

# 气候变化下极端水文事件的研究进展

张利平<sup>1</sup>, 杜 鸿<sup>1</sup>, 夏 军<sup>2</sup>, 徐 霞<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**气候异常变化导致洪涝灾害、干旱等极端水文事件的发生及其增加的水灾害风险正成为人类生存所面临的重大挑战。近年来,开展气候变化背景下流域极端水文事件的变化趋势、发生机理及其对气候变化的响应与预测研究正逐渐受到国内外众多学者的关注。本文从极端水文事件的定义、研究方法、水文极值分布函数、观测事实及模拟研究等方面分析评述了极端水文事件问题的研究现状和研究成果。在此基础上,讨论了研究现状存在的问题并对该领域未来研究方向进行了展望。

**关键词:**气候变化;极端水文事件;极端降水;极端洪涝;极端干旱;极值分布

IPCC(International Panel on Climate Change)第四次评估综合报告指出<sup>[1]</sup>,受全球变暖的影响,全球具有代表性和典型性的下垫面的能量和水分循环特征发生了很大变化,特别是对极端气候的发生有严重影响。气候异常变化将改变全球水文循环的现状,对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响,导致洪涝灾害、干旱等极端水文事件的发生,增加水灾害风险,而这些正成为人类生存所面临的重大挑战。

目前研究表明,水文极值事件和极端水文事件是有区别的。极值是指在给定的时期内,或该时期的一定月份或季节内观测到的水文要素的最高值或最低值。如果这个时期是整个有观测资料的时期,这个极值就是绝对极值。水文极值事件可以定义为破纪录事件,是极端事件的一部分<sup>[2]</sup>。极端水文事件是指一种在特定地区和时间(一年内)的罕见事件,在统计意义上属于不易发生的事件或者说小概率事件,在绝对意义上极端水文事件因地区不同而异。根据最近的统计,全球气候变化及相关的极端水文事件所造成的经济损失在过去40年平均上升了10倍<sup>[3]</sup>。因此,为了降低这种影响,针对流域水循环及洪旱灾害等重大水问题,开展气候变化背景下流域水文极端事件的变化趋势、发生机理及其对气候变化的响应与预测研究,对于科学认识全球

气候变化背景下陆地水循环时空演变规律,把握气候异常对水文极端事件的影响规律,评估气候变化对水资源安全的影响,对流域防洪规划设计、大型水电开发规划和运行管理、区域防灾减灾、环境保护和经济社会可持续发展等具有重要科学意义与应用价值。近年来,极端水文事件问题正逐渐受到国内外众多学者的关注,并取得了一些阶段性研究成果,但总体而言尚不够系统深入。本文基于国内外的相关研究成果,综述了水文极端事件的定义、研究方法、水文极值分布函数、观测事实及模拟研究等方面的研究进展,并展望了气候变化下极端水文事件研究的发展趋势。

## 1 极端水文事件的定义及研究方法

早在20世纪80-90年代,一些学者就已经注意到气候变化下的极端天气气候事件的严重危害。1995年,IPCC第二次科学评估报告指出了极端事件变化研究的重要意义,并力图回答“气候是否更加容易变化或更加极端化了”这一难题<sup>[4]</sup>。1997年6月在美国,由CLIVAR(Climatic Variability and Predictability)、GCOS(Global Climate Observing System)和WMO(World Meteorological Organization)支持,召开了“气候极值变化指数和指标”研讨会<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2010-06; 修订日期:2011-03.

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB428406);国家自然科学基金重点项目(40730632);中央高校基本科研业务费专项资金项目(20102060201000066)。

作者简介:张利平(1971-),男,湖北黄冈人,博士,副教授。主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。

E-mail: zlpwhu@sina.com.cn

2006年9月在俄罗斯首都莫斯科召开了水文气象安全问题国际会议,会议围绕极端气候和气象水文事件的影响、预测和预估、预警以及对策研究等方面进行讨论<sup>[6]</sup>。2008年中国启动了国家科技部“十一五”科技支撑计划重点项目“我国主要极端天气气候事件及重大气象灾害的监测、检测和预测关键技术研究(2007BAC29B)”,通过建立中国极端天气气候事件及其引发的重大气象灾害指标体系,深入研究近百年来中国极端天气气候事件的发生规律,及全球变暖背景下极端天气气候事件出现频率、强度变化的原因和形成机理;提高现有数值模式对极端天气气候事件的模拟能力,预估现在到未来百年内气候变暖背景下中国极端气候事件的发展趋势;最终建立极端气候事件动态监测、定量化影响评估、预警系统和灾害风险综合管理系统。2009年中国气象学会年会组织了以“气候系统变化与极端天气气候事件科学关系”为主题的分会场会议,针对中国主要极端气候事件及重大气候灾害的监测、预测和应对集中展开讨论。

世界气象组织(WMO)大体上规定30a以上一遇的气候事件,即气候变量值超出一定历史时期的累年极值,为异常气候事件。Beniston等<sup>[7]</sup>归纳了常用的定义极端事件的3种标准:①事件发生的频率相对较低;②事件有相对较大或较小的强度值;③事件导致了严重的社会经济损失。当然,对于某一具体的极端事件,往往并不能同时满足以上3种标准。

大多数学者利用全球和区域空间尺度和几十年、百年时间尺度的气候记录资料,采用时间序列和概率统计方法来定义极端和异常气候事件的指标,进而研究气候极端和异常事件<sup>[8]</sup>。国内外的研究在确定极端气候事件的阈值时,为便于不同地区间相互比较,极值变化研究采用最多的是某个百分位值作为极端值的阈值,超过这个阈值被认为是极值,该事件可以认为是极端事件<sup>[9-18]</sup>。具体的阈值划分与计算方法多种多样。一般将阈值分为绝对阈值和百分比阈值两种,绝对阈值是指选取某一固定值作为极端事件中极值的阈值;百分比阈值方法则是从概率统计的角度来定义极端事件,该方法所定义极端事件即为统计意义上的小概率事件,其极端程度一般对应于90%或10%的累积频率<sup>[19]</sup>。

极端水文事件主要包括3个方面:极端降水、极端洪涝和极端干旱。目前极端水文事件并没有

统一的定义。因此对于极端水文事件而言,有必要确定出一个相对较好的定义或指标体系,才有利于开展更深入的研究。

### 1.1 极端降水的定义

由于降水的地区差异很大,所以极端降水事件不能用统一的日降水量来简单定义。

事实上,有些干旱地区的日降水量根本就达不到50 mm(暴雨),然而对于当地来说可能已经是极端降水。因此,根据当地的情况确定极端事件更有实际意义<sup>[20]</sup>。

目前,对极端降水的定义和判断标准主要有以下7种:①翟盘茂等<sup>[21]</sup>对1951-1999年中国北方极端降水进行研究,定义降水量大于1961-1990年日降水量序列95%的为极端降水。②Wang等<sup>[22]</sup>利用1961-2001年中国的台站资料,定义日降水量序列的95%及97.5%为极端事件阈值。③赵庆云等<sup>[23]</sup>使用面积权重法、降水量距平百分率、暴雨次数的面积百分率等来研究中国西北地区东部的极端降水事件。④张金玲等<sup>[24]</sup>定义的极端降水指数包括日最大降水(日最大降水总量)、5 d最大降水(连续5 d的最大降水总量)、中雨日数(年内大于10 mm的降水天数)、大雨日数(年内大于20 mm的降水天数)、非常湿天(超过95%降水百分数的总降水量)、极端湿天(超过99%降水百分数的总降水量)。其中最大降水(日最大降水总量)、5 d最大降水(连续5 d的最大降水总量)属于绝对指数,非常湿天(超过95%降水百分数的总降水量)、极端湿天(超过99%降水百分数的总降水量)属于百分率指数,中雨日数(年内大于10 mm的降水天数)、大雨日数(年内大于20 mm的降水天数)属于阈值指数。⑤而志红等<sup>[25]</sup>定义的极端降水指数又有一些不同,选取的是日降水强度指数(SDII)、最大持续无雨期指数(CDD)、大雨日数指数(RIO)、连续5天最大降水量指数(RSd)和极端降水贡献率指数(R95t)。⑥李威等<sup>[26]</sup>利用 $\Gamma$ 分布函数来定义极端降水事件,即由 $\Gamma$ 分布函数对各台站的逐日降水量历史序列进行拟合,取概率密度为95%的日降水量作为该站极端降水量的阈值。⑦杨金虎等<sup>[27]</sup>根据每一个测站的日降水量定义了不同台站极端降水事件的阈值,即把1971-2000年逐年日降水量按升序排列,将第95个百分位值的30a平均值定义为极端降水事件的阈值,当某站某日降水量超过了该站极端降水事件的阈值时,就称该站该日出现了极端降水事件。⑧苏布达等<sup>[28]</sup>采

用年最大值抽样法(AM)与超门限峰值抽样法(POT)来选取降水极值序列。

由于气候类型存在明显的地域性差异,极端降水事件指数的定义既要考虑绝对降水量,又要兼顾相对降水量。世界气象组织(WMO)气候学委员会(CCL)及气候变率和可预报性研究计划(CLIVAR)推荐了50个极端气候指数<sup>[29]</sup>(<http://www.eca.knmi.nl>)作为目前研究中的通用指数。另外采用百分位的方法定义每个格点或台站的极端降水事件的阈值也已被大多数学者认可和采用,具体做法如下:把日降水量序列按升序排列,取日降水量 $\geq 0.1$  mm的子样本的第95个百分位值,定为极端降水阈值,作为确定极端降水事件的标准。

### 1.2 极端洪涝的定义

极端洪涝事件多是由于极端降水事件引发的。极端洪涝事件可以采用洪量作为标准,具体而言,可以用最大1 d洪量、最大3 d洪量、最大5 d洪量或最大7 d洪量作为标准,对于某一具体地区和站点而言则需要加以选择。如在小流域可以使用最大1 d洪量,但对于较大流域,一次极端洪涝的发生大多数是由于多日连续的强降水引起,采用最大1 d洪量作为标准不是很合理,然而时间取得越长极端洪涝值的标准就越高,标准过高会导致部分本来会引起极大损失的洪水极值漏检,所以对于较大流域,综合考虑可以采用最大3 d洪量或最大5 d洪量作为极端洪涝的标准比较合理。

其次,极端洪涝事件也可以采用洪峰流量作为标准,将洪峰流量排频,使用百分位值的方法,定义极端洪峰流量阈值,作为极端洪涝的标准。

另外,极端洪涝事件还可采用水位作为标准,把极值洪水事件和可能引起的社会经济损失联系起来。其中,一是采用一个固定的水位来定义,比如针对某一河段或护堤的防汛水位,二是采用排频的水位,使用百分位值方法,定义极端水位阈值。

对于极端洪涝事件,国内开展的研究并不多见。毛德华等<sup>[30]</sup>根据近50a来湘江流域洪涝灾害造成的经济损失和人口伤亡统计资料,定义并计算了用来度量洪涝灾害严重程度的综合指标——洪涝灾度,即在一次洪涝灾情中,选用死亡人数、受伤人数和直接经济损失值这3个特征量作为划分洪涝灾度的指标,计算公式为 $G = \lg DHE - 5$ ,式中 $G$ 表示洪涝灾度, $D$ 表示死亡人数(人), $H$ 表示受伤人数, $E$ 表示直接经济损失(10<sup>4</sup>元)。

### 1.3 极端干旱的定义

由于干旱是一种复杂的气象现象,干旱的出现及持续与下垫面的状况关系非常密切,所以,目前不同的研究领域对干旱的定义和强度并没有一个统一的标准。据世界气象组织(WMO)1980年的统计,各种应用的干旱指数有55种之多。定义一个客观的干旱指数并能较好的反映干旱程度是干旱研究的一个基本问题<sup>[31]</sup>。常用的干旱指数可以分为3类:①单因素指数。主要有降水距平、降水距平百分率、历史干旱分级描述指标、土壤湿度干旱指数等,这类指数的特点是以单个要素的值或其距平值的大小作为干旱的衡量标准。虽然简单易行,但把干旱这种复杂的综合现象,简单归结为一个要素的影响,是不够全面和完善的。②简单多因素综合指数。主要有降水量-蒸发量、蒸发量/降水量、降水量-作物需水量、作物需水量/降水量、水分供求差(比)、土壤水分亏缺量等,这类指数一般考虑了两个或更多的要素,而且以它们之间的差值、比值、百分值及组合值作为衡量标准,计算简单,涉及的要素值易于查找,但是这类干旱指数往往有明显的针对性和适用范围,因而同样缺乏普适性。③复杂综合指数。这类指数又可细分为两类,一类从因子上说是单因子指数,它由降水的特点和变化特征,经过复杂计算定义出指数,如降水异常指数(RAI)<sup>[32]</sup>、Bhalme和Mooley干旱指数BMDI<sup>[33]</sup>、标准化降水指数(SPI)<sup>[34]</sup>等;另一类在资料处理和计算程序上较前两类复杂,一般都包含两个以上的要素,并且考虑了水分平衡过程或热量平衡过程,如帕尔默干旱指数(PDSI)<sup>[35]</sup>、表层水供应指数(SWSI)<sup>[36]</sup>、重构干旱指数(RDI)<sup>[37]</sup>、地表湿润指数(H)<sup>[38]</sup>等。Byun等<sup>[39]</sup>曾列表比较了这些干旱指数的特点。

对于不同的领域,干旱的定义各不相同而且种类较多,可以参考这些干旱的定义,综合考虑土壤水分、供水、人类需水指标(考虑对社会经济的影响和损失)、人类活动等,提出一套适用的干旱指标体系,再采用评分的办法,最后依据研究的区域划分出干旱的等级和程度(比如轻微、中等、严重、极端干旱),进而可以判断和定义出极端干旱。

## 2 极值分布函数在极端水文事件研究中的应用

由于气候系统和水文系统不但具有确定性的

一面,更具有不确定性一面,导致在一个相当长时期内,动力数值模式的不完善性是难以克服的<sup>[40]</sup>。若想在庞大的气候和水文资料中分析归纳气候变化下的极端水文事件的时空分布规律和演变趋势,判断其成因或据以预测未来的水文极端事件,除了动力数值模拟方法以外,应用概率统计学理论与方法,利用历史观测记录的信息建立各种适当的统计模型是研究极端水文事件的另一种途径。从概率意义上讲,人们可以借助于统计推断的手段寻求水文极值的概率分布模型,推估具有小概率的可能的水文极端值,从而可以进行极端水文事件对气候变化的响应和预测研究,推断出极值序列的重现期。

气象学家和水文学家通常运用广义极值分布模型(General Extreme Value, GEV)拟合历史降水和径流资料,估算不同重现期的最大值<sup>[41]</sup>。另外,对数正态(Log-normal)、皮尔森Ⅲ(PearsonⅢ,简称PⅢ)、对数皮尔森Ⅲ(Log-PearsonⅢ)等分布作为“标准分布”也得到广泛运用<sup>[41]</sup>。近年来,随着极值统计理论的发展,4参数的Kappa分布和5参数的Wakeby分布等多参数分布函数的应用领域逐步拓宽。由于它们可以模拟2参数与3参数分布函数的各类形状,因而具有很强的灵活适应性<sup>[42]</sup>。在目前的水文极值和极端事件的研究中,常用的概率分布模式如下。

### 2.1 PearsonⅢ分布

PearsonⅢ(PⅢ)分布<sup>[43]</sup>的概率密度函数和保证率分布函数分别为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} \quad \alpha > 0, x \geq x_0 \quad (1)$$

$$P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - x_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-x_0)} dx \quad (2)$$

式中:参数 $x_0$ 为随机变量 $x$ 所能取得最小值; $\alpha$ 称为形状参数; $\beta$ 称为尺度参数; $\Gamma(\alpha)$ 是 $\alpha$ 的Gamma函数。降水量的日分布符合两参数的 $\Gamma$ 分布,它是PⅢ分布的特例。其密度函数为:

$$P(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \quad (3)$$

彭量等<sup>[43]</sup>针对工农业生产中极端气候事件的评估问题,根据梅县站历年7月的降水量资料,拟合梅县站单月的降水量的PⅢ分布曲线,求出梅县多年一遇的单月降水量。王大钧等<sup>[44]</sup>建立日降水量混合模型,研究了 $\Gamma$ 分布状态下构成参数的变化对极值事件的影响问题,即极值事件对各个参数的

敏感性研究。

PⅢ型分布曲线是在水文频率分析中经常使用的拟合较好的理论频率曲线。中国1993年颁布的《水利水电工程设计洪水规范》规定频率曲线的线型一般采用PⅢ型。但由于水文极端事件和一般的原始水文序列不同,水文极端事件具有更强的复杂性、非稳态性和不确定性,而PⅢ分布的参数较少,对于水文极值的分析和模拟适用性不强。

### 2.2 广义极值分布(GEV)

广义极值分布(General Extreme Value, GEV)包含Gumbel、Frechet及Weibull分布,是一个较为完整的非退化的极值分布体系,GEV是最大值稳定分布,其分布函数为:

$$\phi(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \gamma \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \right\} I(x) \quad (4)$$

式中: $\mu$ 、 $\sigma$ 分别为尺度参数和位置参数; $\gamma$ 为形状参数; $x$ 为随机变量; $I(x)$ 为示性函数,即:

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{当} \left[ 1 + \gamma \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] > 0 \text{时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

当 $\gamma=0$ 时,为Gumbel分布,即极值I型;当 $\gamma>0$ 时,为Frechet分布;当 $\gamma<0$ 时,为Weibull分布。

张婷<sup>[45]</sup>利用广义极值分布(GEV)模型拟合了华南地区前、后汛期降水量,表明GEV模拟华南地区的极端降水是适宜的。江志红等<sup>[46]</sup>利用Weibull分布拟合逐日降水的原始分布模式,并基于统计降尺度蒙特卡罗随机模拟方法,对中国东部区域各站逐日极端降水量在未来气候变暖条件下的响应特征进行统计数值试验,提取模拟序列的逐年极值,利用Gumbel分布,拟合得到极值的模拟概率分布。研究表明该方法适用于中国东部(105°E以东)地区,相对于单站极值拟合,区域极值的拟合效果更好。丁裕国等<sup>[47]</sup>引入概率加权法(Probability Weighted Moments, PWM)参数估计代替极大似然法,将Gumbel分布用于极端气候的拟合中。谢志清等<sup>[48]</sup>利用长江三角洲地区80个台站的逐日降水资料,发现长江三角洲日极值降水分布以Weibull分布最为普遍,一次连续降水过程以对数正态分布最为普遍。魏锋等<sup>[49]</sup>探讨了Gumbel分布拟合中国西北地区降水极值的适用性,结合随机模拟试验预测未来西北地区极端降水特征,结果表明采用Gumbel分布拟合西北地区极端降水是适宜的。蔡

敏等<sup>[50]</sup>根据近 40a 中国东部(105°E 以东)210 个站逐日降水资料,采用具有较高拟合精度的 L-矩参数估计方法,利用 Gumbel 分布和广义 Pareto 分布拟合中国东部极端降水的时空变化特征并对未来气候做预估,结果表明中国东部极端降水的分布能用 Gumbel 分布拟合,且采用 L-矩估计参数有较高的拟合精度。

众多学者的研究表明<sup>[45-50]</sup>,广义极值分布模型在拟合极端降水方面得到了较好的应用。它将 3 种分布统一到了一起,不必考虑原始分布的类型,能够避免单独采用某一种分布的不足。GEV 分布模式的拟合采用的极大值抽样方法都是 AM 年极大值法,事实上同一年份中出现极大值的随机性变率相当大,不同地区由于湿润程度不同,每年抽取一个最大值并不符合实际,抽样中可能会遗弃相当多的有用信息,同时也会混入一些虚假信息,因此在采用 GEV 分布之前对数据资料的审查和处理就显得尤其重要了。

### 2.3 广义 Pareto 分布

广义 Pareto 分布(Generalized Pareto Distribution, GPD)是 POT 稳定分布<sup>[51]</sup>,它根据给定的门限值筛选极值,建立达到某一临界值的极值分布。这种分布是一种专门描述“超过门限峰值”(POT)的极值分布,从应用意义上说,主要用于描述超过某特定临界值(即门限值)的全部观测值资料集的概率分布特征,该分布更加符合实际。由于其不需要选取逐年最大值,而是根据给定门限值确定多个极大值,所以增大了样本量。国际上目前多用实际资料统计读取 POT 频率(超门限年极值平均交叉率)。广义 Pareto 分布<sup>[52]</sup>的分布函数为:

$$F(x) = 1 - [1 - k(\frac{x-\varepsilon}{\alpha})]^{\frac{1}{k}} \quad k \neq 0, \varepsilon \leq x \leq \frac{\alpha}{k} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon$  称之为门限值;  $\alpha$  称之为尺度参数;  $k$  为线性参数或形状参数。

张金玲<sup>[53]</sup>采用广义 Pareto 分布模式拟合了中国极端降水的分布,并利用 PWM 方法估计模式参数,得出位置参数与均值及标准差的分布有很大的相似性,都呈现由东南向西北减小的分布特征,而尺度参数则相反。研究表明广义 Pareto 分布能较好的拟合极端降水的分布,且资料年份越长,效果越好。江志红等<sup>[54]</sup>研究发现中国东部地区夏季(5-9 月)逐日极端降水量基本上符合广义 Pareto 分布模式。程炳岩等<sup>[55]</sup>引进了广义 Pareto 分布,借助于 L-

矩估计方法,模拟重庆地区极端降水事件,推算一定重现期的极端降水量分位数。

与 GEV 分布比较,广义 Pareto 分布模式的拟合一般采用 POT 抽样方法,由原始数据以给定的门限来抽取超门限峰值,大大增加了样本量,最大限度的利用了有极值分析意义的有用信息,提高了拟合精度,增强了参数估计的稳健性,但是如何合理选择门限值对于模拟结果影响很大,目前使用的平均剩余生命图等门限值选取方法还有待进一步改进和发展。

### 2.4 Wakeby 分布

Wakeby 分布函数没有确定形式,极大似然估计法难以估算其分布参数<sup>[56]</sup>。苏布达等<sup>[28]</sup>采用了多种分布来模拟长江流域极端降水,并采用 Hosking 于 1990 年提出的线性矩(L-moment),以估算逆分布函数形式给出的概率模型的参数<sup>[57-59]</sup>。对于 Wakeby 分布,5 参数的估计通过运用 Newton-Raphson 迭代过程,计算了总体线性矩与样本线性矩等式来获取<sup>[59]</sup>。研究表明对于长江流域极端降水拟合误差最小的为 Wakeby 分布、广义极值分布与广义帕雷托分布。其中广义极值分布拟合 AM 降水极值有良好效果,广义帕雷托分布拟合 POT 降水极值有良好效果,Wakeby 分布则具很强的适应性,模拟 AM 与 POT 序列均可以达到前两种模式的拟合程度,说明了长江流域降水极值分布符合 Wakeby 分布。

Wakeby 分布有 5 个参数,不同于其他分布至多包含 3 个参数,因此对于给定的一组资料,一般都能给出较好的拟合,但问题在于资料增加时,所得参数的稳定性是否良好,这值得做进一步研究<sup>[60]</sup>。

### 2.5 混合分布

徐天群等<sup>[61]</sup>以指数分布为例,提出用混合分布,即原始分布和尾分布,去拟合一组数据。具体来讲,原始分布反映随机变量的随机特性,尾分布就是用一个独立的分布(比如极值分布)去拟合原始分布的尾部。对于极端事件及一般事件的风险而言,混合分布所估计的值比单一指数分布估计的值更接近实际值。

(1) 指数分布与左尾 Gumbel 分布的混合分布

$$F(x) = k(1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}) + (1 - k)(1 - e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}}) \quad (7)$$

式中:  $0 < k < 1$ ,  $(1 - k)$  为左尾数据(极小值事件)所占的比例。

(2) 指数分布与右尾 Gumbel 分布的混合分布

$$F(x) = k(1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}) + (1 - k)(1 - e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}}) \quad (8)$$

式中: $0 < k < 1$ ,  $(1 - k)$ 为右尾数据(极大值事件)所占的比例。

由于原始分布能较好的反映一般事件的风险,尾分布能够较准确的反映极端事件的风险,所以混合分布不仅能反映一般的水文事件,也能反映极端水文事件。一般的原始分布对数据序列的中间部分拟合较好,而对尾部拟合较差,混合分布则可以克服此缺陷。当然,当原始分布对所注重的尾部拟合较好时,就没有必要使用混合分布了。

## 2.6 其他分布

在对长江流域极端强降水分布特征的统计拟合研究中,苏布达等<sup>[28]</sup>采用了4大类20种分布形式,利用长江流域147个气象站1960-2005年日降水极大值进行拟合。其中,有界分布模型包括贝塔分布、约翰逊SB分布、幂函数分布;无界分布模型包括柯西分布、Gumbel分布、逻辑分布;非负分布模型包括指数分布、疲劳寿命分布、佛罗滋分布、伽马分布、逆高斯分布、对数逻辑分布、对数正态分布、帕累托分布、瑞利分布、韦伯尔分布;广义分布模型包括广义极值分布、广义帕累托分布、广义逻辑分布和韦克比分布。通过K-S显著性水平0.05拟合优度检验的模式有约翰逊SB分布、Gumbel分布、疲劳寿命分布、佛罗滋分布、伽玛分布、逆高斯分布、对数逻辑分布、对数正态分布、韦伯尔分布、广义极值分布、广义帕累托分布、广义逻辑分布、韦克比分布等13种分布模型。其中拟合误差最小的为韦克比分布、广义极值分布与广义帕累托分布。

邵全喜、夏军等<sup>[62]</sup>采用扩展的3参数的BurrXII分布分别对中国丹江口水库的洪峰流量(采用POT法抽样)和珠江的年最大流量数据(采用AM法抽样)进行了拟合,均得出较好的拟合效果,扩展的3参数的BurrXII分布包括了广义Pareto分布,log-logistic分布以及GEV分布中的Weibull分布,它可以将POT抽样方法和AM抽样方法统一起来,显示出较好的普遍适用性。

## 2.7 极值分布函数比较

在极值理论应用方面,GEV和GPD分别是拟合样本AM序列与POT序列分布规律较适用的方法。GPD的最大优点在于直接由原始资料数据以给定门限值为标准来抽取超过该门限值的极大(或极小)值,即用所谓“超门限峰值POT”方法抽样,其所需资料年限大大节省,同时增加了极值的样本量,克服了GEV分布采用所谓“单元极值BM”或

“年极值AM”抽样方法的缺点。由于GPD参数的概括性(门限值、尺度参数、形状参数),在不同阈值下它与指数分布、Beta分布、Pareto分布具有对应关系,使应用更加方便灵活<sup>[3]</sup>。GPD分布能更好描述降水均值的空间变化,尤其在东北地区 and 西北地区的极小值,长江流域、华南地区的极大值地区,GPD的尺度参数分布和均值几乎一致<sup>[53]</sup>。试验表明,基于超门限峰值法(POT)的GPD不但计算简便,而且基本不受原始序列样本量的影响,具有全部取值域的高精度稳定拟合(包括高端厚尾部),与GEV模拟结果比,GPD具有更高精度的实用性和稳定性。根据GPD和GEV模型参数之间相互近似计算公式,估计两种分布模型所对应的重现期极值分位数,是有很高应用价值的方法<sup>[55]</sup>。

在使用GEV和GPD分布进行拟合时,抽样方法和阈值的选取很重要,直接关系到用于模型拟合的数据,影响到拟合的效果。近年来,Coles和Katz等<sup>[63-64]</sup>分别从理论上证明,在高门限的条件下,GEV与GPD两者参数的密切联系并将其深化为随点过程理论。

与GEV、GPD相比,5参数的Wakeby分布由于可以模拟2参数与3参数分布函数的各类形状。具有很强的适应性,模拟AM与POT序列均可以达到前两种模式的拟合程度。而扩展的3参数的BurrXII分布将AM抽样法和POT抽样方法统一了起来,具有较强的灵活性和普适性。

## 3 极端水文事件观测事实及模拟研究

基于20世纪后半叶的观测分析,中国最近50年极端事件变化的研究成果与IPCC科学评估报告的结论基本一致,即在气候变暖的背景下,极端降水发生频率和强度均有增加的趋势,干旱和洪涝的极端事件同时趋于增多。

### 3.1 极端降水研究进展

目前大多数学者通过对极端降水的观测研究指出,极端降水事件对于全球气候变化的响应十分敏感<sup>[65-68]</sup>。在全球变暖背景下,总降水量增大的区域其强降水事件极可能有明显增加的趋势,即使平均总降水量减少或不变,也存在着强降水量及其频次的增加现象。

中国极端降水变化的趋势与全球的趋势基本一致。最近50年,中国西部地区,尤其是西北地区

出现了降水的显著增长,极端降水天数增加。长江流域及其以南地区降水趋于增多,主要表现在极端降水日数呈增加趋势。华北地区降水趋于减少,主要表现为强降水日数减少。就全国平均而言,总的降水变化趋势并不明显,但雨日有所减少<sup>[9,69]</sup>。由此表明,降水总量不变或增加而频率减少意味着降水强度有加大趋势,其后果是洪涝与干旱变率加大。

对极端降水状况研究,主要集中在两个方面:

①极端降水的时空变化特征的研究。翟盘茂等<sup>[9]</sup>分析了中国过去45a的降水量、降水频率、降水强度等方面的极值变化趋势,发现中国最长持续降水日数极端偏多的范围显著缩小,出现持续降水极值可能性在趋于减少;年降水日数极端偏多的范围趋于变小、平均降水强度极端偏强的范围趋于增加,这可能会导致中国越来越多的地区降水趋于集中,引起干旱与洪涝事件趋于增多。②气候条件下的降水极值概率分布模式拟合。对此,国际上已有不少研究,但国内在这一领域研究不多。虽然也提出了一些气候极值的渐近分布,但其研究内容一般都局限于降水量或极端降水量本身的拟合,而很少涉及气候变化、人类活动等有关问题。丁裕国等<sup>[70]</sup>用广义 Pareto 分布拟合中国东部地区极端降水,研究超门限降水量的概率分布特征及其参数的空间分布特征,并在现在气候背景下对中国极端降水的重现期做出模拟预测,证明广义 Pareto 分布对中国东部极端降水有较高的拟合度和普遍的适应性。

### 3.2 极端洪涝研究进展

对于洪水极值的年际变化,目前多为定性研究或者采用频率分析和水文模型进行研究,而对于极端洪涝事件的特征研究则相对较少。

从历史资料分析,19世纪40年代、70年代和20世纪30年代、50年代是中国洪涝灾害频繁发生和灾害程度最为严重的时期<sup>[71]</sup>。刘九夫等<sup>[72]</sup>利用中国主要外流区(太平洋和印度洋流域)近100年较大河流175个水文站的特大洪水洪峰流量探讨了洪峰流量发生的年代际变化,结果表明中国外流区20世纪30年代、50年代、60年代、90年代为暴雨洪水极值高发期,而40年代、70年代则为暴雨洪水极值的低发期。王家祁等<sup>[71]</sup>的研究表明暴雨洪水集中分布在东部季风区,中国大陆第二阶梯与第三阶梯过渡地带是大面积暴雨洪水集中分布和频次高发区,成为大江大河洪水主要来源地区;西部干旱和半干旱地区,灾害性洪水主要由短历时局地性暴雨形成,中小河流可以形成极大洪峰流量,局部地区

造成严重灾害。仇蕾等<sup>[73]</sup>分析了极端洪水灾害的自然属性与社会属性,认为极端洪水灾害损失具有时空分布的特性,并借鉴空间信息格网技术,分别形成了极端洪水水文特性格网与社会经济特性格网,并将其叠加得到具有空间拓扑关系和属性信息的基于GIS的极端洪水损失空间信息格网模型,有效地反映了极端洪水灾害的时空特性。

### 3.3 极端干旱研究进展

在全球气候变暖,极端干旱事件有所增加的背景下,旱灾所影响的深度和广度将可能进一步增加,而旱灾的突发性将有可能增强。鲍艳等<sup>[74]</sup>为了检验区域气候模式 RegCM3 在西北地区的模拟能力,对2001年夏季西北地区极端干旱事件进行了模拟,结果表明模式能很好地再现西北地区主要的环流特征和温度及降水的变化情况。马柱国等<sup>[75]</sup>利用中国1951-2000年的月降水和月平均气温构造了一个适合于研究中国北方地区地表干湿状况的地表湿润指数,以此为基础对中国北方地区极端干旱的分布特征进行深入的研究。结果指出:在东北和华北地区,近10年极端干旱频率显著增加,是近百年少有的大范围高强度的极端干旱频发期,而这些地区极端湿润发生的频率相对减少。和温度变化趋势比较发现,极端干旱的频发区往往对应增温明显的地区。杨杰等<sup>[76]</sup>对中国614个常规观测站1960-2007年资料进行统计分析,揭示了48年来中国干旱破纪录事件的强度特征。根据破纪录事件的相关概率理论,提出了适用于任意分布下的计算破纪录事件发生强度和时间的公式,并推导了在高斯分布情况下的破纪录事件强度和时间的理论值计算公式,并对中国未来可能发生的干旱破纪录事件进行了预测评估,给出了未来各地区再次发生干旱破纪录事件强度和时间的期望值。侯威等<sup>[77]</sup>研究了河北、山西、黄河中下游、江淮和西北东部地区531年极端干旱事件的概率,采用古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量和500年来太平洋年代际涛动指数进行了对比分析。

## 4 结论与展望

综上所述,气候变化下极端水文事件的研究是近年来发展起来的与地学领域诸多学科密切相关的新兴交叉研究方向。国际上和国内的相关部门开展了一系列的气候变化下极端水文事件研究的科学计划,科学工作者们也取得了一些研究成果,

但总体上尚处于起步阶段,关于极端水文事件的定义及其内涵尚未形成完整的概念体系及理论框架,因此完善极端水文事件的概念及其研究的理论方法已迫在眉睫。目前研究成果还大都停留在理论层面,可供实际应用的不多,因此需要在如下方面加强研究:

(1) 极端水文事件问题作为一个较新的研究方向,研究成果尚不够系统深入。从已有成果看,极端降水问题研究得相对比较充分,但关于极端洪涝问题、极端干旱问题等的研究成果相对较少。特别是极端洪涝事件和极端干旱事件的定义还没有一个统一的标准,因此建立极端水文事件的定义及其指标体系是目前首要解决的问题。

(2) 目前对极端水文事件问题的研究还大都停留在极端水文事件出现频率、持续时间、强度等规律的时空变化的统计分析和定性研究层面,如何深入研究全球变暖背景下极端水文事件的形成机理;如何改进和发展极值理论和方法,利用极值分布函数、条件极值、破纪录事件等概率分布理论,模拟出极端水文事件这一非稳态序列,进而建立极端水文事件的可预测系统,尚需大量的研究工作。

(3) 鉴于目前气候模式尚不能较准确模拟极端气候事件及其概率,需要完善和改进气候数值模式,提高气候模式对极端水文事件的模拟能力,预估现在到未来百年内气候变化背景下极端水文事件的发展趋势。另外可以根据目前气候条件下极端水文事件发生的概率以及未来气候变化的预估结果,采用各种降尺度技术与随机模拟相结合的方法,有可能为预估未来不同气候情景下极端水文事件及其参数的变化,提供一条新的途径<sup>[63]</sup>。

(4) 从全球流域行动计划和流域水系统的观点出发,气候变化对水文极端事件的影响和水文极端事件对气候变化的响应与预测研究是气候变化与极端事件研究中的重要内容和研究的进展方向之一。

(5) 极端水文事件研究中存在诸多不确定性问题,如观测资料和历史代用资料的不确定性,气候模式模拟和预测的不确定性问题,因此如何减少和描述极端水文事件中不确定性问题将是今后重点研究的课题之一。

## 参考文献

[1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis// Contribution of Working Group I to the Fourth Assess-

ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

- [2] 封国林, 杨杰, 万仕全, 等. 温度破纪录事件预测理论研究. 气象学报, 2009, 67(1): 61-74.
- [3] 丁裕国, 郑春雨, 申红艳. 极端气候变化的研究进展. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(6): 1-5.
- [4] Houghton J T, Filho L G M, Callander BA, et al. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5] Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes, Climate Change, 1999, 42: 3-7.
- [6] 赵其庚, 赵宗慈. 水文气象安全问题国际会议简介. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 307.
- [7] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. Climate Change, 2007, 81(S1): 71-95.
- [8] 姚凤梅, 张佳华. 1981-2000年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 37-39.
- [9] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.
- [10] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 267-272.
- [11] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征. 灾害学, 1999, 14(1): 54-59.
- [12] 闵岫, 钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究. 水科学进展, 2008, 19(6): 763-761.
- [13] 龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238.
- [14] 姜彤, 苏布达, Marco G. 长江流域降水极值的变化趋势. 水科学进展, 2008, 19(5): 650-655.
- [15] Zhang Xuebin, Hegerl G, Zwiers F W, et al. Avoiding inhomogeneity in percentile: Based indices of temperature extremes. Journal of Climate, 2005, 18(11): 1641-1651.
- [16] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D05109.1-D05109.22.
- [17] 王鹏祥, 杨金虎. 中国西北近45a来极端高温事件及其对区域性增暖的响应. 中国沙漠, 2007, 27(7): 649-655.
- [18] 李庆祥, 江志红, 黄群, 等. 长江三角洲地区降水序列的均一性检验与订正试验. 应用气象学报, 2008, 19(2): 219-226.
- [19] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近40年我国极端温度变化趋势和季节特征. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-35.
- [20] 王志福, 钱永甫, 林惠娟. 区域海气耦合模式对我国极



- 端降水模拟分析. 高原气象, 2008, 27(1): 113-114.
- [21] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [22] Wang Y Q, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): L09707, doi:10.1029/2005GL022574.
- [23] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904-909.
- [24] 张金玲, 王冀, 甘庆辉. 1961-2006年江淮流域极端降水事件变化特征. 安徽农业科学, 2009, 37(7): 3089-3091.
- [25] 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7个IPCCAR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估. 大气科学, 2009, 33(1): 109-120.
- [26] 李威, 翟盘茂. 中国极端强降水日数与ENSO的关系. 气候变化研究进展, 2009, 5(6): 336-342.
- [27] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.
- [28] 苏布达, 姜彤, 董文杰. 长江流域极端强降水分布特征的统计拟合. 气象科学, 2008, 28(6): 625-629.
- [29] 施能, 陈绿文, 封国林. 1920-2000年全球6-8月陆地旱涝气候变化. 气象学报, 2003, 61(2): 509-515.
- [30] 毛德华, 李景保, 龚重惠, 等. 湖南省洪涝灾害研究. 长沙: 湖南师范大学出版社, 2000.
- [31] 卫捷, 马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. 地理学报, 2003, 58(增刊): 117-124.
- [32] Van Rooy M P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Nntos*, 1965(14): 43-48.
- [33] Bhalme H N, Mooley D A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8): 1197-1211.
- [34] Guttman N B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 113-121.
- [35] Palmer W C. Meteorological Drought. U.S. Weather Bureau, 1965.
- [36] Shafer B A, Dezman L E. Development of a surface water supply index(SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow pack runoff areas//Proceedings of the Western Snow Conference, 1982: 164-175.
- [37] Weghorst K M. The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. North American Water and Environment Congress & Destructive Water, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1996: 637-642.
- [38] Ma Z C, Fu C B. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semiarid areas of northern China. *Globe Planet Change*, 2003, 37(3-4): 189-200.
- [39] Byun H R, Wilhith D A. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 1999, 12(9): 2747-2755.
- [40] 丁裕国, 江志红. 极端气候研究方法导论. 北京: 气象出版社, 2009.
- [41] WMO. Selection of distribution types for extremes of precipitation. *Operational Hydrology Report No.15*. Geneva, Switzerland, 1981.
- [42] Park J S, Junghs, Kimr S, et al. Modelling summer extreme rainfall over the Korean Peninsula using Wakeby distribution. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(11期): 1371-1384.
- [43] 彭量, 刘蕾, 刘雄辉, 等. 应用皮尔森—Ⅲ分布估算梅县7月极端降水量. 气象水文海洋仪器, 2008(4): 62-64.
- [44] 王大钧, 程炳岩, 丁裕国. 气候平均状况的变化对气候极值出现概率的影响. 南京气象学院学报, 2003, 26(2): 263-269.
- [45] 张婷. 华南地区强降水概率分布特征及环流背景[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- [46] 江志红, 丁裕国, 蔡敏. 未来极端降水对气候平均变暖敏感性的蒙特卡罗模拟试验. 气象学报, 2009, 67(2): 273-279.
- [47] 丁裕国, 刘吉峰, 张耀存. 基于概率加权估计的中国极端气温时空分布模拟试验. 大气科学, 2002, 28(5): 771-782.
- [48] 谢志清, 姜爱军, 丁裕国, 等. 长江三角洲强降水过程年极值分布特征研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(2): 267-274.
- [49] 魏锋, 丁裕国, 王劲松, 等. 基于概率加权估计的西北地区极端降水时空分布模拟试验. 地球科学进展, 2005, 20(特刊): 65-70.
- [50] 蔡敏, 丁裕国, 江志红. 我国东部地区极端降水时空分布及其概率特征. 高原气象, 2007, 26(4): 309-318.
- [51] 史道济. 实用极值统计方法. 天津: 天津科学技术出版社, 2006.
- [52] Brabson B B, Palutikof J P. Tests of generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speed. *Journal of Applied Meteorology*, 2009, 39(9): 1627-1639.
- [53] 张金玲. 当前气候背景下的极端降水统计模拟实验研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [54] 江志红, 丁裕国, 朱莲芳, 等. 利用广义帕雷托分布拟合中国东部日极端降水的试验. 高原气象, 2009, 28(3): 573-579.
- [55] 程炳岩, 丁裕国, 张金玲, 等. 广义帕雷托分布在重庆暴雨强降水研究中的应用. 高原气象, 2008, 27(5): 1004-1009.
- [56] 屠其璞, 丁裕国. 气象应用概率统计学. 北京: 气象出版社, 1984.
- [57] 朱国庆, 张维, 张小薇, 等. 极值理论应用研究进展评析. 系统工程学报, 2001, 16(1): 72-77.
- [58] 蔡敏, 丁裕国, 江志红. L-矩估计方法在极端降水研究中的应用. 气象科学, 2007, 27(6): 597-603.

- [59] Hosking J R M, Wallis J R. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moment. London: Cambridge University Press, 1997.
- [60] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [61] 徐天群, 徐新河, 陈跃鹏. 处理一般事件及极端事件风险的混合分布. 黄冈师范学院学报, 2002, 22(3): 4-7.
- [62] Shao Quanxi, Wong Heung, Xia Jun, et al. Models for extremes using the extended three-parameter Burr XII system with application to flood frequency analysis. Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques, 2004, 49(4): 685-702.
- [63] Coles S G. An introduction to Statistical Modeling Extreme Values. London, UK: Springer Verlag, 2001.
- [64] Katz R. W, Brush G S, Parlange M B. Statistics of extremes: Modeling ecological disturbance. Ecology, 2005, 86(5): 1124-1134.
- [65] 江志红, 丁裕国, 陈威霖. 21世纪中国极端降水事件预估. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 202-206.
- [66] Meehl G A, Karl T R, Easterling D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 413-416.
- [67] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Ya, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3):417-425.
- [68] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 231-241.
- [69] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951-2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [70] 丁裕国, 张金铃, 江志红. 基于多状态Markov链模式的极端降水模拟试验. 气象学报, 2007, 67(1): 21-27.
- [71] 王家祁, 骆承政. 中国暴雨和洪水特性的研究. 水文, 2006, 26(3): 33-36.
- [72] 刘九夫, 张建云, 关铁生. 20世纪我国暴雨和洪水极值的变化. 中国水利, 2008, 2: 35-37.
- [73] 仇蕾, 王慧敏, 马树建. 极端洪水灾害损失评估方法及应用. 水科学进展, 2009, 20(6): 869-875.
- [74] 鲍艳, 吕世华, 陆登荣, 等. RegCM3模式在西北地区的应用研究I:对极端干旱事件的模拟. 冰川冻土, 2006, 28(2): 164-165.
- [75] Ma Z G, Dan L, Hu Y W. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years. Journal of Geographical Science, 2003, 58(supplement): 69-74.
- [76] 杨杰, 侯威, 封国林. 干旱破纪录事件预估理论研究. 物理学报, 2010, 59(1): 664-675.
- [77] 侯威, 杨萍, 封国林. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因. 物理学报, 2008, 57(6): 3932-3940.

## Progress in the Study of Extreme Hydrologic Events Under Climate Change

ZHANG Liping<sup>1</sup>, DU Hong<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>2</sup>, XU Xia<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;  
2. The Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Extreme hydrologic events such as floods and droughts caused by abnormal climate change and increased risks of water disasters are becoming the major challenges to the survival of the people survival. In recent years, the research on the change trend, mechanisms, response and prediction of the climate change of the extreme hydrologic events in basins under climate change is drawing more and more attention from the scholars at home and abroad. This paper begins with the definitions of extreme hydrologic events, and then analyzes and reviews the research methods, and hydrologic extreme value distribution, as well as the observation and simulation of extreme hydrologic events. On this basis, this paper makes a discussion on the problems in the present research. The directions of further research are also provided.

**Key words:** climate change; extreme hydrologic events; extreme precipitation; extreme flood; extreme drought; distribution of extreme values

本文引用格式:

张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370-1379.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>