

文章编号:0559-9350(2018)01-0115-11

抗旱减灾研究综述及展望

屈艳萍^{1,2}, 吕娟^{1,2}, 苏志诚^{1,2}, 孙洪泉^{1,2}, 马苗苗^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究所, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 近十余年以来全球范围干旱及其灾害频繁发生, 越来越多的学者意识到抗旱减灾研究的重要性, 开展了一系列卓有成效的研究。本文主要从干旱监测评估技术、干旱预报技术、旱灾风险评估技术以及旱灾管理战略等4个方面系统阐述了抗旱减灾研究脉络及进展, 进而探讨未来发展趋势和主要技术难点, 指出干旱监测评估呈现由单指标向多指标综合发展、由单一站点强度分析向强度-时间-范围多个特征变量综合分析发展等趋势, 干旱预报呈现由基于统计学方法的干旱预报向基于气陆耦合的旱情预报技术发展的趋势, 旱灾风险评估呈现由基于数学方法的评估模型向基于物理机制的评估模型发展、由静态风险评估向静态和动态风险评估相结合发展等趋势。

关键词: 抗旱减灾; 干旱监测评估; 干旱预报; 旱灾风险评估; 旱灾管理战略

中图分类号: X43

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170751

1 研究背景

干旱灾害是影响人类生活和社会经济发展的主要自然灾害之一。相对于洪水、飓风等灾害, 干旱灾害的孕发过程要缓慢得多, 通常需要几个月甚至数个季节, 容易被人忽视, 一旦成灾, 其波及范围较大, 持续时间较长, 影响人口较多^[1]。譬如在非洲, 干旱灾害发生频次占所有自然灾害发生频次的比例不足20%, 但其影响人口的比例却高达80%。2006年, 极端干旱袭击了非洲之角的几个国家, 其中, 埃塞俄比亚、索马里、肯尼亚、厄立特里亚和吉布提灾情尤为严重, 旱情高峰期有近1800万人出现粮食短缺问题。持续的旱灾可能会严重制约发展中国家的发展, 数以百万计的人们受到营养不良、饥荒、失业、移民和冲突等; 而在发达国家, 旱灾的影响则更多地体现在经济损失上, 譬如美国1996—2004年因旱年均直接经济损失高达60~80亿美元, 2002年甚至超过200亿美元。

特殊的地理环境和气候特征决定了我国是一个易发干旱的国家, 且在全球气候变化和高强度人类活动的共同影响下, 干旱灾害呈现出频发、重发的趋势^[2]。据《中国水旱灾害公报》统计, 1990—2016年我国因旱年均粮食损失高达252亿kg, 因旱年均饮水困难人口超过2700万。特别是2000年, 我国发生了1949年以来最严重的旱灾, 旱灾波及全国20余省(区、市)。此次旱灾与以往旱灾的不同之处是除了传统的农业受旱, 城市受旱也十分严重, 全国有18个省(区、市)的620座城镇因旱缺水; 另外, 生态干旱问题也十分突出, 一些河道和湖泊因旱断流或干涸。为此, 2003年国家防汛抗旱总指挥部提出了防汛抗旱“两个转变”的战略指导思想, 即由控制洪水向洪水管理转变, 由单一抗旱向全面抗旱转变^[3]。2005年, 在国家防汛抗旱总指挥部办公室的建议下, 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究所(水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心挂靠单位)于2005年4月设立了抗旱减灾研究部门, 开始专门研究抗旱减灾相关技术问题。抗旱减灾是通过采取工程措施或非工程措

收稿日期: 2017-07-31; 网络出版日期: 2018-01-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180115.1055.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502404); 中国水利水电科学研究院团队建设及人才培养类项目(JZ0145B752017, JZ0145B582017); 国家社科基金重点项目(14AZD128)

作者简介: 屈艳萍(1981-), 女, 湖南株洲人, 高级工程师, 主要从事干旱灾害及抗旱减灾研究。E-mail: quyp@iwhr.com

通讯作者: 吕娟(1964-), 女, 吉林农安人, 教授级高级工程师, 主要从事抗旱减灾、水利史等研究。E-mail: lujuan@iwhr.com

施, 预防和减轻干旱对生活、生产和生态造成不利影响的各种活动。其中, 工程措施主要包括蓄、引、提、调水工程等; 非工程措施是通过政策、法规、经济、科技等工程以外的手段对干旱及其灾害进行监测评估、预测预报、风险评估管理等的过程。

近十年来全球范围干旱及其灾害频繁发生, 越来越多的学者意识到干旱及灾害研究的重要性, 从不同角度开展了卓有成效的研究, 相关研究呈现百花齐放的局面。其中, 干旱评估技术、干旱预报技术、旱灾风险评估技术以及旱灾管理战略等一直是各国学者重点关注的方面。为此, 本文将重点从上述4个方面总结阐述抗旱减灾科学研究脉络及进展, 进而探讨未来发展趋势和主要技术难点。

2 抗旱减灾研究进展

2.1 干旱评估技术

2.1.1 干旱评估方法 为了能够实时、动态地掌握干旱发生发展过程, 以期采取及时、有效的抗旱减灾措施提供决策依据, 国内外研究者一直致力于如何更客观、准确、定量地监测评估干旱。从20世纪初以来, 利用较容易获得的降水、气温、蒸发、径流、土壤水分、遥感等观测要素, 研究者们构建了一系列的干旱评估指标, 大致可分为3个阶段:

(1)1960年代以前: 研究者从研究诱发干旱的最根本原因出发, 致力于构建以降水或蒸发为主要因素的干旱指标, 试图从气象学、气候学的角度理解或刻画干旱这一自然现象。代表性的干旱指标有3类: ①以降水为主要因素, 如Munger指标(1916)^[4]、Kincer指标(1919)^[5]、Blumenstock指标(1942)^[6]等; ②以蒸发为主要因素, 如湿度充足指数(Moisture Adequacy Index, MAI, 1957)^[7]等; ③以降水和蒸发为主要因素, 如干燥度指数(1958)^[8]等。这一阶段的评估指标具有计算方法简单、资料获取容易等优点, 但是存在普适性较差的问题, 如Kincer指标和Blumenstock指标都是用绝对降水量来度量干旱, 而由于不同地区降水条件往往相差甚远, 根据某一地区特点建立的指标的适用范围明显受限。

(2)1960年代—90年代: 随着对于干旱形成的复杂性及其影响广泛性的认识进一步深入, 研究者试图从气象、水文、农业等不同学科视角来研究并刻画干旱, 并开始尝试从多因素综合角度考虑干旱问题。代表性的干旱指标有4类: ①以降水、气温等气象要素为主要因素, 如降水异常指数(Rainfall Anomaly index, RAI, 1965)^[9]、降水分位数(Decile, 1967)^[10]、Bhalme和Mooly干旱指数(BMDI, 1980)^[11]等; ②以径流等水文要素为主要因素, 如水文干旱强度指标(1980)^[12]等; ③以土壤水分供需为主要因素, 如土壤相对湿度、土壤水异常指数(1988)^[13]等; ④综合考虑降水、气温、蒸散发、径流或土壤水分等多种因素, 如Palmer干旱指数(PDSI, 1965)^[14]、Palmer水文干旱指数(PHDI, 1965)、作物水分指数(CMI, 1968)^[15]、地表水供给指数(SWSI, 1982)^[16]等。这一阶段的评估指标通过刻画水循环过程的某一个或者几个环节的缺水现象来评估干旱, 具有一定的物理机制意义, 如RAI、Decile等指标反映了大气过程水分亏缺, 土壤相对湿度、土壤水异常指数等反映了土壤过程水分亏缺, 水文干旱强度指标等反映了地表过程水分亏缺, PDSI、PHDI等指标则反映了大气、土壤或地表等多个过程水分亏缺, 同时指标的地区适应性明显增强。与此同时, 这一阶段的评估指标也存在一些问题, 如Decile指标计算简单, 但需要长系列且一致性较好的降水序列数据, 不太适应于降水季节性特征明显的地区; PDSI、PHDI在时间和空间上具有可比性, 但要求的数据量相对较大、计算较为复杂; SWSI适用于以山地积雪为主要水源的山区水文干旱监测, 但计算中各因素的权重系数时空变异性较大, 需根据不同流域不同时段来确定。

(3)1990年代至今: 借助于计算机等计算手段、水文模型等模型技术手段以及卫星遥感等监测手段的快速发展, 研究者更多地努力提高干旱指标的标准化、综合化以及精细化水平。代表性的干旱指标有4类: ①标准化指数, 如标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI, 1993)^[17]、标准化径流指数(Standard Runoff Index, SRI, 2008)^[18]等; ②综合化指数, 如综合干旱指数(CI, 1999)^[19]、区域农业旱情指数(2008)^[20]、综合气象干旱指数(DI, 2009)^[21]等; ③以分布式水文模型为基础的干旱指标, 如GBHM-PDSI(2008)^[22]等; ④基于遥感监测的干旱指标, 如归一化植被指数(NDVI)^[23]、

条件植被指数(VCI)^[24]、条件温度指数(TCI)^[25]、条件植被温度指数(VTCI)^[26]、植被供水指数(VSW)^[27]、垂直干旱指数(PDI)^[28]等。这一阶段的评估指标经标准化、综合化等处理之后,多为无量纲数,具有较强的空间可移植性,如SPI、NDVI等指数在全球均得到广泛应用,且具有较灵活的时间计算尺度,如SPI、SRI、CI等指数可以量化不同时间尺度的干旱程度。

上述各类干旱评估指标的研究,实现了对干旱强度的度量。但随着干旱研究的深入,认识到干旱过程具有缺水程度、影响范围和持续时间等多维特征,需要用干旱强度 S 、干旱面积 A 和干旱历时 D 等多维特征变量来度量,进而实现对干旱频率或重现期的估算^[29-31]。1960年代,Yevjevich提出了游程分析理论并被运用于干旱评估中^[32],可识别一次干旱事件的起止时间、强度等,这也是目前干旱过程识别的主要方法。Shiau以SPI指标作为干旱评估指标,基于游程理论识别了干旱强度和干旱历时,并采用6种二维Archimedean Copula函数分析了干旱频率^[33]。Song和Singh采用5种Meta-elliptical copula函数构建了干旱强度、干旱历时、干旱间隔时间两两之间的联合概率分布^[34]。周玉良、金菊良等以地下水埋深为水文干旱指标,利用GH Copula函数构建了干旱历时与干旱烈度间的联合概率分布,并计算了相应的干旱重现期^[35]。Andreadis等将图像识别方法引入到干旱面积识别中,并进一步提出了SAD(Severity-Area-Duration)曲线来刻画干旱的时空变化规律^[36]。SAD方法也被应用到我国的气象干旱和土壤干旱的时空变化评估研究中^[37-38]。许凯、杨大文等提出了基于干旱历时、干旱面积、干旱烈度、干旱强度和干旱中心位置等五个特征变量的干旱事件度量方法,实现了对干旱事件时空变化过程的三维完整刻画^[39]。目前,基于干旱多维特征联合概率分布的干旱频率分析方法正受到越来越多地关注,但如何选取截断水平(阈值)、如何选择合适的干旱指标序列时间尺度以及如何进行小干旱事件的合并等问题仍待进一步研究。上述有关干旱频率的研究主要针对的是一致性干旱序列,但在全球变化和人类活动的双重影响下,干旱规律的明显变化使得干旱序列成为非平稳序列,一致性要求不能得到满足。近年来,谢平等开始对不同环境条件下形成的非一致性干旱序列进行频率计算开展研究,提出基于WHMLUCC模型的非一致性干旱频率分析方法^[40-41]。

2.1.2 干旱评估技术应用 在整个抗旱减灾研究中,干旱评估方法研究相对成熟,研究成果最多,应用也较为广泛。为追踪和展示全美国干旱的程度、空间范围以及其影响,美国于1999年开发了国家级干旱监测评估业务产品——干旱监测图(Drought Monitor)^[42],建立了“国家集成干旱信息系统”(National Integrated Drought Information System, NIDIS)。该系统利用气象、水文、土壤墒情、遥感等多源信息,每周生成干旱监测一张图,并向公众发布。此后,为了监测整个北美大陆的干旱及灾害情况,美国、加拿大和墨西哥于2003年联合启动了“北美干旱监测”项目。随着欧洲地区干旱灾害影响范围不断的区域化和严重化,为了在整个欧洲层面提供一致、及时的干旱信息,用于欧洲的干旱预测、评估和监测,欧盟决定在欧盟联合研究中心(Joint Research Centre of the European Commission, EU/JRC)实施的“DESERT”行动的基础上,进行“欧洲干旱观察”(European Drought Observatory, EDO)系统的开发^[43]。近20多年来,我国也在积极推动干旱监测评估技术应用。自1995年起,中国气象局国家气候中心研发的“全国旱涝气候监测、预警系统”,利用标准化降水、相对蒸散量和前期降水量等为基础的综合气象干旱指数CI对全国范围内的气象干旱进行逐日监测,并结合数值预报产品对未来一周气象干旱的演变发布预警信息。国家防汛抗旱总指挥部办公室主持的国家防汛抗旱指挥系统工程,一期工程已经完成,二期工程尚在建设之中,目前已实现基于实时雨情、水情数据和抗旱统计上报数据的旱情监视,同时建立了水利部旱情遥感监测系统,提供不同尺度、不同频次、不同类型的旱情遥感监测产品。

总的来说,在干旱评估技术应用方面,美国走在国际前列,其理念和经验值得各国借鉴。(1)整合了多源信息,有效地提高了干旱监测评估结果的可靠性。该系统综合了气象、水文、土壤墒情、遥感等多源信息,而我国目前已建的各类干旱监测评估系统平台大多站在行业或部门的角度,往往依托单一或少数数据源,采用单一模型为主的干旱监测技术,缺乏从气象、水文、农业、土壤、遥感和社会经济等多维角度考虑综合构建。(2)研发模式上实现了部门间的深度合作和信息资源共享。该系统由美国国家干旱减灾中心(NDMC)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、农业部等多家与干

旱管理相关的单位共同研发,确保了评估结果的权威性,同时打破了信息壁垒、避免了重复建设等问题。(3)系统建设的目的及用途明确,增强了系统的活力和生命力。该系统主要用途包括以下3个方面:①作为旱情发生及评判主要依据。2012年以后美国农业部规定根据干旱监测图结果,如果连续八周干旱,自动发布干旱预警,启动相关应急预案。②指导农业和畜牧业等部门制定补贴方案和减灾对策。超过17亿美元的补贴根据干旱监测图的结果发放。③为自来水供水、种业公司育种、农场主决策、期货市场交易、农产品价格、农机销售等提供决策服务。(4)建立了较为完善的信息反馈和校核机制。该系统产品在制作过程中加入了全国各地的专家志愿者的反馈意见,这些专家利用他们对区域和地方干旱状况及干旱影响的专业知识为监测产品提供了真实的干旱信息,用于校正干旱监测指标的结果。

2.2 干旱预报技术

2.2.1 干旱预报方法 由于干旱及其灾害具有蠕变性,其发生、发展和消亡不同阶段之间没有明显的界限,人们常常很难判断干旱是何时开始的,又是何时结束的,难以对干旱提前预测、预报、预警并及时采取有效的应对措施。因此,准确和及时的干旱预报是广大科研人员面临的严峻挑战。目前,干旱预报方法可以分为两大类:

(1)基于统计学方法的干旱预报。即基于数理概率统计方法,分析干旱事件和物理因子之间的统计规律,进而构建数学模型对干旱发展趋势的模拟和预测。1960年代以后,随着人类对自然界规律认识的不断深入和现代科学技术的发展,主成分分析法、层次分析法、回归分析法、时间序列法、马尔科夫过程、灰色系统和人工神经网络等等一些新的智能算法逐渐涌现,并被应用于干旱的预测和预报中。Barros等通过主成分分析、小波分析等方法识别并选择预报因子,建立预报因子与降水之间的概念模型,对澳大利亚东南部干旱进行长期预测^[44]。Paulo等采用葡萄牙南部的7个气象站68年的SPI数据,通过回归分析法来进行干旱的监测和早期预报^[45]。Durdu等应用差分自回归移动平均模型提前两个月对土耳其西部的曼德列斯河谷流域干旱进行了预测^[46]。Lohani等基于Palmer干旱指数的监测结果,利用非线性马尔可夫链方法对干旱进行评估和早期预警^[47],孙才志、张丹等采用加权马尔科夫模型对降水丰枯状况进行了预测^[48-49]。Mishra等采用前馈神经网络对干旱进行预报^[50]。基于统计学方法的干旱预报方法的本质是寻找预报因子和预报目标变量之间的统计相关关系,不具备物理机制,不同因子之间的非线性关系不清楚,预报精度随着资料年限的长短而产生较大差异等,干旱预报可靠性和稳定性较低。

(2)基于气-陆耦合的干旱预报。近年来,随着大气环流模式、数值天气预报系统、水文/陆面模型的不完善和发展,基于气-陆耦合的干旱预报技术应运而生。基于气-陆耦合的干旱预报是指以大气环流模式和数值天气预报作为输入,驱动水文/陆面模型,实现对考虑下垫面条件的干旱预报。自1995年美国Bae等人利用气象-水文耦合模型进行水文预报以来,国际上许多科研机构开展了基于气-陆耦合的旱情预报。Anderson等采用中尺度数值天气预报模式MM5作为降尺度工具,与水文模式HEC-HMS的耦合,用于水库入流预报^[51]。Wood等在美国东部地区尝试利用美国环境预报中心的全球光谱模型(NCEP GSM)驱动水文模型,以达到改进土壤湿度、径流的水文预报能力^[52],并研究了该模型对美国西部地区季节水文预报的预报能力的潜在贡献,表明水文预报技能受制于季节和区域的影响^[53]。Luo和Wood等验证了动力气候预报模型用于水文预报的实用性,并开发了干旱监测与预报系统(Drought Monitoring and Prediction System, DMAPS)和季节水文预报系统^[54-55]。Wang等模拟了从1950—2006年在中国区域的土壤湿度,并进行了干旱评价^[56]。张丹以辽宁省朝阳地区为研究对象,研究了基于GFS降水预报信息的土壤湿度预报^[57]。随着气候模型输出和水文模型输入之间分辨率差异的减小,可以直接将气候模型预报驱动水文模型获得土壤湿度等预报。总的来说,基于气-陆耦合的干旱预报方法目前尚属于探索性研究阶段,其物理意义明确,但限于当前气象和陆面水文等产品质量和大气、陆面模式结构,准确度、预见期等均有待提高。

2.2.2 干旱预报技术应用 随着近十年来对干旱预测预报研究的逐步深入,国内外建立起了相关的干旱预报系统,以期提供对未来干旱时空变化的预报信息。美国构建了以PDSI和CMI作为预报变量

的干旱预报系统(U.S. Seasonal Drought Outlook), 提供天到季尺度干旱情势展望, 能够对当前旱情是否加剧、持续、缓解、消退等可能性做出预测预报^[58]。美国国家气候预报中心(CPC)还建立了土壤水分预测系统(Soil Moisture Outlook), 利用土壤含水量进行干旱预测, 其干旱预测产品分为两类: (1) 基于GFS(the Global Forecast System)模式的未来一周和两周土壤水分预测预报; (2) 基于CAS(the Constructed Analog on Soil Moisture)模式的未来一个月和一个季度土壤水分预测^[59]。Sheffield等建立了非洲和南美洲干旱预报系统, 该系统结合再分析数据、卫星数据、以及气候模型的模拟值, 通过数据融合、校正、降尺度等方法, 驱动水文/陆面模型, 实现了对气象、水文和农业干旱的预报^[60]。在我国, 中国气象局国家气候中心联合科研院所、高校、省级业务单位, 开展了季节气候预测业务系统建设, 其中就包含了干旱预测系统, 能够在全国范围和东北、华北等区域进行季节尺度干旱日数距平预测。水利部水文局联合河海大学采用气象-水文耦合的方式, 基于遥感、水文、气象等信息, 结合统计方法和动力方法, 初步构建了可业务运行的干旱预测系统, 实现了多时间尺度干旱预测预报^[61]。总的来说, 在干旱预报技术应用方面, 也是美国走在国际前列。与美国干旱监测系统类似, 美国干旱预报系统在研发模式上也是建立在部门间深度合作和信息资源共享的基础之上。该系统由国家海洋与大气管理局(NOAA)、国家气象局(NWS)、国家环境预报中心(NCEP)等部门共同构建, 我国气象部门和水文部门也各自研发了相关系统, 但还没有形成一个数据共享、技术共享、结果权威的共同平台。

2.3 旱灾风险评估技术 作为旱灾风险管理的核心内容和关键环节, 旱灾风险评估逐渐成为旱灾研究的热点问题^[62]。联合国减灾战略组织、美国国家干旱中心等组织和机构对旱灾风险较早开展研究。Hayes等^[63]提出了一个简洁灵活的干旱风险分析框架。联合国减灾战略组织在《与干旱灾害风险共存——降低社会脆弱性的新思路》^[64]以及《减轻干旱灾害风险的框架与实践——旨在促进<兵库行动纲领>的实施》等报告中较早系统阐述了旱灾风险的概念、风险评估程序与内容等。旱灾风险是对干旱事件发生的可能性及可能产生的不利影响的综合度量, 具有不确定性、传递性、可调控性等特征。按照风险发生的形态, 旱灾风险可分为静态旱灾风险和动态旱灾风险。相应地, 旱灾风险评估可分为静态旱灾风险评估和动态旱灾风险评估。

(1) 静态旱灾风险评估, 指基于历史资料, 通过对某一地区干旱成灾机理及规律等进行分析, 进而估计这一地区干旱发生的可能性及其可能产生的不利影响。静态旱灾风险, 反映的是某一地区某一时期的风险特征, 风险相对稳定, 主要用于为区域干旱管理规划与政策制定提供依据、为旱灾保险等提供技术支持等。目前, 静态旱灾风险评估方法主要有以下3类:

① 基于随机理论的旱灾风险评估方法。即利用数理统计方法, 对以往的灾害数据进行分析、提炼, 找出灾害发展演化的规律, 计算得到风险概率, 以达到预测评估未来灾害风险的目的。根据灾害数据类型的不同, 该方法又可分为基于气象指标的概率统计方法和基于旱灾损失指标的概率统计方法。如, Hao等开展了基于信息扩散理论的气象要素风险分析^[65], 许凯等运用旱灾损失的概率分布曲线法、旱灾损失与干旱概率的关系曲线法评估农业旱灾风险^[66]。这类方法计算原理简单, 但存在基本假设不尽合理的问题: 基于气象指标的概率统计方法假设气象干旱风险就是旱灾风险, 而实际上干旱与旱灾是两个既相互联系又彼此区别的概念; 基于旱灾损失指标的概率统计方法假设旱灾损失数据是随机变量, 而实际上旱灾损失往往是人类主观干预的结果, 不符合随机特性。此外, 该方法还存在长系列灾害损失数据难以获得、无法反映造成旱灾风险的不同因素影响程度等问题。

② 基于区域灾害系统理论的旱灾风险评估方法。即从致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和灾损敏感性以及抗灾能力等方面着手建立评价指标体系, 采用专家打分、层次分析等模糊数学方法计算得到灾害风险, 进而实现旱灾风险的等级评价。如, 张继权等把干旱危险性、暴露性、脆弱性、防灾减灾能力综合成旱灾风险指数^[67]; 屈艳萍、吕娟等首次针对全国开展基于区域灾害系统论的农业旱灾风险评估研究, 明确了旱灾危险性、暴露性及脆弱性分布, 并提出了降低风险策略^[68]。这类方法建立在灾害系统理论之上, 能够反映造成旱灾风险的不同因素的影响程度大小, 利于成因分析, 但存在指标遴选、权重确定等方面易受人为主观因素影响的问题。

③基于物理形成机制的旱灾风险评估方法。如，贾慧聪等利用EPIC模型模拟出典型玉米品种的自然脆弱性曲线，对黄淮海夏播玉米区玉米旱灾风险的时空分布进行了定量评价^[69]；屈艳萍等剖析了旱灾风险形成机制，首次提出了通过建立干旱频率-潜在损失-抗旱能力之间的定量关系实现对旱灾风险进行定量评估^[70]。这类方法建立在旱灾风险形成的物理过程之上，能够反映风险构成要素之间的内在联系和演化过程，但存在数据时空分辨率要求过高、可操作性较差的问题。

(2)动态旱灾风险评估，是指基于实时旱情信息及未来一段时间可能的发展趋势分析等，提前预估某一地区未来一段时间干旱的可能影响。动态旱灾风险，反映的是某一地区动态变化的、短期的风险特征，主要用于动态预估灾情发展、为动态决策提供量化依据等。王飞等提出了基于多智能体的自然灾害动态风险评估的建模思路，通过模拟在多种风险情景下经济、人口、工程等承灾体在不同灾种下的不同脆弱性和相互制约关系，动态地评估区域灾害风险^[71]。孙洪泉、苏志诚等运用情景分析技术，构建基于作物生长模型的农业旱灾风险动态评估模型，实现未来一段时间内不同情景模式下的潜在旱灾损失预评估^[72]。该方法能够动态预估旱灾风险并及时提供决策依据，但由于干旱预测预报技术尚处于起步阶段，难以提供准确的预测预报结果输入，进而导致风险结果容易受情景设置的影响。

2.4 旱灾管理战略 长期以来，在旱灾管理的问题上，世界各国基本上都处于被动应对的状态，换言之，即采取的是危机管理方式。旱灾危机管理是指当干旱灾害临近时甚至发生后，才开始做出反应，着手制定临时应急措施和对策，以期减轻干旱的影响。但是，由于旱灾危机管理的根本定位就是被动应对眼前的、局部的问题，而较少从长远和全局的角度看问题，采取的措施也往往是临时性的、应急性的，重抗轻防，重工程轻非工程，最终的抗旱效果往往受到限制^[73]。随着社会经济的快速发展以及人口的增长，干旱灾害在全球造成的影响越来越大，灾害损失急剧增加。面对严峻的旱灾形势，以美国、澳大利亚为代表的发达国家于20世纪八九十年代提出了旱灾风险管理理念，我国也于2003年提出了防汛抗旱“两个转变”的新思路，在继续加强旱灾危机管理的同时，积极推进旱灾风险管理。Wilhite等认为预防性的风险管理方法对干旱管理非常必要，建议要重视备灾和减灾行动的规划，阐述了在美国等广泛应用的10步干旱减灾规划法^[74]。2007年，联合国国际减灾战略秘书处和美国国家干旱减灾中心联合发布《减轻干旱灾害风险框架与实践要旨在促进〈兵库行动纲领〉的实施》，浓缩了整个国际社会减轻干旱灾害风险的先进理念和科学实践，提出了包括减轻干旱灾害风险的政策及管理，干旱灾害风险识别、监测和预警，防灾减灾意识和教育，减少潜在的干旱灾害风险因素，以及减灾和备灾等5个基本要素的减轻干旱灾害风险框架。吕娟分析了近年来我国旱情旱灾演变特点与趋势和干旱灾害类型的时空分布特征，探讨了我国干旱灾害管理现状及思路的转变，分析了未来我国干旱灾害管理新的发展方向^[75]。屈艳萍、吕娟等将整个中国视为一个大的区域，在风险分析的基础上，构建了包括干旱灾害风险评估战略、干旱灾害风险控制战略、干旱灾害风险处置战略、干旱巨灾风险回避战略和干旱灾害风险适应战略的战略框架^[76]。总体来说，我国正在积极推行旱灾风险管理进程，颁布实施了《中华人民共和国抗旱条例》，建立了旱情统计和报告制度、旱情会商制度、旱情发布制度、抗旱总结制度、水量统一调度制度等抗旱管理制度体系，初步形成了抗旱预案体系、抗旱规划体系，抗旱技术标准体系，走到国际社会的前列。

3 当前研究趋势与主要技术难点

综合以上研究进展情况，分别就干旱评估技术研究、干旱预报技术研究、旱灾风险评估技术以及旱灾管理战略四个方面的当前研究趋势和主要技术难点进行系统梳理。

3.1 当前研究趋势

(1)在干旱评估技术研究方面，主要呈现以下趋势：①在评估因素方面，表现为由单因素向多因素、由单指标向多指标综合发展；②在评估内容方面，表现为由单一站点强度分析向强度、时间、范围多个特征变量综合分析发展；③在评估尺度方面，时间上表现为由年尺度向多年、年、季、月等不同时间尺度发展，空间上表现为由站点评估向流域、区域、面、点、像元等不同空间尺度发

展；④在监测评估手段方面，表现为由地面站点监测为主向天-空-地一体化监测发展。

(2)在干旱预报技术研究方面，主要呈现以下趋势：①在预报手段方面，表现为由利用数学统计方法建立干旱预报模型向基于物理机制的干旱预报模型发展；②在预报要素方面，表现为由纯粹的降水、气温等气象干旱要素预报向考虑下垫面条件的土壤水分、河川径流等反映实际旱情的预报发展；③在预报模式方面，表现为由单一模型预报向多模型集合预报发展。

(3)在旱灾风险评估方面，国外更多地注重旱灾风险内涵、概念评估模型、评估流程等宏观性、框架性研究，国内学者更多地关注旱灾风险评估技术方法的研究。现有旱灾风险评估技术呈现以下趋势：①在风险分析方法方面，表现由定性评估向定性评估和定量评估相结合发展；②在风险评估模型方面，表现为由基于数学方法的评估模型向基于物理机制的评估模型发展；③在风险评估性质方面，表现为由静态风险评估向静态和动态风险评估相结合发展。

(4)在旱灾管理战略方面，世界上不同国家的国情不同，社会经济发展水平不同，发生于旱灾害的情势也不同，干旱灾害管理手段、内容等也不尽相同，但总的趋势都是由被动的危机管理模式向主动的风险管理模式转变。在这一转变过程中，也呈现出一些共同的特点和趋向，主要表现为更加注重干旱灾害管理法律、政策制定，注重干旱灾害监测、预警技术，注重干旱灾害防御规划和准备，注重公众防灾减灾意识的提高，关注可持续发展，关注全球气候变化等。

3.2 主要技术难点

(1)在干旱监测评估方面，最终目的是要从科学层面回答实际抗旱减灾管理中哪里旱、有多旱、旱多久等问题，而目前的干旱评估技术研究尚不能很好地回答以上问题，主要难点表现在以下几个方面：①干旱多源信息同化融合问题。干旱信息存在信息来源不同(气象、水文、农业、卫星遥感、低空遥感等)、获取方式不同(实测、模拟、反演、统计等)、时间尺度不同(年、季、月、旬、日、时等)、空间尺度不同(流域、区域、面、点、像元等)等问题，如何通过多源信息同化融合技术生成时空连续的旱情信息场也是难点问题之一。②如何从强度-时间-空间三维视角识别度量干旱还有待于进一步研究。不同场次干旱之间存在区别的原因，是干旱强度、时间、范围三维特征变量不同组合的结果。而目前的干旱事件识别和度量，或者固定某一区域分析干旱随时间的变化，或者针对某一时段分析干旱在空间上的变化，这些将三维干旱事件在低维度上简化处理的方法均不能全面地表征干旱。发展基于强度-时间-空间三维融合的干旱表征模式是干旱监测评估的难点问题之一。③干旱多指标综合问题。由于学科分类等问题，现有干旱监测评估研究常常将包括大气过程、土壤过程、地表过程、地下水过程的完整自然水循环割裂开来考虑，如大气过程是传统气象气候学的关注焦点，土壤过程是传统农学的关注焦点，地表过程是传统水文学的关注焦点，地下过程是传统水文地质学的关注焦点。而实际上，作为自然水循环过程的极值事件，需要从水循环全过程来研究干旱，因此，如何从气象干旱、水文干旱、农业干旱的演进机理入手，进而提出基于指标-影响关联分析的干旱多指标综合技术是难点问题之一。

(2)在干旱预报技术研究方面，随着大气环流模型、数值天气预报模型、水文/陆面模型不断发展，从水文循环的全过程出发，考虑气象要素对水文要素的物理驱动作用，研发基于气陆耦合模拟的旱情集合预报模型，实现旱情的实时滚动预报，将是未来研究之趋向，但受限于当前气象和陆面水文等产品质量和大气、陆面模式结构，基于气陆耦合模拟的旱情集合预报尚属于探索性研究，主要难点表现在以下几个方面：①作为基于气陆耦合模拟的旱情集合预报根本基础之一的数值天气预报的准确度和预见期都有待于提高。目前大气模式的降水预报结果具有较大的不确定性，同一模式不同预见期的降水预报，以及不同模式对同一降水过程的预报都存在较大的差异，使旱情预测的结果产生较大的不确定性。如何基于多模式多类型预报信息，通过统计集成、误差修正等方法，减少旱情预测的不确定性，提高预测精度，是气陆耦合旱情预报的难点问题之一。②作为基于气陆耦合模拟的旱情集合预报根本基础之一的水文/陆面模型对干旱和人类活动影响考虑较少，构建面向干旱的可适用于高强度人类活动的分布式水文模型也是气陆耦合旱情预报的难点问题之一。

(3)在旱灾风险评估方面，近十年来，相关科研工作者在旱灾风险评估技术方面开展了大量有益

的尝试,但总体来说还处于初级阶段,距离标准化、系统化、商品化的旱灾风险评估产品的目标还有很长一段路程,主要难点表现在以下几个方面:①旱灾风险因素相互作用机制和影响机理的研究还比较欠缺。旱灾作为主要自然灾害之一,现有的旱灾风险评估方法大多基于灾害风险评估方法衍生而来,缺乏对旱灾自身特性以及旱灾风险因素相互作用机制和影响机理的研究,进而制约旱灾风险评估的准确性、解析性和有效性。②对于不同承灾体因旱灾损敏感性研究也较为欠缺。灾损敏感性是指暴露在孕灾环境中的不同承灾体对干旱影响的损失响应。要准确评估旱灾风险,首先需要对各类承灾体的干旱缺水响应进行定量表征。由于干旱具有广泛性,往往影响的行业和领域较多,涉及的承灾体类型较多,目前有关各种农作物的因旱灾损敏感性研究相对较多,但对于门类繁多的工业、服务业来说,各行业干旱缺水损失千差万别,需要从量化研究不同行业灾损敏感性着手,进而构建工业、服务业灾损评估概化模型。③目前旱灾风险评估研究尺度较为宏观,微观尺度的研究需要加强,如基于农业生产单元、农户或作物的旱灾风险评估,同时需加强研究不同时空尺度下风险评估结果的转换关系。

(4)在旱灾管理战略方面,要切实推动旱灾风险管理,还需要加强以下几方面的研究:①加强对不同区域旱灾风险承载能力的定量研究。现有各类研究对不同地区的旱灾风险开展了评估研究工作,但是,尚未见旱灾风险承载能力的研究,也就无法确定合适的旱灾风险可接受水平来平衡调控成本与损失风险,进而影响旱灾风险管理措施的制定和实施。②加强对干旱巨灾风险的研究。历史上我国曾发生过多次大范围、长历时的极端干旱事件,不仅造成农业减产,还导致经济危机、人口锐减,甚至朝代更迭。如著名的明末崇祯大旱和清光绪初年大旱,成为王朝衰败和社会动乱的重要因素。新中国成立67年来,我国虽然经历了几次大的干旱,但是其干旱的规模和影响程度都不及历史极端大旱严重。目前,我国有关的法规、规划、标准、制度等大部分都是按照常规情况来考虑的,几乎没有考虑大范围、长历时的极端干旱事件发生的问题。因此,亟需以史为鉴,开展历史极端干旱事件重建、重演及巨灾风险应对策略研究,为极端干旱状况下的国家水安全保障体系建设提供支撑。

4 结语

抗旱减灾是一门交叉学科,涉及水利、气象、农业、地理、社会等,需要综合运用自然科学和社会经济科学中多学科的相关成果。目前,我国抗旱减灾科学水平还较低,技术手段也比较落后,譬如,干旱长期和超长期预测预报尚处于探索和研究阶段,干旱监测预警、旱灾影响评估以及风险分析方法和定量分析技术等刚刚起步,旱情旱灾标准体系还够不完善等,在很大程度上制约了抗旱减灾工作的科学、高效和主动开展。为了促进抗旱减灾领域的学科建设,即要形成以旱灾学、防旱学和抗旱减灾技术为主体的学科体系,为建立与经济社会发展需求相适应的抗旱减灾体系提供科学、全面的基础理论、应用科学和实用技术。

参 考 文 献:

- [1] United Nations Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction . Disaster Risk Reduction Framework and Practices: Contributing to the Hyogo Framework for Action[R] . Geneva: UNISDR, 2009 .
- [2] 水利部,国家防汛抗旱总指挥部办公室 . 全国抗旱规划[R] . 2011 .
- [3] 程晓陶 . 加强水旱灾害管理的战略需求与治水方略的探讨[J] . 水利学报, 2008, 39(10): 1197-1203 .
- [4] MUNGER T T . Graphic method of representing and comparing drought intensities[J] . Monthly Weather Review, 1916, 44: 642-643 .
- [5] KINCER J B . The seasonal distribution of precipitation and its frequency and intensity in the United States[J] . Monthly Weather Review, 1919, 47: 624-631 .
- [6] BLUMENSTOCK G J . Drought in the United States analyzed by means of the theory of probability[R] . USDA Tech . Bull . 819, 1942 .

- [7] JADHAV M G, AHER H V, JADHAV A S, et al . Crop Planning Based on Moisture Adequacy Index (MAI) of Different Talukas of Aurangabad District of Maharashtra[J] . Indian Journal of Dryland Agricultural Research & Development, 2015, 30(1): 101 .
- [8] KUMAR G, SRINIVASAN D . Climatic Water Balance Study and Drought assessment in Kallar Watershed, Tamil Nadu, India[J] . International Journal of Earth Sciences & Engineering, 2016, 9(3): 958–962 .
- [9] HÄNSEL S, SCHUCKNECHT A, MATSCHULLAT J . The Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI)—is this an alternative to the Standardised Precipitation Index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics? [J] . Theoretical & Applied Climatology, 2016, 123(3/4): 827–844 .
- [10] MOHAMMADI B, MEHDIPANAH H . Evaluation of drought and rainfall deciles standard in East Azerbaijan province[C]//International Conference on New Ideas in Agriculture, Ardabil, Iran . 2015 .
- [11] CORNEL N, MAN T E, ARMAŞ A, et al . Characterization of agricultural droughts using standardized precipitation index (SPI) and bhalme–mooley drought index (BDMI)[J] . Environmental Engineering & Management Journal, 2015, 14(6): 1441–1454 .
- [12] LOON A F V, LAAHA G . Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J] . Journal of Hydrology, 2015, 526: 3–14 .
- [13] ZHANG B, ZHAO X, JIN J, et al . Development and evaluation of a physically based multiscalar drought index: The Standardized Moisture Anomaly Index [J] . Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 120(11): 575–588 .
- [14] PALMER W C . Meteorologic drought [M] . Washington: U.S. Department of Commerce, 1965 .
- [15] RAMÍREZ A J F, COELHO R D, PIZANI M A M, et al . Determination of crop water stress index for tomato cherry (*Lycopersicon solanum* var. *cerasiforme*.) using a thermal camera[C]//III INOVAGRI International Meeting, 2015 .
- [16] JANG S H, LEE J K, JI H O, et al . The Probabilistic Drought Forecast Based on the Ensemble Technique Using the Korean Surface Water Supply Index[J] . Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017: 1–51 .
- [17] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLIEST J . The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology . Boston: American Meteorological Society, 1993: 179–182 .
- [18] SHUKLA S, WOOD A W . Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J] . Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): 226–236 .
- [19] SONG X, LI L, FU G, et al . Spatial–temporal variations of spring drought based on spring–composite index values for the Songnen Plain, Northeast China[J] . Theoretical & Applied Climatology, 2014, 116(3/4): 371–384 .
- [20] 区域旱情等级: GB/T 32135–2015[S] . 北京: 中国标准出版社, 2015 .
- [21] 闫桂霞, 陆桂华 . 基于PDSI和SPI的综合气象干旱指数研究[J] . 水利水电技术, 2009, 40(4): 10–13 .
- [22] 许继军, 杨大文, 等 . 长江上游干旱评估方法初步研究[J] . 人民长江, 2008, 39(11): 1–5 .
- [23] BREDEMEIER C . Research tests the relations between normalized difference vegetation index (NDVI) and grain yield of four wheat cultivars[J] . Ciência Rural, 2013, 43(7): 27–35 .
- [24] JIAO W, ZHANG L, CHANG Q, et al . Evaluating an Enhanced Vegetation Condition Index (VCI) Based on VI-UPD for Drought Monitoring in the Continental United States[J] . Remote Sensing, 2016, 8(3): 224 .
- [25] ZHANG L, JIAO W, ZHANG H, et al . Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices[J] . Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 96–106 .
- [26] TIAN M, WANG P, KHAN J . Drought Forecasting with Vegetation Temperature Condition Index Using ARIMA Models in the Guanzhong Plain[J] . Remote Sensing, 2016, 8(9): 690 .
- [27] NICHOL J E, ABBAS S . Integration of remote sensing datasets for local scale assessment and prediction of drought[J] . Science of the Total Environment, 2015, 505: 503–507 .
- [28] ZORMAND S, JAFARI R, KOUPAEI S S . Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands[J] . Natural Hazards, 2017, 86: 1–21 .
- [29] MISHRA A K, SINGH V P . Drought modeling – A review[J] . Journal of Hydrology, 2011, 403: 157–175 .
- [30] CHEN L, SINGH V P, GUO S, et al . Drought Analysis Using Copulas[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(7): 797–808 .
- [31] 程亮, 金菊良, 酆建强, 等 . 干旱频率分析研究进展[J] . 水科学进展, 2013, 24(2): 296–302 .
- [32] YEVJEVICH . An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[M] . Denver: Colorado State University, 1967 .

- [33] SHIAU J T . Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas[J] . *Water Resources Management*, 2006, 20(5): 795–815 .
- [34] SONG S B, SINGH V P . Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrologic data [J] . *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, 24(3): 425–444 .
- [35] 周玉良,袁潇晨,周平,等 . 基于地下水埋深的区域干旱频率分析研究[J] . *水利学报*, 2012, 39(9): 1075–1083 .
- [36] ANDREADIS K M, CLARK E A, WOOD E F, et al . Twentieth-Century drought in the conterminous United States[J] . *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(6): 985–1001 .
- [37] WANG A, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J . Soil moisture drought in China, 1950–2006[J] . *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257–3271 .
- [38] 刘慧,田富强,汤秋鸿,等 . 基于水文模型和遥感的干旱评估和重建[J] . *清华大学学报(自然科学版)*, 2013(5): 613–617 .
- [39] 许凯 . 我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D] . 北京:清华大学, 2015 .
- [40] 谢平,李析男,陈丽,等 . 基于 WHMLUCC 水文模型的非一致性干旱频率计算方法(I):原理与方法[J] . *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(1): 1–5 .
- [41] 李析男,谢平,陈丽,等 . 基于 WHMLUCC 水文模型的非一致性干旱频率计算方法(II):作物缺水干旱指标在无定河流域的应用[J] . *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(2): 16–21 .
- [42] LORENZ D J, OTKIN J A, SVOBODA M, et al . Predicting the U.S. drought monitor using precipitation, soil moisture, and evapotranspiration anomalies. Part II: Intraseasonal drought intensification forecasts[J] . *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(7): 1963–1982 .
- [43] VOGT J, SEPULCRE G, MAGNI D, et al . The European Drought Observatory (EDO): Current State and Future Directions[C]//AGU Fall Meeting . AGU Fall Meeting Abstracts, 2013 .
- [44] BARROS A P, BOWDEN G J . Toward long-lead operational forecasts of drought: An experimental study in the Murray–Darling River Basin[J] . *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3): 349–367 .
- [45] PAULO A A, 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): 59–81 .
- [46] DURDU Ö F . Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Büyük Menderes river basin, western Turkey [J] . *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 24(8): 1145–1162 .
- [47] LOHANI V K, LOGANATHAN G V . An early warning system for drought management using the Palmer drought index[J] . *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(6): 1375–1386 .
- [48] 孙才志,林学钰 . 降水预测的模糊权马尔可夫模型及应用[J] . *系统工程学报*, 2003(4): 294–299 .
- [49] 张丹,周惠成 . 基于指数权马尔可夫链及双原则干旱预测研究[J] . *水电能源科学*, 2010, 28(4): 5–8 .
- [50] MISHRA A K, DESAI V R . Drought forecasting using feed-forward recursive network[J] . *Ecological Modelling*, 2006, 198: 127–138 .
- [51] ANDERSON M L, CHEN Z Q, KAVVAS M L, et al . Coupling HEC–HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff [J] . *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(4): 312–318 .
- [52] WOOD A W, MAURER E P, KUMAR A, et al . Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J] . *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D20): ACL 6–1–ACL 6–15 .
- [53] WOOD A W, KUMAR A, LETTENMAIER D P . A retrospective assessment of National Centers for Environmental Prediction climate model-based ensemble hydrologic forecasting in the western United States[J] . *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D4): 575–582 .
- [54] LUO L, WOOD E F . Monitoring and predicting the 2007 U.S. drought [J] . *Geophysical Research Letters*, 2007 . 34(22): 315–324 .
- [55] LUO L, WOOD E F . Use of Bayesian Merging Techniques in a Multimodel Seasonal Hydrologic Ensemble Prediction System for the Eastern United States[J] . *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(5): 866–884 .
- [56] WANG A, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J . Soil Moisture Drought in China[J] . *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257–3271 .
- [57] 张丹 . 区域旱情中长期预报及农业干旱风险综合评价[D] . 大连:大连理工大学, 2011 .
- [58] NOAA/NWS/NCEP/Climate Prediction Center. U.S. Seasonal Drought Outlook [EB/OL] . [2017–07–15]. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/sdo_summary.php.
- [59] Climate Prediction Center. Soil Moisture Outlooks[EB/OL] . [2017–07–16]. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/forecasts.shtml>.

- [60] SHEFFIELD J, WOOD E F, CHANEY N, et al . A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan African water resources and food security [J] . Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95 (6) : 861-882 .
- [61] 河海大学, 水利部水利信息中心 . 基于气象 - 水文耦合的干旱预测研究 [R] . 2016 .
- [62] 金菊良, 宋占智, 崔毅, 等 . 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展 [J] . 水利学报, 2016, 47(3) : 398-412 .
- [63] HAYES M J, WILHELMI O V, KNUTSON C L . Reducing drought risk: Bridging theory and practice [J] . Natural Hazards, 2004, 5(2) : 106-113 .
- [64] ISDR Ad Hoc Discussion Group on Drought. Living With Risk: An Integrated Approach to Reducing Societal Vulnerability to Drought [R] . ISDR, 2002 .
- [65] HAO L, ZHANG X Y, LIU S D . Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit [J] . Natural Hazards, 2012, 61(2) : 785-801 .
- [66] 许凯, 徐翔宇, 李爱花, 等 . 基于概率统计方法的承德市农业旱灾风险评估 [J] . 农业工程学报, 2013, 29 (14) : 139-146 .
- [67] 张继权, 刘兴明, 严登华 . 综合灾害风险管理导论 [M] . 北京: 北京大学出版社, 2012 .
- [68] 屈艳萍, 高辉, 吕娟, 等 . 基于区域灾害系统论的中国农业旱灾风险评估 [J] . 水利学报, 2015, 46(8) : 908-917 .
- [69] 贾慧聪, 王静爱, 潘东华, 等 . 基于 EPIC 模型的黄淮海夏玉米旱灾风霞评价 [J] . 地理学报, 2011, 66(5) : 643-652 .
- [70] 屈艳萍, 郇建强, 吕娟, 等 . 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术 [J] . 水科学进展, 2014, 25(2) : 297-304 .
- [71] 王飞, 尹占娥, 温家洪 . 基于多智能体的自然灾害动态风险评估模型 [J] . 地理与地理信息科学, 2009, 25 (2) : 85-88 .
- [72] 孙洪泉, 苏志诚, 屈艳萍, 等 . 基于作物生长模型的农业干旱灾害风险动态评估 [J] . 干旱地区农业研究, 2013, 31(4) : 231-236 .
- [73] 顾颖 . 风险管理是干旱管理的发展趋势 [J] . 水科学进展, 2006, 17(2) : 295-298 .
- [74] WILHITE D A . Drought planning: A process for state government [J] . Water Resources Bulletin, 1991, 27(1) : 29-38 .
- [75] 吕娟 . 我国干旱问题及干旱灾害管理思路转变 [J] . 中国水利, 2013(8) : 7-13 .
- [76] 屈艳萍, 吕娟, 苏志诚 . 中国干旱灾害风险管理战略框架构建 [J] . 人民黄河, 2014, 36(4) : 29-32 .

Research review and perspective of drought mitigation

QU Yanping^{1, 2}, LÜ Juan^{1, 2}, SU Zhicheng^{1, 2}, SUN Hongquan^{1, 2}, MA Miaomiao^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, Beijing 100038, China)

Abstract: Drought and its disaster occurs frequently throughout the world in recent decades. More and more researchers are aware of the significance of drought mitigation research, and carry out a series of fruitful research. In this paper, the research progress on drought mitigation will be elaborated systematically, mainly focusing on following four aspects, drought assessment, drought forecasting, drought disaster risk assessment and drought disaster management strategy. The future trends and main technical difficulties in the drought mitigation research are also put forward. Drought assessment shows tendencies from single-indicator analysis to comprehensive analysis of multi-indicators, and from single intensity analysis to comprehensive analysis of intensity-time-range. In respect of drought forecast technology development, there is a trend from forecast based on statistical methods to forecast based on a coupled atmospheric-hydrological modeling method. The drought risk assessment presents the transitions from evaluation model based on mathematical methods to evaluation model based on physical mechanism, and from static risk assessment to static and dynamic combined risk assessment.

Keywords: drought mitigation; drought assessment; drought forecasting; drought disaster risk assessment; drought disaster management strategy

(责任编辑: 祁伟)