植被指数及其变化过程分析,基于实际发生的旱情资料或土壤墒情观测资料,确定旱情指数的形式。代表性的指数有归一化植被指数 NDVI、距平植被指数 SPI、植被状态指数 VCI、垂直干旱指数 PDI 等。Lozana-Gar-