

# 我国气象干旱研究进展评述

王劲松<sup>1</sup>, 李耀辉<sup>1</sup>, 王润元<sup>1</sup>, 冯建英<sup>1</sup>, 赵艳霞<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:**近几十年来,在全球变化和社会经济高速发展的影响下,全球环境问题尤为突出。其中最为严峻的问题之一是干旱的频繁发生。干旱已经成为全球性的问题,由干旱,尤其是重大干旱灾害所引起的水资源匮乏、粮食危机、生态恶化(如荒漠化等),直接威胁到国家的长期粮食安全和社会稳定。针对这些问题,本文介绍了国家对于干旱研究的需求和近年来在干旱研究领域的主要科技进展,提出了目前干旱研究领域存在争议的问题、以及面对国家需求应解决的关键科学问题。并对未来5~10 a该领域的发展趋势进行了简要分析。

**关键词:**干旱;干旱指数;干旱监测预警;干旱成因;干旱研究领域  
**中图分类号:**P461 **文献标识码:**A

## 引言

在谈及干旱时,从理论上需要弄清2个概念,即干旱和干旱灾害。干旱可表述为降水的短缺或当水的供应不能满足对水的需求时的状况,是指由水分收支或供求不平衡所形成的水分短缺现象。干旱视其程度,可划分为由轻到重的不同等级,如轻旱、中旱、重旱、特旱等。而干旱灾害则是指造成了农业、经济损失,对社会有较大影响的程度较重的干旱。因此,水是讨论干旱问题不可或缺的首要因素,干旱和干旱灾害的最大差别实质上也就是水的亏缺程度的差异,当水分短缺的现象没有影响到正常的生产生活,并能在短时间内恢复对水的需求时,可谓之干旱;而当水分短缺现象严重,影响到正常的生产生活,并在短时间内不能恢复对水的需求时,则发生了干旱灾害。

事实上,日常生活中,谈及干旱时,对于干旱和干旱灾害是没有严格区分的,只要提到干旱,更多的应该是指干旱灾害。所以,当提及“某某地发生干旱”时,常常是指该地区发生了干旱灾害;通常情况下,在媒体大篇幅提到干旱、公众生活受到干旱影响、政府部门关注干旱的时候,就是指发生了程度较重的

干旱,即发生了干旱灾害。干旱灾害具有出现频率高、持续时间长、波及范围广的特点。

干旱按其种类,可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱,这种分类,也说明了干旱影响的形式和对象不同。本文以气象干旱为基础,主要阐述我国对于干旱这一研究领域的气象需求以及国内外在气象干旱方面的研究进展。根据已有的研究成果,提出目前在气象干旱领域存在争议的问题,以及面对国家需求,提出应该解决的关键科学问题,并根据国家需求和当前存在的问题,分析未来气象干旱领域的发展趋势。

干旱的成因复杂,从其自身的发生发展来说,干旱也是所有自然灾害中影响因素最为复杂、人类对其认识最少、监测和预警预测最为困难的自然灾害之一。干旱的根本原因是降水缺乏,而降水的不足会因气候和地理条件、生态系统类型以及社会与经济活动等因素的不同而产生不同的影响。因而,梳理近几十年来在气象干旱研究领域的科技成果,尤其是进十几年来的最新干旱研究成果,有助于加深对干旱的进一步认识和理解,同时也是今后进一步认清研究方向,集中力量加强气象干旱研究领域薄弱环节研究的必要手段。

收稿日期:2012-06-28;改回日期:2012-07-29

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201006023)和农业部948项目(2011-G9)共同资助

作者简介:王劲松(1968-),女,博士,研究员,主要从事干旱区气候变化研究. E-mail: wjsgs@hotmail.com

## 1 国家对干旱气象研究的需求

干旱是造成损失最为严重的自然灾害,受其影响的人数比其它任何自然灾害都多。干旱是世界范围的主要自然灾害<sup>[1]</sup>,在全球变化和社会经济高速发展的影响下,干旱的频繁发生已成为全球最为严峻的环境问题之一,已经引起国际社会的高度重视。干旱,尤其是重大干旱灾害直接威胁到国家的长期粮食安全和社会稳定。20世纪30年代,一场持续近10 a的干旱给美国带来毁灭性的社会经济影响<sup>[2-3]</sup>。我国是一个自然灾害频发的国家,据统计,气象灾害造成的经济损失约占所有自然灾害的70%,其中干旱造成的损失又占了气象灾害的50%以上。预测表明<sup>[4]</sup>,如果中国不对干旱灾害给予应有的重视和积极有效的应对,到2030年,中国东北地区,3 500万农民可能损失一半以上的农业收入。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在其出版的4次气候变化评估报告中对干旱与荒漠化进行了系统研究。这类研究代表了世界干旱研究新的水平与方向。评估报告表明,未来30~50 a,世界各地可能持续干旱化的趋势,对生态系统和可持续发展产生不利影响。

气象灾害分为天气灾害和气候灾害,天气灾害是指局地性、短时间的强烈天气带来的灾害,其影响范围小、持续时间短。气候灾害则是指大范围、长时间的气候异常所造成的灾害,其影响范围广、持续时间长。气候灾害造成的经济损失占到气象灾害造成的经济损失的78%左右<sup>[5]</sup>,干旱灾害属于气候灾害,因而一旦发生干旱,就会造成大范围的、长时间的影响。长期以来,干旱就是我国影响范围最广、造成经济损失最为严重的气象灾害之一。

干旱作为我国最为严重的自然灾害之一,正日益严重地威胁着我国粮食安全和生态安全,制约着国民经济的发展。随着气候变化,在过去的十几年间,重大干旱事件的发生频率和持续时间有不断增加的趋势。干旱灾害不仅在我国北方多发,而且在南方湿润地区也频繁发生。2006年重庆遭遇了夏季高温干旱;2004年和2007年秋季,被誉为“千河之省”的四川省和“水资源丰富”的湖南省2次遭遇严重干旱,造成水资源严重匮乏。干旱使得2省面临严峻的水资源短缺,从而针对四川都江堰水库的水管理问题(主要涉及灌溉农业和周边饮水问题)、湖南湘江水位下降到历史最低的事实,均引发了社会的激烈争论;2009年秋季至2010年春季,云南、贵

州、广西、四川、重庆等地遭遇了秋冬春3季的严重连旱,给当地乃至全国的经济和社会发展带来了严重的影响;2011年春季,长江中下游发生了自1954年有完整气象观测记录以来较为严重的旱情,使得当地农业和水产业受到重创;2011年主汛期云南又出现有气象记录以来最严重的伏旱;且2012年云南再次出现严重春旱。可见,大旱连续3 a袭击云南。

近年来干旱范围几乎遍及全国。因此,提高对干旱灾害的监测、预警水平,从而增强防御干旱能力已经成为国民经济中亟待解决的重大科学问题。干旱特别是重大干旱灾害的监测和防御也列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》“公共安全”重点领域中“重大自然灾害监测与防御”优先主题,以适应国家防灾减灾、应对气候变化和保障粮食安全的迫切需求。科学地预测干旱发展趋势,评估其社会经济影响,提出合理的适应对策,既是国家在战略层面上决策的重大需求,也符合国家中长期科学和技术发展规划。

随着需求的增长、有限的供给以及气候变化的影响,干旱将会变得越来越频繁和严重。在气候变暖大背景下,干旱影响范围已由传统的农业扩展到工业、城市、生态等领域,我国区域性重大干旱事件明显增多,进一步增大了我国区域干旱的风险,加剧水资源供需矛盾。随着经济的迅速发展、人口增长及由此引起的以气候变暖为标志的全球变化的发生,干旱有进一步加重的趋势<sup>[6]</sup>。

面对这些挑战,国家决策者需要获得足够的信息来帮助他们准备应对干旱的计划,从而有效地分配资源、降低干旱造成的危害。

近十几年来,在干旱气象的研究领域,中国国家重点基础研究发展计划启动了一系列与干旱有关的项目,包括1998年“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论研究”、1999年“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”、2005年“北方干旱化与人类适应”、2008年“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响”及2009年“干旱区绿洲化、荒漠化过程及其对人类活动、气候变化的响应与调控”等。这些研究项目的设立,既符合国家发展战略的要求,也是应对全球变化的重要研究方向,同时表明了国家对干旱问题的高度重视。这些项目,从自然因素、人类活动、全球变暖等方面对干旱化的机理、成因及其影响进行了深入研究,取得了一系列有国际影响的创新成果。但到

目前为止,对于干旱以及重大干旱灾害的形成机理仍需深入认识;因此,从国家层面上对于干旱气象领域的需求来说,做好干旱事件发生发展的监测预警和预测业务的发展,尤其是完善西北、东北、西南等干旱灾害高发区的干旱监测预警业务成为当务之急;开展提高监测预警预测重大干旱事件的发生、发展和评估能力的基础研究,并及时应用到业务实践成为重要任务。

## 2 近年来干旱研究领域的主要进展

美国联邦紧急事务管理局估计每年美国因干旱造成的损失为 60 ~ 80 亿美元<sup>[7]</sup>。2002 ~ 2004 年,在美国西部,2007 年,在美国东南部,2009 年在美国南部都发生了极端干旱事件。欧洲环境署的资料显示<sup>[8]</sup>,2002 年、2003 年、2005 年、2007 年和 2008 年欧洲发生了严重的干旱事件。在 2000 ~ 2009 年间,澳洲最大河流—Murray - Darling basin 来水量下降了 42%,在维多利亚州西部下降了 60% ~ 90%<sup>[9]</sup>。对于中国来说,2006 年的重庆大旱,2008 ~ 2009 年的北方干旱,2009 ~ 2010 年的西南干旱,以及刚刚过去的 2011 年春季,长江中下游的干旱,都让人记忆犹新。近 10 a 来一系列干旱事件发生的事实表明,全球各地的干旱发生趋于频繁,相应地,对于干旱的研究也开展了大量的工作。

在气象干旱的研究领域,主要开展了以下几个方面的工作:干旱监测预警技术研究、干旱成因和机理研究、干旱预测研究、干旱气候变化及其影响研究。

### 2.1 干旱监测预警技术研究

提高干旱监测预警技术是国际干旱研究领域的一项重要内容。对干旱的监测预警的研究,主要借助于干旱指数和实施干旱的观测试验研究来开展工作。

#### 2.1.1 干旱指数研究

在干旱指数研究方面,通常利用气象、水文、土壤资料,或卫星遥感资料来建立不同的干旱指数,从而进行干旱监测预警。据世界气象组织统计,常用的干旱指数达 55 种之多,例如降水距平百分率、Palmer 干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)、相对湿度指数、综合气象干旱指数(CI)、Z 指数、连续无雨日数等。

干旱监测指数的研究,经历了漫长的发展过程,美国早在 20 世纪初就开始研制干旱指数<sup>[10]</sup>,如

Munger 指数、Kincer 指数,2 个指数均以日降水量的大小来判断干旱,但这类指数是只考虑了降水量这一单因素的干旱指数;随后, Marcovitch 将气温和降水 2 个要素同时引入干旱指数的计算, Thornthwaite 又提出用降水量减去蒸散量作为干旱指数,这类指数是多因素的简单综合干旱指数,而正是这些工作推进了干旱指数研究的进一步发展。20 世纪中期,Palmer 提出 PDSI,该指数综合考虑了水分亏缺量和持续时间对干旱程度的影响,并考虑到土壤上下层的含水量,是一个多因素的复杂综合干旱指数。PDSI 被认为是干旱监测指数发展史上的里程碑。

根据具体的应用需求和实际情况,我国对 PDSI 进行了修正和改进。安顺清等<sup>[11]</sup>利用中国区域的气候资料对 PDSI 计算方案的参数进行了订正,以使模式更适用于我国北方地区;杨小利等<sup>[12]</sup>从建模资料长度、站点密度、可能蒸散的计算、土壤田间持水量和径流计算、土壤失水模式等几个方面对原有模式进行了修正,使其更适合在甘肃中东部的黄土高原使用;王劲松等<sup>[13]</sup>通过将河西内陆河径流量转化为降水量,又将潜在蒸散量的算法由利用桑斯威特公式改为利用彭曼公式来改进对 PDSI 的计算,使得该指数对河西灌溉区干旱情况的监测有所改善。

基于美国国家干旱减灾中心(NDMC)的干旱监测预警系统,其每周发布的干旱监测图<sup>[14]</sup>,是目前应用于北美洲的主要干旱监测产品,这一干旱监测产品包括了主要指标(标准降水百分位数、标准降水指数、PDSI、气候预测中心的土壤湿度模式、地质测量局的日流量指标、卫星遥感植被健康指数)和辅助指标(作物湿润指数、地表供水指数、森林火灾危险指数、水库蓄水量、湖泊水位、地下水水位等)<sup>[15]</sup>。这些主要指标和辅助指标都是客观的,但 NDMC 每周发布的干旱监测图的最终结果并不仅仅考虑客观的干旱指标值给出的干旱监测结果,而同时要考虑一些主观的因素,这主要包括来自全美的大约 270 个专家根据本地实际情况提出的对客观监测图的修改意见和建议、考虑一些来自媒体的报道,以及考虑通过网络搜索一些关键词(如干旱程度、缺水、粮食短缺、干旱灾害、公众对干旱的反映、农业部的报道等)。最后综合客观的指数或模型的干旱监测结果和主观的信息,最终形成干旱监测图,再对外发布。

在我国,国家气候中心采用 GIS 技术进行分析制作的全国干旱监测图,包括了 CI 指数、SPI 指数、降水距平百分率(PRP)和土壤相对湿度(SM)。其

中  $CI$  指数,称为综合气象干旱指数,是国家干旱的行业标准<sup>[16]</sup>,它是利用近 30 d(相当月尺度)和近 90 d(相当季尺度)降水量标准化降水指数,以及近 30 d 相对湿度指数进行综合而得,既反映了短时间尺度(月)和长时间尺度(季)的降水量气候异常,又反映了短时间尺度(月)水分亏缺情况,是一个适用于表述干旱发生、发展和结束过程的动态监测指标。近些年来, $CI$  在国内干旱实时监测评估和干旱的时空特征分析中得到了广泛应用<sup>[17-23]</sup>,为全国干旱监测与评估业务的规范化和标准化做出了重要贡献。但是近几年对  $CI$  指数的应用,尤其是在 2009/2010 年西南气象干旱监测中,发现  $CI$  指数对干旱的动态监测存在“旱情突然加剧”问题,针对这一问题,王春林等<sup>[24]</sup>采用线性递减权重方案代替等权方案来计算近 90 d 降水和可能蒸散,提出了改进的综合气象干旱指数,有效克服了  $CI$  的“不合理旱情加剧”问题,且能够刻画干旱频发开始月份相对于少雨时段开始月份的滞后效应。赵海燕等<sup>[25]</sup>则采用非等权重思想,考虑距离当日越近的降水对当日的旱涝作用越大,对综合气象干旱指数进行修正,修正后的指数减少了干旱发展过程中的不连续加重现象,且与同期土壤湿度有更好的相关性。这些研究成果为  $CI$  在更大范围推广应用提供了参考依据。但由于干旱是既涉及降水,又涉及蒸发,还与不同地区的地形和地貌有关,因此,对于线性递减权重方案,或者是非等权重方案,都没有可靠的试验依据,在确定更加合理的权重方案上,还有许多工作需要进一步探讨<sup>[24]</sup>。

鉴于干旱自身的复杂性和影响的广泛性,干旱在不同地区和时间有其相异的特征,因此对于各省来说,除了使用上述常用的干旱指数,并对干旱指数在各地的适应性进行分析外,各省还根据本地的特点,发展了不同的干旱指数。例如,河南省气象科学研究所研制的 GSRAT-1 FDR 型自动土壤水分观测仪<sup>[26]</sup>,通过土壤水分的指标监测干旱、广东省根据土壤有效含水量研制的干旱指数<sup>[27]</sup>、甘肃省基于降水和蒸发研制的  $K$  干旱指数<sup>[28]</sup>,在本地都得到了很好的应用。

遥感手段监测干旱具有分辨率高、传感器覆盖面广、数据易获取的特点。常用的方法有热惯量法,以及利用可见光和反射红外遥感资料监测干旱和反演土壤水分。利用可见光遥感数据(Landsat 和 SPOT,NOAA、MODIS、FY 系列,环境减灾小卫星)及

微波遥感资料(被动微波 AMSR-E、主动微波 SAR),在干旱监测领域取得了一系列的成果。Brown 等<sup>[29]</sup>构建了 1 km 分辨率的遥感干旱监测指数——植被干旱响应指数(VegDRI),该指数不仅应用了基于卫星遥感的观测数据,而且还集成了历史气候数据、地表覆盖、土地利用和土壤的有关资料,是卫星遥感数据与气象数据结合的干旱监测方法。该指数的计算方法中利用到了最新的数据挖掘技术<sup>[30]</sup>。考虑土壤湿度和植被生长状况是干旱最重要和最直接的指标,张红卫等<sup>[31]</sup>基于水的光谱反射特性,提出了地表含水量指数(SWCI)模型,用于大范围的、快速的浅层土壤墒情的遥感监测。齐述华等<sup>[32]</sup>利用 MODIS 数据建立的温度植被干旱指数(TVDI)在应用于大区域干旱监测中取得了很好的效果,并建立了温差植被干旱指数(DTVDI)。植被状态指数(VCI)是应用最广泛的一种卫星遥感干旱指数,对全球许多地方的干旱均有较好的反映,已经应用在美国国家大气海洋局日常干旱监测业务中,中国国家卫星气象中心卫星遥感干旱监测服务也是以 VCI 为基础;郭锐等<sup>[33]</sup>将 VCI 在西北的应用进行了改进,并提出了 RVCi 指数。尽管用可见光与近红外及热红外遥感土壤水分是可行的,但当地球表面被云层覆盖时,它们则变得无能为力。而微波对云层有较强的穿透力,因此微波遥感在土壤水分监测中则弥补了这一不足<sup>[34]</sup>。王晓云等<sup>[35]</sup>利用 3s 技术,通过定义能量温度比指标,按不同时间和不同土层深度分别建立其与土壤水分的回归模型,进行了北京地区土壤水分的监测。

### 2.1.2 干旱的观测试验研究

国际上相继实施的与干旱有关的重要研究计划包括:全球能量和水循环试验(GEWEX)中“协同能量和水循环观测计划(CEOP)”、世界气候研究计划(WCRP)(包括耦合模式比较项目(CMIP5)、极端气候(Climate Extremes)、气候变率与可预报性研究计划(CLIVAR)(包括美洲季风系统变化(VAMOS)、季节内振荡(MJO))、观测系统研究和预测试验(THORPEX)、国际卫星云气候计划(ISCCP)、全球环境变化下人文因素计划—综合风险管理(IHDP-IRG)。

这些研究计划的实施,一方面标志着干旱研究已摆脱传统意义上的仅关注降水的研究,并与全球变化、生态环境、社会经济与可持续发展密切结合,成为联系众多学科、交叉特征突出、综合性显著的国

际关注的焦点;另一方面表明干旱的研究由单纯的考虑空中降水转变为注重下垫面状况的观测试验研究。

自20世纪90年代末期以来,我国北方干旱化的问题变得非常严峻。符淙斌等<sup>[36]</sup>认为,不合理的人类活动是加剧北方干旱化的原因之一,叶笃正等<sup>[37]</sup>曾提出有序人类活动的概念。这些研究表明通过组织有序合理的人类活动,可在一定程度上实现控制干旱化过程的发展和生态环境的改善。为开展人类活动和干旱化过程之间的相互作用机理的研究,依托国家基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”的支持,中国科学院大气物理研究所吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站,旨在通过长期定位观测,为研究北方干旱化趋势提供第一手科学观测资料。该实验站纳入了国际计划CEOP的观测网,取得了一批地表物理特征和地气通量交换的观测资料<sup>[38]</sup>。

继完成“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”项目之后,中国科学院大气物理研究所又主持另一国家基础研究发展规划项目“北方干旱化与人类适应”,甘肃兰州半干旱区观测实验站“兰州大学半干旱区气候与环境长期连续强化观测站”正是在该项目的支持下建立的,并已被纳入CEOP计划国际基准站。依托观测实验站的资料,研究了不同土地覆盖/利用状况下地气通量交换的特征及其对干旱化发展的影响。分析了2种下垫面的多个地表特征参数及水热和CO<sub>2</sub>通量的变化规律,检验了多种陆面过程模式的性能。

中国气象局兰州干旱气象研究所(简称干旱所)开展以“大气—土壤—植被”之间水分和能量循环过程及相互作用为主的观测试验,为干旱监测业务提供试验基础数据。目前,干旱所已经建立了张掖干旱气象试验基地(干旱区代表站)、定西干旱气象试验基地(半干旱区代表站)和华东(南京)干旱联合科学试验基地(湿润区代表站)。利用已有的观测资料,开展了一些有代表性的工作。王胜等<sup>[39]</sup>的研究表明,在相对湿度>30%时,即可出现露水;相对湿度在80%~90%之间形成露水的频率较高;相对湿度>90%时,露水出现频率反而有所下降。这一研究成果,为干旱半干旱区开展降露水抗旱的研究提供了理论基础。地面总体输送系数是表征地气之间能量和物质交换的物理量,区域地表通量的

贡献而且对区域水分循环有重要影响。杨兴国等<sup>[40-41]</sup>的研究表明,地表和大气之间能量的传输将直接引起土壤温度的变化,进而影响到土壤湿度的变化;随着太阳辐射的减弱,总体输送系数缓慢减小,这一特点充分反映了地表面热力作用引起的湍流交换强度的日变化。

## 2.2 干旱成因和机理研究

干旱成因可归为2个大的方面:气候本身的自然变化过程,以及人类活动的影响。目前来说,要区分自然变化和人类活动的影响还是比较困难的问题。国内外通过数值模拟、统计诊断的方法开展了以下研究。

Benjamin等<sup>[3]</sup>通过海温强迫大气环流模式(GCMs)的研究表明,20世纪30年代北美的严重干旱与那些由于拉尼娜造成的典型的干旱事件非常不同。拉尼娜通常造成美国中部和北部平原的严重干旱、几乎整个大陆的高温异常以及大范围的沙尘暴。人类活动造成的地表退化不仅造成1930年代的沙尘暴而且加重了干旱程度,这些因素一起使受海温异常影响的干旱转变为美国地区所经历的最严重的生态灾难。Siegfried<sup>[2]</sup>的研究亦表明,20世纪30年代美国的严重干旱,与热带海表温度异常引起的大气环流异常,以及陆气相互作用有关。

美国半数以上的年代际尺度的干旱都可归因于太平洋10a涛动(PDO)和大西洋年代际涛动(AMO)的异常变化<sup>[42]</sup>,1996年、1999~2002年,影响美国的大范围干旱都与北大西洋变暖(AMO正位相),以及东北和热带太平洋变冷(PDO冷位相)相联系。许多干旱频率的长期可预报性都可基于北大西洋年代际的活动规律。

热带海表温度异常,同样对北半球中纬度地区,以及非洲萨赫勒地区的干旱持续有很大贡献。西非严重的旱灾持续时间从几十年至几百年,主要是由于季风的变化特征不同以及与大西洋温度的自然变化有关<sup>[43]</sup>。印度洋增暖引起的环流异常,也是西非干旱的原因之一。强El Nino年和弱印度季风年与印度南部干旱相伴<sup>[44]</sup>。北大西洋涛动(NAO)的正负位相的不同分布是引起欧洲干旱的主要原因<sup>[45]</sup>。

Choi等<sup>[46]</sup>指出,在东亚地区(尤其是华北,韩国和日本的西南部地区),北太平洋涛动指数(NPO)为正位相,则夏季干旱加强。当整个对流层气压场为“南低北高”的异常环流形势时,有利于冷的东北气流的南下,下沉运动加强,相对湿度相应减少;同

时,冷的东北气流阻止了西太平洋副热带高压的北进,使得热带气旋经过东亚地区的频率减少,从而加剧了这些地区的干旱程度。

东亚夏季风和印度夏季风强弱、进退和停留与我国各地发生的干旱有密切联系<sup>[47]</sup>。黄荣辉等<sup>[48]</sup>的研究指出,南海夏季风爆发早,将引起江淮流域和长江中、下游夏季风降水偏少,并往往伴有干旱发生;相反,黄河流域、华北和东北地区的夏季降水偏少,发生干旱。西太平洋副热带高压的季节变化、东西振荡以及南退北进是影响我国江淮流域、华北和东北地区是否发生干旱的原因之一;热带太平洋海温异常是造成全球相关地区持续性干旱的重要原因,当赤道中、东太平洋海温处于上升阶段时,我国黄河流域和华北地区易发生干旱;反之,则淮河流域易发生干旱;而当西太平洋暖池的海温偏高时,长江中下游地区和淮河流域的降水往往偏少。高原东部凝结潜热具有一个月的持续影响力,当高原东部凝结潜热增强时,可引起北半球同纬度带的位势高度场偏低,西太平洋副高偏弱,位置偏南,我国长江流域汛期降水偏多,西北区东部、华北、东北区南部及华南降水偏少。青藏高原天气尺度系统和下垫面热力状况的变化与我国干旱区域的分布和强度变化均有关联<sup>[49]</sup>。

2009年秋季至2010年春季,云南省遭遇了秋冬春3季极端干旱,对于这次严重干旱事件的成因,许多学者从不同角度进行了分析。Lv等<sup>[50]</sup>、琚建华等<sup>[51]</sup>认为热带大气季节内振荡(MJO)的变化在这次严重干旱中扮演了重要的角色,是造成干旱的深层次原因。其机理在于,2009年6~10月MJO持续维持弱指数,相应地,孟加拉湾地区的对流活动持续变弱,并在热带印度洋地区激发出异常的下沉气流,使得南亚地区的亚洲季风垂直环流异常减弱,热带印度洋向云南的水汽输送异常减少,从而导致2009年夏季至秋季云南的降水持续偏少,形成干旱。黄荣辉等<sup>[52]</sup>从热带西太平洋和热带印度洋升温的角度,解释了2009年秋至2010年春,造成从孟加拉湾来的水汽很难到达云贵高原的原因;同时分析了中高纬环流异常的影响,北极涛动(AO)的负异常,使东亚冬季冷空气强但路径偏东,到达西南地区的冷空气偏弱,这与文献<sup>[51]</sup>对AO持续异常影响云南此次干旱的分析结果是一致的。宋洁等<sup>[53]</sup>的研究表明,与云南省冬季降水紧密联系的南北2个环流系统是南支槽波列和贝加尔湖高压脊系统,分别表示

了影响云南冬季降水的暖湿气流以及冷暖空气活动,北大西洋涛动(NAO)通过影响这2个环流系统,来影响云南的降水。

### 2.3 干旱预测研究

干旱预测的研究,主要依靠2方面的的手段,其一是对干旱成因的分析,通过统计诊断的方法,寻找干旱的发生与不同影响因子之间的关联,从而找到影响降水变化的强信号或建立降水与影响因子之间的概念/物理模型,再根据强信号的变化或建立的概念/物理模型,借助于对月、季、年降水(或干旱指数)的趋势预测来对干旱进行预测;另一方面,是目前干旱预测研究的主要依据,即从定性预报发展到数值模式的定量预报,通过对未来降水的预测来达到判断未来干旱的目的。数值模式是目前国际上对干旱预测和预估的主要手段。

#### 2.3.1 统计诊断方法

Barros等<sup>[54]</sup>通过主成分分析、小波分析等方法,识别并选择预报因子(厄尔尼诺事件,特定区域的海表温度、对外长波辐射以及风应力的异常),结合线性/非线性统计模式和多元线性回归分析,基于标准化降水指数SPI的干旱事件,构建了预报因子与降水之间的概念模型,实现澳大利亚东南部干旱的长期预测。基于太阳活动的预测方法,应用到美国和萨赫勒的干旱长期预测中<sup>[55]</sup>。该方法通过太阳活动与大气、海洋环流的关系,在预测大气环流和海洋环流的基础上,进而对长时期的干旱做出预测。

Sun等<sup>[56]</sup>的研究表明,干旱的发生首先从北非开始,再向东延伸到中东和中亚,最后扩展到中国的西北地区。干旱由北非东传到西北的时间平均约为27.5 a,这一结果为西北干旱的长期预测提供了一定的依据。汤懋苍<sup>[57-58]</sup>的地—气相互作用的方法,也应用到干旱的预测中。

我国在短期气候预测中以统计学方法为主,同时发展动力学与统计学相结合的预测方法。基于观测资料建立数学模型并对其未来的趋势进行预测的方法,在不同区域的干旱预测中得到广泛应用<sup>[59-64]</sup>。通过分离干旱的年际和年代际时间尺度变化建立的多尺度预测模型<sup>[65]</sup>、场时间序列的动力学预报方法<sup>[66]</sup>、年际增量方法<sup>[67]</sup>,应用到华北的干旱预测中。针对模型预测的缺陷,基于气候系统是一个自组织、自适应的复杂非线性系统,具有典型的自适应特征,何文平等<sup>[68]</sup>发展了一种旱涝预测的演化建模方法,为旱涝预测提供了一个新的思路。



### 2.3.2 数值模式手段

苏黎世理工大学的气候学家通过数值模式,展示了导致美国20世纪30年代严重干旱的大气环流的三维图片,并通过数字化历史数据来优化数值模式,以期这项工作会使更为准确地预测未来旱灾成为可能。在此研究中发现太平洋的寒冷通常与大西洋的温暖相伴而生。由于热带海域的温度在一定程度上能够预测,因此干旱预测的可能性增大。

IPCC采用包含影响气候的自然和人为因子共同驱动的不同气候模式CGCMs的预测表明:未来100 a全球降水和水资源,将在中纬度地区进一步减少,在中高纬度地区有可能增加。在温室气体继续增加的情形下,哈德莱中心的区域气候模式(HadRM3)和全球气候模式(HadCM3)的预测表明,21世纪,英国干旱发生的可能性增大<sup>[69]</sup>。基于同样的情形,NOAA的气候模式CM2.0和CM2.1预测撒哈拉未来也有干旱增加的可能性<sup>[70]</sup>。

我国利用数值模式制作短期气候预测的研究取得了重要的成果<sup>[71]</sup>,中国科学院大气物理研究所发展了多层大气环流模式和海—气耦合气候模式,应用这些模式可较好模拟中国旱涝,并用于跨季度旱涝预测<sup>[72]</sup>。国家气候中心利用全球环流模式OSU/NCC进行我国汛期旱涝预测<sup>[73]</sup>。针对长江中下游汛期降水模式的预报误差,王启光等<sup>[74]</sup>利用相似年的降水误差场对模式结果进行相似误差订正,其效果明显优于系统误差订正。在此基础上,对前期因子进行筛选,确定相似误差场的多因子优化组合,提出了基于优化多因子组合的客观定量化预测技术,使得模式预测效果得到明显改善。

### 2.4 干旱气候变化研究

随着干旱的频繁发生,干旱化趋势发展的可能性在增大,从而干旱气候变化及其影响的研究越来越受到人们的重视。干旱气候变化引起的沙漠化和生态退化及其对人类社会产生的影响已日益严重。一方面干旱气候变化影响了人类生存和发展,另一方面人类活动在一定程度上也加剧了干旱化的趋势。如何应对气候变化及其影响,实现人类与自然和谐相处,促进社会经济可持续发展,是世界各国面临的共同挑战。因此,搞清楚干旱气候变化及其影响,是国际社会采取适应对策来应对干旱气候变化的重要理论依据。

近100 a来气候变化的最显著的特征是全球变暖,1906~2005年全球的线性增温率为 $0.74 \pm 0.18$

℃,高于1901~2000年的 $0.6 \pm 0.2$ ℃,全球变暖已经引起了科学界和社会公众的广泛关注<sup>[75-77]</sup>。

有关干旱气候变化,近十几年来已经开展了广泛的工作<sup>[78]</sup>。Hulme<sup>[79]</sup>分析了全球范围9个干旱区(美国西南部、亚洲西南部、东亚中部、非洲北部、非洲萨赫勒地区、非洲合恩地区、非洲南部、澳大利亚、南美巴塔哥尼亚地区)1900年到1994年的降水变化特征,发现尽管这9个地区近百年来都在一致地变暖,但降水却没有一致的变化特征,即在这9个干旱区中没有一致的变湿或变干的线性趋势。例如,萨赫勒的降水约减少了21%/100 a,巴塔哥尼亚和澳大利亚的降水则分别增加了约18%/100 a和14%/100 a。从9个干旱区降水的平均状况以及全球陆地降水的平均状况来看,近百年降水的线性趋势分别为减少了11.1 mm/100 a和增加了30.6 mm/100 a。

西非的半干旱地区降水持续30 a减少,其中萨赫勒地区的降水量减少了20%~40%<sup>[80]</sup>;1950年代到1980年代,萨赫勒的降水存在明显减少的趋势<sup>[81]</sup>;中国华北的降水1980年代以来持续偏少,干旱强度有所增加,这与夏季200 hPa亚洲中纬度西风环流加强,850 hPa 110°~120°E范围内偏南气流比气候平均状况偏弱有关<sup>[82]</sup>。

可见,上述研究主要通过降水量的变化来解释和揭示区域干旱化的事实。但仅从降水的变化无法体现增暖对环境干湿变化的作用,因为降水只是作用于地表干湿变化的一个重要因子,但不是唯一的因子<sup>[83]</sup>。

近年来的一些工作,在研究中注意到了考虑降水和温度的共同作用对区域干旱化的影响。马柱国等<sup>[83]</sup>通过分析中国区域的干旱化特征发现,我国东北、华北、西北东部及西南地区的干旱化与降水的持续减少密切相关,但增暖亦是促使这些地区干旱化形成和维持不可忽视的重要因素。Wang等<sup>[84]</sup>对全球变暖背景下,中亚和中国西北的干旱气候的研究表明,尽管哈萨克斯坦西部、中亚南部的4国、我国北疆的降水量是呈显著的增加趋势,但这些区域却并不存在显著的变湿趋势,有的区域甚至表现为显著的干旱化趋势(如在乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的西部),正好与降水的变化趋势相反。由于受增暖的影响,我国的南疆盆地、中国和蒙古交界的中部地区干旱化趋势的强度要明显强于降水量减少趋势的强度。干旱化趋势最显著的地区与增暖最大的地

区对应,说明了气温对于湿变化影响的重要性。

### 3 干旱研究领域可能取得突破的关键科学问题

面对国家在战略层面上对干旱监测、预测、影响和适应对策问题上的重大需求,以及近年来的干旱研究进展,认为在干旱研究领域可能取得突破的关键科学问题包括以下4个方面:干旱指数的区域适应性、遥感监测干旱、干旱预测、干旱的风险管理。

#### 3.1 干旱指数的区域适应性问题

由于干旱涉及大量的不同学科,有许多表述干旱的指标,它们都依赖于受影响的学科、受影响的地区和特殊的应用。所以度量(量化)干旱是一件困难的事。干旱指标是描述干旱特征的基本工具,不同学科的干旱定义和干旱指标各不相同,目前虽然各种各样的指标有很多,但还没有一种指标能够合理描述所有类型的干旱特征。

干旱指数是反映干旱程度的量度,是干旱研究的一项很重要的基础性工作。虽然有关于干旱指数的研究已经进行了一个多世纪,但由于干旱问题的复杂性,至今还有许多问题没有解决。尽管干旱指数能较好地描述干旱特征,但由于同一干旱指数在不同地区、或不同干旱指数在同一地区,其干旱监测的结果有可能是不同的,即干旱指数对不同区域的适应性有所不同,这就需要对于干旱指标的适应性进行检验,从而给出在不同区域的应用中较为适宜的干旱指数。

#### 3.2 遥感监测干旱的不足

遥感监测干旱,以其能反映大范围地表信息的优点,克服了传统的台站网络监测干旱的不足,但仍存在一些问题:光学遥感的图像覆盖范围较广,但是容易受天气条件的影响,微波遥感不受天气影响,但图像价格较高;高分辨率、高光谱遥感图像的覆盖范围小,重访周期较长,难以对旱灾进行大范围的快速监测;NOAA、MODIS等卫星的覆盖范围大,时间分辨率高,但光谱分辨率低,在对干旱进行定量准确监测方面有一定局限。

#### 3.3 干旱预测

干旱并不是随机事件,它是正常气候变化的一个部分,这是一种很重要的认识。如果将它当成一种偶然的事件,那么必然会无形中降低对它的风险管理意识和可预报性的认可。基于干旱是一种气候的异常事件,因此,可以利用具备了一定研究基础的

气候变化的研究结果和预测技术,来对干旱进行科学的预测预警。

干旱预测是一个古老的问题,尽管从定性的统计分析发展到了数值模式的定量预报,但迄今为止,仍然是一个科学界的难题。提高干旱预测准确性这条路仍然是漫长的,因为到目前为止,还没有一个很好的评判干旱开始和结束的指标体系,目前的季节性预测技术也不是很可靠,这就限制了干旱预测预警的效果。

诚然,长期的大气环流异常是导致干旱发生的原因,但是,引起这种异常的因子很多,可包括海气相互作用、土壤湿度、陆面过程、地形、全球尺度的不稳定天气系统的动力累积效应等<sup>[55]</sup>,即使是利用大气环流模式来预测干旱,也难以在模式中表述这种多因子的复杂性,因此如何提前一个月或更长时间尺度来预测干旱仍然存在困难<sup>[85]</sup>。太阳活动作为影响气候变化的主要外部因子之一,太阳活动与干旱是否有密切的关联?在影响干旱方面到底有多大的作用?Landscheidt<sup>[55]</sup>的基于太阳活动的预测方法已经成功地应用到了美国和萨赫勒的干旱长期预测中。但至今,科学家们对太阳活动对干旱的影响各执一词,还没有一致的看法,因此还需要深入的研究,有望取得突破进展。

#### 3.4 干旱的风险管理

对于干旱研究,目前最大的一个转变在于,人们更强烈地意识到了要从干旱的危机管理向干旱的风险管理过渡<sup>[86]</sup>。所谓干旱的危机管理,是在干旱灾害发生后采取的一系列的针对干旱灾害的援助行动,从而从干旱灾害中恢复的过程,这是一种被动的响应过程;而干旱的风险管理,则是依赖于科学的研究,利用早期干旱预警和信息发布系统、干旱监测网络、干旱规划(图1),尽可能在国家、地方决策部门的指导下,在干旱前期就具备了降低干旱风险的策略,而不是过多地依赖于对干旱灾害的援助行动,这是一种主动的应对过程。

美国的“10步骤干旱计划”正是体现了干旱的风险管理理念,提出了从国家层面上应该采取哪些手段、方法和措施来及时地应对干旱灾害的影响([http://drought.unl.edu/plan/handbook/10step\\_rev.pdf/](http://drought.unl.edu/plan/handbook/10step_rev.pdf/))。该计划从应对干旱的组织管理、干旱计划的目的性、干旱计划的制定者及相互之间的合作等方面进行了详细的阐述,在世界范围内得到广泛的应用和修正。非洲、澳大利亚、印度等地,在干旱



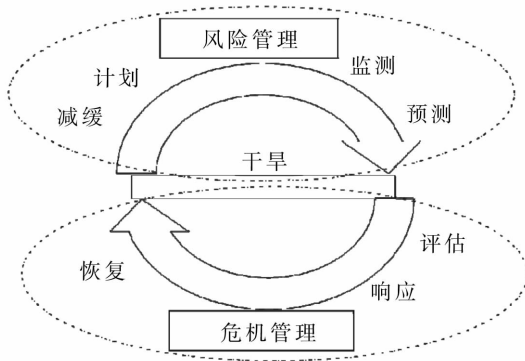


图1 干旱的危机管理和风险管理示意图  
(根据 Wilhite<sup>[86]</sup> 改绘)

Fig.1 The sketch map for crisis and risk management of drought events (according to Wilhite<sup>[86]</sup>)

预警、制定干旱政策、进行干旱风险管理上也开展了大量工作<sup>[87]</sup>。

干旱研究的热点在于与干旱有关联的各个方面,有最直接联系的如水的综合管理和气候变化。频发干旱影响的地区,合理的水资源利用成为主要的缓解干旱的手段,这样就使得水资源的管理更具有可持续性:在干旱发生期,可以通过节水技术或合理的水资源的分配来达到缓解干旱的目的,同样,在非缺水期,也可推广节水技术或合理的开发和利用水资源,而不至于总是在缺水的时候才想到水资源的管理。

中国干旱灾害频繁而严重,为提高防御干旱灾害的应急能力,有效地开展抗旱工作,我国在干旱的静态和动态风险分析、评估方面,取得了一些成果<sup>[88-90]</sup>。彭贵芬等<sup>[88]</sup>通过综合实时旱情监测、气候特征分析、干旱静态气候风险分析、承灾体的脆弱性和影响时段的动态风险预评估,给出了2009~2010年云南将面临巨大干旱风险的综合预估结论。这些工作对社会和政府决策起到非常重要的作用。

在干旱应对对策和应急服务方面,各省气象部门根据本省实际建立干旱灾害应急预案。中国气象局兰州干旱气象研究所(简称干旱所)制定发布了《中国气象局兰州干旱气象研究所重大气象干旱事件预警及应急响应预案(试行)》,当相邻3个以上行政区划省份发生重旱或特旱时,干旱所将在规定的时间内启动这一应急响应预案。根据干旱级别,或加密开展干旱气象监测,或成立干旱调查组赴重灾区实地调查,并对实时监测数据进行分析,为相关

决策部门提供预警决策和相关技术服务,从机制上保障对全国干旱气象业务的科技支撑作用。例如,对2009年初我国北方特大干旱、2010年西南严重干旱和2011年的华北、黄淮地区出现的严重旱情和长江中下游干旱,干旱所及时启动重大气象干旱事件预警应急响应,密切监测干旱发展动态,提供干旱监测试验产品,发布《干旱气象动态》全国干旱特刊;派出人员到实地调查灾情和收集资料;组织召开重大干旱事件研讨会,分析研究干旱成因及发展趋势,并形成干旱专题分析材料报国家气候中心等有关业务服务部门;参加全国干旱会商会,为抗旱减灾提供决策依据。

自然灾害对社会的影响以及人类对自然灾害的脆弱性在不断增强<sup>[91]</sup>。因此对我国来说,积极探索干旱风险管理对抗旱工作具有重要意义。

#### 4 气象干旱研究领域未来发展趋势

可以看到,通过多种资料(地面常规气象观测、地面观测试验、卫星遥感等)的综合应用,以及多种方法(统计分析、动力诊断、数值模拟等)的集合分析,针对干旱的研究,在气象干旱的领域,已经取得了很多的进展。但是,由于干旱成因的复杂性及其影响涉及不同的对象,人们的需求不同,导致对干旱的理解和认识也不同,迄今仍然没有一个可以被广泛接受的干旱概念。因此在未来的研究中,仍然有很长的路要走。

众所周知,干旱是必须要有承灾体的,即在谈到干旱时,必须要考虑它的影响对象,从这种意义上来说,无论通过何种领域的干旱标准监测到的干旱都是值得重视和借鉴的。对于气象领域来说,在出现气象干旱之后,最为重要的是要了解这种气象干旱与其它领域的干旱,如农业干旱、水文干旱、社会经济干旱等干旱类型之间的关系如何?目前来说,还很难给出它们之间的定量关系,因此未来要加大不同类型干旱之间关系的研究力度,开展气象干旱引起农业等领域干旱灾害发生的致灾机理及其过程特征的研究。

另外,针对当前面临的关键科学问题,仍需集中力量,围绕下述几方面开展研究:(1)干旱监测预警方面。干旱指数的区域适应性研究,多学科结合以提高监测预警精度,集合遥感数据、气候数据及生物生理数据的干旱监测模型的开发,美国的干旱监测目前大量结合其它学科数据综合集成,我国在这方

面的成果还较少;借鉴点上定量化干旱监测的理论分析方法,开展定量化的遥感干旱监测研究;(2)干旱的致灾机理研究和干旱预测理论的发展,有效的预测技术和手段:陆面模式的发展和资料同化,如美国以陆面水文模型 VIC(可变下渗能力, Variable Infiltration Capacity) 为主,数值产品订正和资料同化为技术的干旱监测预测系统;(3)科学、准确和量化地开展农业等领域干旱灾害程度的风险预估和影响评估;(4)在国家层面上开展干旱发生发展的监测预警业务的综合平台,尤其是干旱灾害高发区的分类监测预警技术在业务上的应用亟待完善。

致谢:作者感谢匿名审稿专家提出的建设性修改意见;感谢中国气象局兰州干旱气象研究所的杨启国、王小平、张良、郭锐、柳媛普和王素萍提供相关的素材。

#### 参考文献:

- [1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions [A]. In: Wilhite D A, ed. Drought: A Global Assessment [C]. London & New York: Routledge, 2000, 3 - 18.
- [2] Siegfried D. Schubert, Max J Suarez, Philip J Pegen, et al. On the Cause of the 1930s Dust Bowl [J]. Science, 2004, 303: 1855 - 1859.
- [3] Benjamin I Cook, Ron L Miller, Richard Seager. Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human - induced land degradation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (13): 4997 - 5001.
- [4] Woetzel Jonathan, Martin Joerss, Larry Wang, et al. From bread basket to dust bowl: Assessing the economic impact of tackling drought in North and Northeast China [M]. McKinsey Climate Change, 2009. 1 - 52.
- [5] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童. 东亚气候系统与中国重大气候灾害 [C]. 黄荣辉, 李崇银, 王绍武等编著. 我国旱涝重大气候灾害及其形成机理研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2003. 3 - 17.
- [6] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314 - 319.
- [7] Martha C Anderson, Christopher Hain, Brian Wardlow, et al. Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental U. S [J]. Journal of Climate 2010. e - View doi: 10.1175/2010JCLI3812.1
- [8] <http://www.eea.europa.eu/>
- [9] Ummenhofer, Caroline C, Coauthors Indian and Pacific Ocean Influences on Southeast Australian Drought and Soil Moisture [J]. J Climate, 2010, 24: 1313 - 1336. doi: 10.1175/2010JCLI3475.1
- [10] Richard R, Heim Jr. A Review of Twentieth - Century Drought Indices Used in the United States [J]. American Meteorological Society, 2002: 1150 - 1165.
- [11] 安顺清, 刑久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用 [J]. 气象, 1985, 11(12): 17 - 19.
- [12] 杨小利, 杨兴国, 马鹏里, 等. PDSI 在甘肃中东部地区的修正和应用 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 1022 - 1028.
- [13] 王劲松, 黄玉霞, 冯建英, 等. 径流量 Z 指数与 Palmer 指数对河西干旱的监测 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 471 - 477.
- [14] <http://drought.unl.edu/>
- [15] Mark Svoboda, Doug LeComte, Mike Hayes, et al. The Drought Monitor [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83: 1181 - 1190.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准——气象干旱等级. GB/T 20481 - 2006.
- [17] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679 - 687.
- [18] 李树岩, 刘荣花, 师丽魁, 等. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析 [J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 97 - 102.
- [19] 刘晓梅, 李晶, 吕志红, 等. 近 50 年辽宁省干旱综合指数的动态变化 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(5): 938 - 942.
- [20] 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, 66(5): 599 - 608.
- [21] 谢五三, 田红. 五种干旱指标在安徽省应用研究 [J]. 气象, 2011, 37(4): 503 - 507.
- [22] 张勃, 王小敏, 贾建英, 等. 基于综合气象干旱指数 (CI) 的干旱时空动态格局分析——以甘肃省黄土高原区为例 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 17 - 24.
- [23] 张婧, 梁树柏, 许晓光, 等. 基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征 [J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1089 - 1094.
- [24] 王春林, 郭晶, 薛丽芳, 等. 改进的综合气象干旱指数 CInew 及其适用性分析 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 621 - 626.
- [25] 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 - 704.
- [26] 陈怀亮, 张红卫, 刘荣花, 等. 中国农业干旱的监测、预警和灾损评估 [J]. 科技导报, 2009, 27(11): 82 - 92.
- [27] 王春林, 吴举开, 黄珍珠, 等. 广东干旱逐日动态监测模型及其应用 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 36 - 42.
- [28] 王劲松, 任余龙, 宋秀玲. K 干旱指数在甘肃省干旱监测业务中的应用 [J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 75 - 79.
- [29] Brown Jesslyn F, Brian D Wardlow, Tsegaye Tadesse, et al. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A New Integrated Approach for Monitoring Drought Stress in Vegetation [J]. GIS Science & Remote Sensing, 2008, 45(1): 16 - 46.
- [30] Tsegaye Tadesse, Brian Wardlow. The Vegetation Outlook (Veg-Out): A New Tool for Providing Outlooks of General Vegetation Conditions Using Data Mining Techniques. Seventh IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW 2007), 2007. 667 - 672.
- [31] 张红卫, 陈怀亮, 申双和, 等. 基于表层水分含量指数 (SWCI) 的土壤干旱遥感监测 [J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 624 - 628.
- [32] 齐述华, 李贵才, 王长耀. 利用 MODIS 数据产品进行全国干旱监测的研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 56 - 61.

- [33] 郭锐,管晓丹. 植被状况指数的改进及在西北干旱监测中的应用[J]. 地球科学进展, 2007, 22(11):1160-1168.
- [34] 王小平,郭锐. 遥感监测干旱的方法及研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4):76-80.
- [35] 王晓云,郭文利,奚文,等. 利用“3S”技术进行北京地区土壤水分监测[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4):422-429.
- [36] 符淙斌,温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1):22-29.
- [37] 叶笃正,符淙斌,季劲钧,等. 有序人类活动与生存环境[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4):453-460.
- [38] 刘辉志,董文杰,符淙斌,等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2):378-389.
- [39] 王胜,张强. 黄土高原半干旱区露水形成的大气物理特征研究[J]. 物理学报, 2011, 60(5):059203.
- [40] 杨兴国,张强,王润元,等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究[J]. 高原气象, 2004, 23(6):828-834.
- [41] 杨兴国,张强,杨启国,等. 陇中黄土高原半干旱区总体输送系数的特征[J]. 高原气象, 2010, 29(1):44-50.
- [42] Gregory J McCabe, Michael A. Palecki Julio L. Betancourt. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(12):4136-4141.
- [43] Shanahan TM, Overpeck J T, Anchukaitis K J, et al. Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa[J]. Science, 2009, 324(5925):377-380.
- [44] Borgeankar H P, Sikder A B, Somaru Ram, et al. El Niño and related monsoon drought signals in 523-year-long ring width records of teak (*Tectona grandis* L. F.) trees from south India[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 285:742011.
- [45] Ricardo García-Herrera, Daniel Paredes, Ricardo M Trigo. The Outstanding 2004/05 Drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8:483-498.
- [46] Choi KS, Oh SB, Byun HR, et al. Possible linkage between East Asian summer drought and North Pacific Oscillation[J]. Theor Appl Climatol, 2011, 103:81-93.
- [47] 丁一汇,张锦,徐影,等. 气候系统的演变及其预测[M]/秦大河. 全球变化热门话题丛书. 北京:气象出版社, 2003:75-79.
- [48] 黄荣辉,顾雷,徐予红,等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学, 2005, 29(1):20-36.
- [49] 李栋梁,柳苗,王慧. 高原东部凝结潜热及其对北半球500 hPa高度场和我国汛期降水的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(4):713-718.
- [50] Lv Junmei, Ju Jianhua, Ren Juzhang, et al. The influence of the Madden-Julian Oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010[J]. Science China, 2012, 55(1):98-112.
- [51] 据建华,吕俊梅,谢国清,等. MJO和AO持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象, 2011, 29(4):401-406.
- [52] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3):443-457.
- [53] 宋洁,杨辉,李崇银. 2009/2010年冬季云南严重干旱原因的进一步分析[J]. 大气科学, 2011, 35(6):1009-1019.
- [54] Ana P Barros, Gavin J. Bowden. Toward long-lead operational forecasts of drought: An experimental study in the Murray-Darling River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357:349-367.
- [55] Landscheidt Theodor. Long-range Forecast of U. S. Drought Based on Solar Activity. 2010, <http://www.john-daly.com/solar/>
- [56] Sun G W, Ye Q. A Study on the variation of drought periods occurring in Northwest China and other Africa-Asia continental regions[J]. ACTA Meteorologica Sinica, 1996, 10(4):473-484.
- [57] 汤懋仓. 短期天气预报与短期气候预测发展道路的对比思索[J]. 干旱气象, 2004, 22(1):57-64.
- [58] 汤懋苍. 气候预测探索路上的4+1级台阶[J]. 高原气象, 1999, 18(3):273-279.
- [59] 程玉琴,张少文,徐玉强. 赤峰地区夏季干旱强度预测方法研究[J]. 气象, 2010, 36(1):49-53.
- [60] 李晓娟,曾沁,梁健,等. 华南地区干旱气候预测研究[J]. 气象科技, 2007, 35(1):26-30.
- [61] 王彦集,刘俊明,王鹏新,等. 基于加权马尔可夫模型的标准降水指数干旱预测研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5):198-203.
- [62] 马晓虹,宋理明,谢启玉,等. 青海湖北部地区春季干旱分析及预测[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5):780-784.
- [63] 贺晓霞,吴洪宝,陈小兰. 我国东南夏季干旱指数的ECC预测方法[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1):10-17.
- [64] 吕继强,莫淑红,沈冰. 近半世纪宝鸡市干旱特征及模型预测研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3):333-336.
- [65] 魏凤英. 华北干旱的多时间尺度组合预测模型[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5):583-592.
- [66] 王革丽,杨培才. 时空序列预测分析方法在华北旱涝预测中的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊):132-137.
- [67] 范可,林美静,高煜中. 用年际增量方法预测华北汛期降水[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2008, 38(11):1452-1459.
- [68] 何文平,王柳,万仕全,等. 旱涝预测的演化建模方法[J]. 物理学报, 2012, 61(11):119201.
- [69] Eleanor J Burke, Richard H J Perry, Simon J Brown. An extreme value analysis of UK drought and projections of change in the future[J]. Journal of Hydrology, 2010, 388:131-143.
- [70] Held I M, TL Delworth, J Lu, et al. Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(13):17891-17896.
- [71] 王会军,周广庆,林朝晖. 我国近年来短期气候预测研究的若干进展[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2):220-226.
- [72] 郎咸梅,王会军,姜大勝. 应用九层全球大气格点模式进行跨季度短期气候预测系统性试验[J]. 地球物理学学报, 2004, 47(1):19-24.

- [73] 高学杰,赵宗慈. 利用 OSU/NCC 模式进行我国汛期季度和年度短期气候预测试验[J]. 应用气象学报,2000,11(2):180-188.
- [74] 王启光,封国林,郑志海,等. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量化预测研究[J]. 大气科学,2011,35(2):287-297.
- [75] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations; An extensive revision and an update to 2001[J]. J Climate, 2003,16,206-223.
- [76] Mann M E, Jones P D. Global surface temperatures over the past two millennia[J]. Geophysical Research Letters, 2003,30(15):1820.
- [77] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Technical Summary. In: Solomon S, D Qin, M Manning, et al (eds) Climate change 2007 [M]: The physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,2007.
- [78] 钱正安,吴统文,宋敏红,等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展,2001,16(1):28-38.
- [79] Hulme M. Recent climate change in the world's dryland[J]. Geophy Res Letters, 1996,23(1):61-64.
- [80] Nicholson S E. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries[J]. Clim Res, 2001,17:123-144.
- [81] Dai A G, Trenberth K T, Qian T T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870-2002; relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. J Hydrometeorol, 2004,5:1117-1130.
- [82] 张庆云,卫捷,陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征[J]. 气候与环境研究,2003,8(3):307-318.
- [83] 马柱国,任小波. 1951-2005 年中国区域气候变化与干旱化趋势[J]. 气候变化研究进展,2007,3(4):195-201.
- [84] Wang Jinsong, Fahu Chen, Liya Jin, et al. Characteristics of the dry/wet trend over arid central Asia over the past 100 years[J]. Climate Research, 2010,41(1):51-59.
- [85] NDMC: National Drought Mitigation Center. Predicting drought. 2003. <http://www.drought.unl.edu/>
- [86] Wilhite D A. Drought Monitoring and Early Warning: The pathway to improved drought mitigation and preparedness. WCRP Workshop on Drought Predictability and Prediction in a Changing Climate: Assessing Current Knowledge and Capabilities, User Requirements and Research Priorities. 2-4 March 2011, Barcelona, Spain.
- [87] Rohan Nelson, Mark Howden, Mark Stafford Smith. Using adaptive governance to rethink the way science supports Australian drought policy[J]. Environmental Science & Policy, 2008,11:588-601.
- [88] 彭贵芬,刘盈曦. 2009-2010 年云南特大干旱动态风险分析[J]. 气象科技进展,2012,2(4):50-52.
- [89] 张继权,李宁. 主要气象灾害风险评估与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2007.
- [90] 彭贵芬,张一平,赵宁坤. 基于信息分配理论的云南干旱风险评估[J]. 气象,2009,35(7):79-86.
- [91] Prabhakar S V R K, Rajib Shaw. Climate change adaptation implications for drought risk mitigation: a perspective for India[J]. Climatic Change, 2008,88:113-130.

## Preliminary Analysis on the Demand and Review of Progress in the Field of Meteorological Drought Research

WANG Jinsong<sup>1</sup>, LI Yaohui<sup>1</sup>, WANG Runyuan<sup>1</sup>, FENG Jianying<sup>1</sup>, ZHAO Yanxia<sup>2</sup>

(1. Institute of Arid Meteorology of CMA, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In recent several decade years, under the influence of global change and rapid socioeconomic development, the problem of global environment was distinguished. One of the outstanding problems is drought, which is happening around the world with increasing frequency. Drought has become a global issue. Actually, drought is an inevitable recurrent climatic event and a natural disaster affecting the greatest spatial extent. It also has far-reaching impacts on society and environment. Because of its dual characteristics in the natural and the social fields, drought has drawn widespread attention in the geosciences research community, the government and the society. Water scarcity, food crisis and ecological deterioration (for example the desertification etc.) resulted from drought, especially the heavy drought events, menace directly the long-term food security and social stability. With consideration of the above problems, this paper introduces the national demand for meteorological drought research and the main study progress in the field of arid meteorology. Controversial questions in the field of arid meteorology and key scientific issues faced to the national demand are presented. And a preliminary analysis on the trend of development in the future 5 to 10 years in the field of meteorological drought is carried out.

**Key words:** drought; drought index; drought monitor and early-warning; cause of drought; field of meteorological drought research