

# 水文干旱研究进展

董前进, 谢平

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**水文干旱是自然干旱中的一种重要类型,影响自然界水循环过程中蒸发、下渗和径流三大环节,关系着水文循环和水量平衡。当前的干旱研究多集中在气象干旱、农业干旱上。鉴于水文干旱研究的重要性和目前水文干旱研究的不足,对当前水文干旱研究进行了分类评述,提出了研究中存在的问题及主要发展方向,可为水文干旱的进一步研究提供参考。

**关键词:**水文干旱;干旱指数;干旱预测;风险分析

**中图分类号:**P333      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0852(2014)04-0001-07

干旱是一种常见却十分复杂的综合现象,通常定义为“长时期缺乏降水或降水明显短缺或由降水短缺导致某方面的活动缺水”<sup>[1]</sup>,涉及气象、水文、农业及地貌、地质等众多自然因素,也与人文、社会、经济条件密切相关。由于其历时长、发展缓慢而容易被忽视,但是其危害并不亚于洪水、地震等自然灾害<sup>[2]</sup>。现有研究往往对气象干旱、农业干旱关注较多,而对水文干旱研究不足。

水文干旱是从干旱对河川径流、水库的影响方面来定义的,通常是指天然降水、河川径流或地下水平衡所造成的水分短缺现象,相对而言,水文干旱影响因素较其他气象、农业等干旱更加复杂,程度深、后果重。水文干旱影响自然界水循环过程中蒸发、下渗和径流三大环节,涉及到地表、壤中和地下水界面,关系水文循环和水量平衡,因而更能反映实际旱情与抗旱难易程度,同时还容易受到很多人为因素如用水需求的影响。

再次,由于受全球气候变化和人类活动、流域下垫面条件变化的影响,洪水、干旱等水文极值事件发生的频率和影响范围呈上升趋势,为此加强干旱特别是对水文干旱研究不仅是丰富干旱研究理论的需要,更是

满足社会经济活动、农业生产实践的现实要求。

本文在阐述水文干旱与气候干旱、农业干旱、社会经济干旱关系的基础上,对当前水文干旱涉及的干旱指标、干旱特征变化规律及重现期、干旱预测及对河川径流影响等内容进行分类评述,并指出现有水文干旱研究中存在的问题,最后对水文干旱研究的主要发展方向进行了展望。

## 1 水文干旱与其他干旱相互关系

美国气象学会将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱及社会经济干旱等四个类型<sup>[1]</sup>,气象干旱主要是指某一时期某一地区内由大气降水和蒸发不平衡所造成的水分短缺现象,这种现象可迅速开始和突然结束,转换较快;农业干旱主要是针对土壤和作物而言,指在作物生长关键期由于土壤水分持续不足而造成的作物体内水分亏缺,影响作物正常生长发育,进而导致减产或失收的现象。社会经济干旱是指自然系统与人类经济系统中由水资源供需不平衡所造成的水资源短缺现象<sup>[3]</sup>。几种干旱间既有联系又有区别,其中气象干旱是最基本的起因,气象干旱持续较长时间后将造成

收稿日期:2012-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50909073,51179131,51190094);湖北省自然科学基金资助项目(2010CDB08401);广东省水利科技创新项目成果(2011-01)

作者简介:董前进(1979-),男,湖北安陆人,副教授,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:dqjin@whu.edu.cn

通讯作者:谢平(1963-),男,湖北松滋人,教授,主要从事变化环境下的水文水资源研究。E-mail:pxie@whu.edu.cn

土壤水分短缺和作物缺水(农业干旱),以及地表径流及河道流量减少与地下水位下降(水文干旱),发展到一定程度就会产生作物枯萎或减产、人畜饮用水困难等社会经济损失(社会经济干旱)。由此,水文干旱处在自然干旱发展的次级阶段,受制于气象干旱的同时也直接影响农业干旱与社会经济干旱;同时,当前的研究多集中于气象干旱、农业干旱上,对水文干旱方面的研究加以总结与整理也是非常必要的。

## 2 水文干旱研究分类评述

水文干旱是一种渐变的自然现象,对它的识别与评判通常由干旱指数来完成,又由于干旱指数常常是多种干旱特征变量的综合描述,干旱预测及风险分析则是干旱指数与特征变量研究的自然外延,也是干旱分析的共性问题。由此,以下将按照水文干旱指数、干旱特征变量、干旱预测及影响、干旱风险及其它等内容分别阐述。

### 2.1 水文干旱指数

干旱指数是对干旱情况的量化表达,具有鉴别、度量与综合评判的作用。国外较早就进行了干旱指数方面的研究,随着对干旱现象认识的逐步深入,干旱指数也由基于降水短缺的简单方法逐渐发展到针对具体问题的更复杂的模式,但迄今为止,由于干旱没有统一的定义,干旱指数的研究也在不断发展之中。Heim(2002)全面回顾并分析了20世纪美国干旱指数研究的进展情况<sup>[1]</sup>,指出了正在广泛使用的Palmer指数<sup>[4]</sup>(Palmer Drought Severity Index,PDSI)和Palmer Hydrological Drought Index,PHDI)和标准降水指数<sup>[5]</sup>(Standardized Precipitation Index,SPI)的优缺点,并介绍了后Palmer时代干旱指数发展情况和美国干旱监测系统建设情况。地表供水指数(Surface water supply index,SWSI)<sup>[6-7]</sup>是1981年为克罗拉多州开发的经验水文指数,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,是地表水状况的一种度量。Mishra A.K.& Singh V.P.(2010)则从干旱定义发展历程上对当前涉及干旱的研究做了分类和评述,提出古气候学在干旱研究中的作用,增加了地下水干旱类型<sup>[8]</sup>。从当前的应用来看,由于SPI计算简便,资料易于获取,因而比Palmer指数更有优势,但限于SPI不能反应降水、径流季节性的特点,Gonzalez J. & J. B. Valdes(2006)基于概率理论和随机极值偏离序列提出了分析干旱历时、烈度等特征的干旱频率指标<sup>[9]</sup>,

与SPI相比,干旱频率指标降低了指标在实际应用中的敏感性,可用于干旱空间特性比较分析和一般干旱特性分析。Kao & Govindaraju(2010)提出了一个考虑径流季节变化的联合缺水指数<sup>[10]</sup>,该指数能综合考虑降水与径流的边际分布,并能对整个干旱状态进行描述和表征,从而能够揭示径流与降水的相关性结构。Sergio M. Vicente-Serrano等(2012)选择六种三参数分布(对数正态、P-分布、对数逻辑分布、极值分布、广义帕累托分布、威布尔分布)作为月径流拟合的分布类型,采用最佳月拟合和最小正交距离为分布拟合评价准则,给出了准确计算标准径流指数(Standardized Streamflow Index,SSI)的方法<sup>[11]</sup>。由上述分析知,虽然干旱频率指标、联合缺水指数、标准径流指数SSI等指标相比PDSI、PHDI、SPI、地表供水指数等有所改进,但是多数的指标是基于降水系列分析的,而由于干旱本身时空差异较大,往往限制了这些干旱指标的使用范围。

我国自20世纪50年代才开展干旱研究,采用的干旱指数多参考国外研究成果并结合国内干旱特点和气候特征条件加以修正。张强等(2004)以SPI指数和湿润指数为基础,发展了一个可以考虑近期降水量对干旱影响的综合指数<sup>[12]</sup>。方红远等(2007)根据水库的可供水量与供水系统目标需水量差值正负来表达供水系统处于干旱与非干旱状态的区域干旱鉴别方法,并分析了区域干旱历时特性<sup>[13]</sup>;张文江等(2008)构造并计算了地表水分距平遥感指数,用之检验了四川盆地东部特大干旱的遥感响应<sup>[14]</sup>。

由上可知当前的干旱指数研究集中在:(1)某一时间段的正常降水百分率(如降水距平);(2)降水小于某一阈值的连续天数;(3)以降水和温度为变量的公式;(4)以持续降水短缺作为因子的各种模式(如SPI、SWSI等)。虽然采用的干旱指数较多,但大多数是从干旱的成因条件或特征表象及损失等因素出发来判断干旱发生及灾情的评估,其中,部分指标比较单一,难以达到通用的要求,且不能反映水文干旱随时空、降水发展的变化情况,因而也是需要加强研究的内容之一。

### 2.2 干旱特征变量

干旱通常由干旱历时、干旱烈度、干旱强度、干旱间隔时间等多种属性表征,这些属性通常也作为随机变量来处理。游程理论是当前干旱分析中一种最基本也是最重要的方法。对于一个水文干旱事件来说,水文干旱的历时、烈度和强度分别用负游程长、负游程和

(负游程包围的面积)与负游程强度来描述。这样关于水文干旱的分析也常围绕这些特征变量来进行。

### 2.2.1 单变量分析

早期的水文干旱研究通常是单变量的。Yevjevich (1967)最早应用游程理论分析干旱特性,定义了干旱历时、干旱烈度和强度等水文干旱指标并初步分析了这些特征指标的统计规律<sup>[15]</sup>。在水文干旱中,对于干旱历时的概率特性研究较多。Sen 认为可以用泊松分布描述干旱历时发生次数的概率特性,并提出了计算具有独立或马尔科夫过程的水文序列游程长和游程和的统计特性方法<sup>[16]</sup>。也有人认为干旱历时的概率特性服从几何分布<sup>[17]</sup>或 Weibull 分布<sup>[18]</sup>,对于一定干旱历时条件下的干旱烈度条件分布情况,Shiau 等 (2001)用 Gamma 分布拟合良好<sup>[19]</sup>,同样,Bonaccorso 等(2003)在假定干旱烈度服从 Gamma 分布条件下,得出干旱烈度的概率分布只取决于变差系数和截取水平<sup>[20]</sup>。

随着干旱极值事件频发,干旱中一个不可忽视的问题是,干旱的最大干旱烈度与最长干旱历时并不对应,为此,国内外对极值干旱特性也有一定的研究,这些研究大多基于极值理论。Gupta 和 Duckstein(1975)在假定一段时间内干旱发生次数服从泊松分布的基础上,研究了最大干旱历时的概率特性<sup>[21]</sup>。Sen(1990)根据极值理论,用解析法得出有限样本最长干旱历时和最大干旱烈度分布的近似公式<sup>[22]</sup>,Sharma(1996)在不同截取水平下,利用正态和对数正态分布的年径流序列,研究了极限干旱烈度的概率分布和相关统计量表达式<sup>[23]</sup>,并根据加拿大河流周流量序列标准值构造了标准化水文指数,分析了周最长历时和最大强度变量的统计特性<sup>[24]</sup>。

国内学者对水文干旱的单变量特征也开展了大量研究。马秀峰(1994)分析了随机序列轮长与轮次的统计规律,指出平稳随机序列的轮次服从二阶线性齐次差分方程<sup>[25]</sup>。王谦等(1995)应用 Sen 法分析了黄淮海平原季节性干旱年际历时的概率分布<sup>[26]</sup>。邢大伟(1996)利用负游程理论分析了陕西渭河流域干流及三条支流六个水文站的水文干旱现象<sup>[27]</sup>。王文胜(1999)根据河川径流记录,应用 Kriging 优化内插法,按照游程理论及截距法分析了干旱历时、干旱烈度及其条件概率等特征值<sup>[28]</sup>。和宛琳(2006)<sup>[29]</sup>、袁超等(2008)<sup>[30]</sup>利用游程分析和随机过程等方法分析了渭河流域的水文干旱特征。在极限干旱研究上,冯国章(1994)将 Sen 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,导出了最大负游程长概率密度函数,并将其分别作为极限水文干旱历时的概率密度函数和概率分布函数,提出了水文干旱的划分标准以及确定水资源抗旱年限的方法<sup>[31]</sup>。丁晶等(1997)在大量实测年径流量资料的基础上,分析了负轮长的统计变化特性,并以哈尔滨和陕县站为例,采用随机模拟法探讨了严重干旱出现可能性的定量估计方法<sup>[32]</sup>。袁超等(2008)采用解析法与模拟法给出了一定时期内极限水文干旱历时的概率分布,探讨了极限水文干旱历时概率分布和数学期望随径流序列一阶自相关系数、偏态系数变化的规律<sup>[33]</sup>。

### 2.2.2 多变量分析

单变量分析不能完全而准确地刻画水文干旱其它属性及属性间的相互关系,鉴于水文干旱历时与烈度等变量间的高度相依性,水文干旱的多变量分析成为一种必然。水文干旱历时、烈度等多变量分析是当前研究的热点,这些研究多采用 Copula 多元统计理论。从当前的应用看,对水文干旱多变量的分析已由较为简单的两变量分析拓展至三维及以上变量的分析,所采用的连接函数 Copula 也由 Archimedean Copulas (含 Clayton copula, Frank copula, Gumbel-Hougaard copula 和 Ali-Mikhail-Haq (AMH) copula 等)过渡至 Elliptical Copulas (含 Normal copula, Student-t copula, Meta-elliptical copula 是其中的一种变形)等更为复杂的形式。Lana X.等(2006)采用广义极值分布和广义帕累托分布模拟了 Catalonia 地区 39 个雨量站年极值干旱序列和超定量序列,比较了两种假设分布的拟合性能,结果表明广义帕累托分布更适合描述一些雨量站点,而对于超定量系列来说,采用广义极值分布更适合<sup>[34]</sup>。Ali 等(2008)给出了水文过程中两个广义伽马分布变量积分布和商分布的分布形式,从而确定了干旱烈度与相对干旱历时的分布<sup>[35]</sup>。Serinaldi F.等(2009)考虑了干旱历时、SPI 均值和最小值、干旱平均面积范围等因素的概率特性,并利用 Student copula 研究了干旱变量的相关关系、联合分布和相应的重现期计算问题<sup>[36]</sup>。Cancelliere A.和 Salas J.D.(2010)采用径流资料和离散自回归滑动平均模型研究了干旱特征的概率结构,尤其是干旱历时与烈度特征分布问题,在此基础上计算了干旱重现期<sup>[37]</sup>。

国内许月萍等(2010)利用 Clayton copula 分析了边际分布为 P- 分布和伽马分布的两元联合分布,计算了干旱历时和干旱烈度的联合分布概率<sup>[38]</sup>。由于常



用的 Archimedean Copulas 仅对一定范围内的变量相关有效而在分析三维以上(含)水文干旱多变量分析时受到较大限制,同时由于 Meta-elliptical copula、Plackett copula 具有使用灵活、适用范围广泛、易于拓展至三维以上变量的特点,宋松柏等(2010a,b)采用 Meta-elliptical copula 和 Plackett copula 分析了周期干旱系列的频率分析问题,计算了干旱历时、烈度和间隔时间的三元概率分布,进行了参数优化估计和三元变量组合情况下的重现期计算<sup>[39-40]</sup>。在其带领下,结合渭河流域西安站月降水资料、泾河张家山站和北洛河状头站径流资料对干旱多特征变量的两变量联合分布及相应重现期<sup>[41]</sup>、干旱历时、干旱烈度和烈度峰值三者联合分布<sup>[42]</sup>进行了研究。

### 2.2.3 重现期分析

干旱重现期在干旱风险管理与水资源规划管理中起非常重要的作用,但由于直接推导干旱事件的重现期非常困难,传统的水文重现期计算方法并不适用于多变量的干旱现象,因此,当前水文干旱重现期的定义随着应用的不同而变化。Kim 等(2006)结合非参数核估计方法和 Palmer 干旱指数研究了干旱的多维属性特征,特别是解决了不同干旱变量组合情况下双变量干旱重现期的计算问题<sup>[43]</sup>。Shiau 等(2007)利用 Clayton copula 研究了黄河流域水文干旱历时和烈度的相关性特征,并由此计算了双变量条件下水文干旱重现期问题<sup>[44]</sup>。国内赵晓慎等(2010)根据游程理论和 Matlab 编程技术得出了各种不同游程长度的概率特征,给出了三门峡站和龙门站持续干旱 11a 的重现期<sup>[45]</sup>。周玉良等(2011)通过径流量距平百分率和径流量累积频率两种方法识别水文干旱特征变量,并以适线法确定单个干旱特征变量的分布曲线,在此基础上利用 Archimedean Copula 函数构建了干旱历时与干旱烈度间的联合分布,并以邵阳地区为例计算了干旱重现期<sup>[46]</sup>。李计等(2012)基于 8 种单参数族的 Copulas 函数研究新疆乌鲁木齐和石河子气象站二维干旱变量的联合分布,给出了不同干旱变量拟合优度较好的 Copula 函数,并得到单变量重现期与二维变量联合重现期与同现重现期的关系<sup>[47]</sup>。

### 2.3 干旱预测及影响

干旱的预测是一个十分困难的问题。目前关于干旱预测的分析主要是从影响干旱的众多气象因素的变化趋势分析出发,给出未来一段时间干旱发生可能性的定量或定性分析。如 Shahab Araghinejad(2011)在可

靠度分析的基础上,考虑到气候变化条件下水资源系统供水与需水的变化,给出了水文干旱监控与预测的概率方法<sup>[48]</sup>。Jaranilla-Sanchez 等(2011)以菲律宾 Pampanga 河为例,在 SPI 基础上,提出用标准异常指数来鉴别干旱的发生,并在考虑不同干旱类型下流域水量、能量运动机理上构建了水、能平衡的分布式水文模型(WEB-DHM),比较客观地描述了干旱对农业生产的影响<sup>[49]</sup>。Anne K. Fleig 等(2011)利用丹麦和英国部分区域日径流资料提出了区域干旱面积指数,分析了严重水文干旱与气象类型的关系,结果表明,虽然水文干旱在不同区域差异程度较大,但干旱最可能是由特定区域高压控制的气象类型产生<sup>[50]</sup>。Mohammad Karamouz 等(2012)提出了干旱期极小化最大缺水量目标下水库调度的应急计划,该计划的提出考虑了气候变化对径流特征的影响<sup>[51]</sup>。Sharma 等(2012)利用年、月、周径流的标准水文指数序列,基于马尔科夫模型研究了水文干旱历时的预测问题,结果表明,一阶马尔科夫或者随机模型预测年径流的干旱历时比较合适,对于月径流和周径流,采用二阶马尔科夫模型预测比较满意<sup>[52]</sup>。国内杨建伟(2009)利用沁河流域上游沁源气象站 42a 的实测降水量资料建立灰色预测 GM(1, 1)灾变模型,对干旱灾害进行预测,经检验,效果较为理想<sup>[53]</sup>。章大全等(2010)根据中国气象局 1958~2007 年 194 站的温度、降水和 Palmer 旱涝指数均一化数据库,构建统计模型,量化了温度和降水变化在干旱形成中所占的比重,并对未来 5 年中国 8 个气候区的干旱化趋势进行了预测<sup>[54]</sup>。

### 2.4 干旱风险及其它

鉴于干旱发生的机理不明及水文系统本身的不确定性,水文干旱的风险研究及管理是当前研究重要且相对薄弱的领域。Shahid S.& Behrawan H.(2008)基于干旱危险和易损性指标提出了干旱风险灾害评估的概念框架<sup>[55]</sup>。Raje & Mujumdar (2010)利用 Dempster-Shafer 证据理论和 Bayes 理论研究了气候变化条件下水文干旱预测不确定性模拟问题<sup>[56]</sup>。Sechi G.M. & Sulis A.(2010)利用混合的优化和模拟方法探讨了降低 Agri-Sinni 水系统受干旱风险影响的措施问题<sup>[57]</sup>。Araghinejad S.(2011)在水资源供需平衡可靠性研究基础上提出了干旱预测及风险分析的概率方法<sup>[58]</sup>。

许月萍等(2009,2010)应用超阈值(POT)方法建立了水文统计极值估算模型,对水文极值估算的不确定性和模型对阈值选取的敏感性进行了分析<sup>[59]</sup>;

还研究了包括干旱在内的水文极值事件中的不确定性问题,分析了不确定性的来源,通过三个实例的研究,结果表明来自于方法的不确定性是最大的,并且由忽略多变量水文过程相关性所带来的风险是最小的<sup>[60]</sup>。

### 3 总结与展望

水文干旱是干旱研究的一种重要类型,虽然现在已有较多对水文干旱现象进行描述的干旱指数,但是多数指数仍有特定的适用范围,针对具体问题提出相应的干旱分析指标可能会丧失通用性和可比性,但是在局部范围内的使用是行之有效的。而且,由于表征干旱现象的特征变量较多,部分特征变量在使用中易发生混淆,一个重要的问题是这些特征变量是不是同等重要,是否有必要将所有这些特征变量联合起来才能完整而准确地描述水文干旱现象,这是需要进一步探讨的。

从上述研究现状还可推知,一方面,干旱特征变量的联合分布特性及相应的重现期计算将是当前干旱分析研究中的重点任务,限于干旱现象的发生机理不明和时空变化的复杂性,今后一段时间仍是干旱研究中的重要内容;而干旱随时空动态变化的机理与演变趋势将是水文干旱研究的重中之重,这些问题的解决对于干旱的预测与规划管理具有重要意义。另一方面,在干旱多元特征变量联合分布中广泛应用的 copula 连接函数使用比较盲目,需要进一步在分析干旱特征变量概率统计属性的基础上,加强对 copula 连接函数分类及适用范围分析,以选择较优的连接函数应用于当前干旱具体问题的研究中。

最后,水文干旱也是一种不确定事件,虽然当前对水文干旱的风险分析有一定研究,但是对水文干旱风险识别、风险评价与管理仍有很多工作值得进一步研究,特别是在全球气候变化和人类活动影响加剧的情况下,如何进行水文干旱的预测、管理与风险评估将是干旱研究中的重要任务,其相互作用机理与影响关系将是研究的难点,这些问题的解决都将有助于更好地认识干旱现象,揭示干旱发生规律,预防干旱灾害,从而为社会生产实践服务。

#### 参考文献:

- [1] Heim J., Richard R. A review of twentieth-century drought indices used in the united states [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [2] 郑远长. 全球自然灾害概述 [J]. 中国减灾, 2000, 10 (1):14-19. (ZHENG Yuanchang. Summary on global natural disaster [J]. Disaster Reduction in China, 2000,10(1):14-19. (in Chinese))
- [3] 宋松柏,蔡焕杰,粟晓玲. 专门水文学[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社, 2005:139-147. (SONG Songbai, CAI Huanjie, SU Xiaoling. Special Hydrology [M]. Yangling: Northwest A& F University Press, 2005, 139-147. (in Chinese))
- [4] Palmer W. C. Meteorological drought [R]. U.S. Weather Bureau Research Paper, 1965:45-58.
- [5] McKee T. B., N. J. Doesken, J. Kleist. The relationship of drought frequency and duration to time scales [A]. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. [C]. 1993:179 - 184.
- [6] Shafer, B. A. and L. E. Dezman. 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.
- [7] Garen, D. C.. Revised surface water supply index for western United States [J]. J Water Res PL-ASCE, 1993,119(4):437-454.
- [8] Mishra A.K., Singh V.P.. A review of drought concepts [J]. J Hydrol, 2010,391:202-216.
- [9] Gonzalez, J., J. B. Valdes. New drought frequency index: Definition and comparative performance analysis [J]. Water Resour. Res., 2006,42.
- [10] Kao S.C., Govindaraju R.S. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. J Hydrol, 2010, 380:121 - 134.
- [11] Sergio M. Vicente-Serrano, Juan I. López-Moreno, Santiago Beguería, et al. Accurate computation of a streamflow drought Index [J]. J. Hydrol. Eng., 2012,17(2):318 - 332.
- [12] 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))
- [13] 方红远,甘升伟,余莹莹. 区域供水系统干旱历时特性综合分析[J]. 水科学进展, 2007,18(1):95-101. (FANG Hongyuan, GAN Shengwei, YU Yingying. Comprehensive analysis of drought duration characteristics for regional water-supply system [J]. Advance in Water Science, 2007,18(1):95-101. (in Chinese))
- [14] 张文江,陆其峰,高志强,等. 基于水分距平指数的 2006 年四川盆地东部特大干旱遥感应响分析 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008,38 (2):251 -260. (ZHANG Wenjiang, LU Qifeng, GAO Zhiqiang, et al. Remote sensing response analysis on especially big drought of 2006 in east Sichuan basin based on moisture departure index [J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2008,38(2):251-260. (in Chinese))
- [15] Yevjevich V. An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts [M]. Colorado State University, 1967.

- [16] Sen Z. Run-sums of annual flow series [J]. *J Hydrol*, 1977,35(3-4): 311-324.
- [17] Bogardi J J, Duckstein L, Rumambo O H.. Practical generation of synthetic rainfall event time series in a semi-arid climatic zone [J]. *J Hydrol.*, 1988,103(3-4): 357-373.
- [18] Woo K M, Tarlue A.. Streamflow droughts of northern Nigerian river[J]. *Hydrol. Sci. J.*, 1994,39(1): 19-34.
- [19] Shiau J.T., Shen H.W. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity[J]. *J Water Res PL-ASCE*, 2001,127(1):30 - 40.
- [20] Bonaccorso B, Cancelliere A, Rossi G.. An analytical formulation of return period of drought severity [J]. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2003, 17(3): 157-174.
- [21] Gupta V, Duckstein L. A stochastic analysis of extreme droughts[J]. *Water Resour. Res.*, 1975,11(2): 221-228.
- [22] Sen Z. Critical drought analysis by second-order Markov chain[J]. *J Hydrol*, 1990, 120(1-4):183-202.
- [23] Sharma T C. Simulation of the Kenyan longest dry and wet spells and the largest rain-sums using a Markov model [J]. *J. Hydrol.*, 1996, 178(1-4): 55-67.
- [24] Sharma T. C. , Panu U. S. Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers [J]. *Hydrol. Sci. J.*, 2010,55(1),79 - 92.
- [25] 马秀峰. 随机序列轮长与轮次的统计规律[J]. *水科学进展*, 1994,5(2):95-103. (MA Xiufeng. Run and run-length characteristics of stochastic sequences [J]. *Advances in Water Science*, 1994,5(2): 95-103. (in Chinese))
- [26] 王谦, 陈景玲. 黄淮海平原干旱历时的概率特征研究[J]. *中国农业气象*, 1995,16(1): 23-26. (WANG Qian, CHEN Jingling. Probability feature of drought duration in Huang-Huai-Hai plain [J]. *Agricultural Meteorology*, 1995,16(1): 23-26. (in Chinese))
- [27] 邢大韦. 陕西渭河流域水文干旱分析 [J]. *西北水资源与水工程*, 1996,7(1):1-9. (XING Dawei. Analysis for hydrologic drought of the Weihe river basin in Shaanxi province [J]. *Water Resources & Water Engineering*, 1996,7(1):1-9. (in Chinese))
- [28] 王文胜. 河川径流水文干旱分析 [J]. *甘肃农业大学学报*, 1999,34(2):184-187. (WANG Wenshen. Analysis of regional droughts on streamflow by using Kriging method [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1999,34(2):184-187. (in Chinese))
- [29] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006,42(1):102-106. (HE Wanlin, XU Zongxue. Spatial and temporal characteristics of the long-term trend for temperature and pan evaporation in the Wei river basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, 42(1): 102-106. (in Chinese))
- [30] 袁超. 渭河流域主要河流水文干旱特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. (YUAN Chao. Study on Hydrologic Drought Characteristics of Main Rivers in Weihe River Basin [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese))
- [31] 冯国章. 极限水文干旱历时概率分布的解析与模拟研究 [J]. *地理学报*, 1994,49(5): 457-466. (FENG Guozhang. A study on probability distribution of critical hydrologic drought durations using the methods of analytics and simulation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(5): 457-466. (in Chinese))
- [32] 丁晶, 袁鹏. 中国主要河流干旱特性的统计分析 [J]. *地理学报*, 1997,52(4):374-381. (DING Jing, YUAN Peng. Stochastic analysis of the drought properties of the main rivers in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4):374-381. (in Chinese))
- [33] 袁超, 宋松柏, 荆萍. 极限水文干旱历时概率分布解析法研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008,36(7):212-218. (YUAN Chao, SONG Songbai, JI Ping. Analytical study on probability distribution of critical hydrological drought duration [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2008,36(7): 212-218. (in Chinese))
- [34] Lana X., Burgueno A., Martinez M.D., Serra C.. Statistical distributions and sampling strategies for the analysis of extreme dry spells in Catalonia (NE Spain) [J]. *J. Hydrol.*, 2006,324:94-114.
- [35] Ali M.M., Woo J., Nadarajah S.. Generalized gamma variables with drought application [J]. *Journal of the Korean Statistical Society*, 2008, 37:37-45.
- [36] Serinaldi F., Bonaccorso B., Cancelliere A., Grimaldi S.. Probabilistic characterization of drought properties through copulas [J]. *Phys. Chem. Earth*, 2009, 34: 596-605.
- [37] Cancelliere A., Salas J.D.. Drought probabilities and return period for annual streamflows series [J]. *J. Hydrol.*, 2010, 391:77-89.
- [38] 许月萍, 张庆庆, 楼章华, 等. 基于 Copula 方法的干旱历时和烈度的联合概率分析 [J]. *天津大学学报*, 2010,43(10):928-932. (XU Yueping, ZHANG Qingqing, LOU Zhanghua, et al. Joint probability analysis of drought duration and severity based on copula approach [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010,43(10): 928-932. (in Chinese)).
- [39] Song S.B., Singh V.P. Meta-elliptical copulas for drought frequency analysis of periodic hydrologic data [J]. *Stoch Environ Res Risk Assess.*, 2010,24a:425-444.
- [40] Song S.B., Singh V.P. Frequency analysis of droughts using the Plackett copula and parameter estimation by genetic algorithm [J]. *Stoch Environ Res Risk Assess.*, 2010b, 24:783-805.
- [41] 张雨, 宋松柏. Copulas 函数在多变量干旱联合分布中的应用[J]. *灌溉排水学报*, 2010,29(3):64 - 68. (ZHANG Yu, SONG Songbai. Application of archimedean copulas in multi-variable drought distribution [J]. *Journal of Irrigation and drainage*, 2010,29(3):64-68. (in Chinese))
- [42] 马明卫, 宋松柏. 椭圆型 Copulas 函数在西安站干旱特征分析中的应用[J]. *水文*, 2010,30(4):36-42. (MA Mingwei, SONG Songbai. Elliptical copulas for drought characteristics analysis of Xi'an gauging station [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010,30(4):36-42. (in Chinese))
- [43] Kim T.W., Valdés J.B., Yoo C.. Nonparametric approach for bivariate drought characterization using Palmer drought index [J]. *J Hydrol. Eng.*, 2006, 11(2): 134-143.
- [44] Shiau J.T., Feng S., Nadarajah S.. Assessment of hydrological

- droughts for the Yellow River, China, using copulas [J]. *Hydrol. Process*, 2007, 21: 2157–2163.
- [45] 赵晓慎, 吴海波, 张超. 多年持续随机水文干旱特征的研究[J]. *华北水利水电学院学报*, 2010, 31(4): 10–13. (ZHAO Xiaoshen, WU Haibo, ZHANG Chao. Study on random characteristics of continuous-years hydrological drought [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2010, 31 (4): 10–13. (in Chinese))
- [46] 周玉良, 袁潇晨, 金菊良, 等. 基于 Copula 的区域水文干旱频率分析[J]. *地理科学*, 2011, 31 (11): 1383–1388. (ZHOU Yuliang, YUAN Xiaochen, JIN Juliang, et al. Regional hydrological drought frequency based on copulas [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(11): 1383–1388. (in Chinese))
- [47] 李计, 李毅, 宋松柏, 等. 基于 Copula 函数的二维干旱变量联合分布[J]. *水文*, 2012, 32(1): 43–49. (LI Ji, LI Yi, SONG Songbai, et al. Joint distribution of two-dimension drought variables based on copulas function [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(1): 43–49. (in Chinese))
- [48] Shahab Araghinejad. An approach for probabilistic hydrological drought forecasting [J]. *Water Resour Manage*, 2011, 25: 191–200.
- [49] Jaranilla –Sanchez P. A., L. Wang, T. Koike. Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River basin, Philippines: A quantitative approach for identifying droughts [J]. *Water Resour. Res.*, 2011, 47.
- [50] Anne K. Fleig, Lena M. Tallaksen, Hege Hisdal, David M. Hannah. Regional hydrological drought in north–western Europe: linking a new regional drought Area Index with weather types [J]. *Hydrol. Process*, 2011, 25, 1163–1179.
- [51] Mohammad Karamouz, Sanaz Imen, Sara Nazif. Development of a demand driven hydro–cli-matic model for drought planning [J]. *Water Resour. Manage.*, 2012, 26: 329–357.
- [52] Sharma, T.C., Panu U.S. Prediction of hydrological drought durations based on Markov chains in the Canadian prairies [J]. *Hydrol. Sci. J.*, 2012, 57(4): 705–722.
- [53] 杨建伟. 灰色理论在干旱预测中的应用[J]. *水文*, 2009, 29(4): 50–51. (YANG Jianwei. Application of gray system theory in drought prediction [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(4): 50–51. (in Chinese))
- [54] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响 [J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 655–662. (ZHANG Daquan, ZHANG Lu, YANG Jie, et al. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 655–662. (in Chinese))
- [55] Shahid S., Behrawan H. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh [J]. *Nat Hazards*, 2008, 46: 391–413.
- [56] Raje D., Mujumdar P.P. Hydrologic drought prediction under climate change: Uncertainty modeling with Dempster–Shafer and Bayesian approaches [J]. *Adv Water R*, 2010, 33: 1176–1186.
- [57] Sechi G.M., Sulis A. Drought mitigation using operative indicators in complex water systems [J]. *Phys. Chem. Earth*, 2010, 35: 195–203.
- [58] Araghinejad S. An approach for probabilistic hydrological drought forecasting [J]. *Water Resour Manage*, 2011, 25: 191–200.
- [59] 许月萍, 任立新, 黄艳, 等. 水文极值计算及其不确定性 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(2): 172–178. (XU Yueping, REN Lixin, HUANG Yan, et al. Hydrological extreme analysis and its uncertainty [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17 (2): 172–178. (in Chinese))
- [60] Xu Yueping, Martijn J. Booij, Tong Yangbin. Uncertainty analysis in statistical modeling of extreme hydrological events [J]. *Stoch Environ. Res. Risk Assess.*, 2010, 24: 567–578.

## Advances in Hydrological Drought Research

DONG Qianjin, XIE Ping

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Hydrological drought is an important type of the natural drought, and it involves many factors in regional water balance, affects the evaporation, infiltration and runoff three processes in water cycle in the world, and it relates to the water cycle and water balance. The current research on drought pay more attention to meteorological drought and agricultural drought, considering the importance of hydrological drought and less focus on hydrological drought, the research on hydrological drought has been classified and summarized in this paper, the problem and the main development direction on hydrological drought has been presented, which may give guidance to deep research.

**Key words:** hydrological drought; drought indices; drought prediction; risk analysis