

王刚, 肖伟华, 路献品, 等. 气候变化对旱涝事件影响研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 142–148. [Wang Gang, Xiao Weihua, Lu Xianpin, et al. Advances in the Research on the Impact of Climate Change on Drought and Flood Events [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 142–148.]

# 气候变化对旱涝事件影响研究进展\*

王 刚<sup>1,2</sup>, 肖伟华<sup>1,2</sup>, 路献品<sup>3</sup>, 刘少华<sup>1,2</sup>

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;  
3. 中国平煤神马能源化工集团天成实业分公司, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:** 从气候变化对水循环及水资源系统影响的角度剖析了气候变化对旱涝事件影响的驱动机制, 从气候变化对天气系统、下垫面条件、经济社会需水量等方面的影响梳理了现阶段国内外相关研究进展, 并总结了气候变化对旱涝事件影响的评估方法。结果表明: 气候变化导致大尺度的大气环流异常, 容易引起大范围的持久性旱涝事件; 气候变化还可以通过影响地表覆被、土壤特性等下垫面条件加剧旱涝事件的风险; 同时, 气候变化还将影响经济社会需水量及过程, 加剧水资源供需矛盾。

**关键词:** 气候变化; 旱涝事件; 驱动机制; 水循环; 影响评估

**中图分类号:** P42; X43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000–811X(2014)02–0142–07

**doi:** 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.02.027

以全球变暖为主要特征的气候变化以及全球范围内旱涝灾害频发、群发的不利态势已经成为各国政府和相关学者关心的热点问题。一般认为气候变化主要包括气温升高和降水格局的改变。气象监测证实了全球变暖的趋势: 自从1990年以来全球平均气温增加了0.8℃, 从1880年有监测数据以来记录到的12个最暖的年份都发生在1990–2005年间<sup>[1]</sup>。气候模式对21世纪的模拟结果一致显示, 降水将在高纬和部分热带地区增加, 而在中低纬度和部分亚热带地区减少<sup>[2]</sup>。降水格局的改变, 导致一些地区洪水发生强度与频率增加的同时, 区域性的重大干旱也在加剧。在许多山区都观测到冰线后退、永久性冻土萎缩以及降雪减少等气候变化事实, 导致河流情势的显著改变, 在影响到可利用水资源量的同时, 增加了下游地区的洪水风险<sup>[3]</sup>。气候变化导致更多极端降水事件的发生, 一些流域的研究表明在降水总量减少情况下发生的局部降水强度加大的现象, 这势必会同时增加洪涝和干旱的风险<sup>[4]</sup>。

洪涝灾害是世界范围内15种对人类产生严重影响的最严重的自然灾害之一, 往往会带来巨大伤亡和财产损失<sup>[5]</sup>。而干旱则会在较大范围内发生并持续较长时间, 对经济社会以及生态环境造成严重影响<sup>[6]</sup>。我国因特殊的地理位置、地形和

海陆分布特征, 旱涝灾害发生频繁, 损失严重。1998年我国长江流域、松花江和嫩江流域的特大洪涝灾害共造成2600亿元的国民经济损失<sup>[7]</sup>。我国发生重特大干旱的频次从1979年前的25.8%提高到1980年后的48.4%, 严重干旱年旱灾经济损失约占GDP的2.5%~3.5%<sup>[8]</sup>。研究气候变化对旱涝事件影响机理不仅具有科学意义, 而且对于应对气候变化、减少灾害损失还具有重要的现实意义。

## 1 气候变化对旱涝事件影响的驱动机制

一般认为, 干旱是一种自然的气候变异现象, 当降水在较长的时间里显著低于正常值, 即发生干旱并最终会导致缺水<sup>[9]</sup>, 随着干旱发展, 持续性缺水对经济社会和生态环境的影响程度加剧, 干旱逐渐由资源问题演变成灾害问题。洪涝灾害则通常是由大气降水偏强引发江河洪水泛滥, 或由长期降水产生积水淹没低洼地区, 并带来生命和财产损失<sup>[10]</sup>。干旱与洪涝事件不是独立发生的, 随着气候变化影响的深入, “旱涝并存、旱涝急

\* 收稿日期: 2013–10–08

修回日期: 2013–11–30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB951102); 国家自然科学基金面上项目(51279207)

作者简介: 王刚(1985–), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要从事气候变化下水资源综合应对研究。E-mail: Gangwnan@163.com

转”的现象时有发生<sup>[11-12]</sup>。以下我们将从气候变化对水文与水循环过程及水资源系统影响的角度阐述气候变化对旱涝灾害的驱动机制。

20 世纪的观测事实表明,在过去的几十年里,全球气候变化在水文循环改变中扮演着越来越重要的角色。水文系统对气候变化的响应关系是由一系列的物理机制引起,最终导致总的大气湿度的增加并伴随着蒸发、水循环以及其它过程要素的变化<sup>[13]</sup>。首先,旱涝的发生源于降水异常,直接原因是天气系统的异常。全球变暖背景下,大气层中温室气体的辐射强迫增加,大气持水能力增强,改变了大气的动力过程和热力过程,引起大气环流异常,从而导致区域降水特征发生变化,极端降水事件增加,从而引发洪涝灾害。短时高强度的暴雨或雨强不大但历时较长的降雨过程均可能引发洪涝灾害。笼罩面积较小降雨产生局部洪涝,而大范围的降雨可能引发流域性洪水。气候变化也会引起植被、土壤等下垫面条件的改变。植被的分布、类型、规模、质量以及土壤湿度、结构上的变化都会导致下垫面对径流的调蓄能力、地表粗糙度等特征的显著变化,从而影响产汇流过程。降水特征与产汇流过程的改变,可能使水资源的时空分布更加不均匀,水资源调配难度增大,可利用水资源量减少,水资源系统稳定性降低,从而增加干旱和洪水发生风险。由地面反射率等下垫面特性改变引起的地表潜热增加,会导致蒸散发增强,从而加剧区域干旱。同时,大气持水能力的增强意味着大气对地面形成强烈的水分需求,同样会加剧土壤蒸散,导致土壤含水量

持续下降。而在水资源系统的需求侧,气候变暖在一定程度上可能会改变经济社会经济需水量和需水过程(比如作物物候期的变化、生长季延长等),可进一步改变水资源的供需关系,加剧水资源的供需矛盾,缺水率不断增加必然会导致干旱事件发生。此外,值得注意的是,气候变暖会导致土壤碳库的源、汇功能转化,增加向大气中的CO<sub>2</sub>排放,对气候变化形成正反馈。下垫面与天气系统之间的互相作用机制又会增加天气系统变异的不确定性<sup>[14]</sup>。图1是气候变化对旱涝事件驱动机制的概念模式图。

## 2 现阶段相关研究内容及进展

旱涝灾害的产生是在气候变化和人类活动共同影响下,由极端降水过程、下垫面的调节(土地利用格局变化、水利工程调节等)、承载体的脆弱性(经济社会系统应对洪涝事件的能力)等一系列因素综合作用的结果。本文基于气候变化对洪涝事件的驱动机制,主要从气候变化影响的角度分析,不考虑人类活动的影响;关注旱涝事件现象,而弱化旱涝灾害损失。

### 2.1 气候变化对天气系统的影响

大范围的持久性旱涝与气候变化导致的大气环流持续性异常存在必然的联系。一般而言,降水特性被认为是控制洪水等级及发生频率的关键因子<sup>[15]</sup>。而区域尺度上的降水变化往往与相应的大尺度的天气系统相关。大气环流特征与洪水频率的这种相关关系在中欧地区冬季洪水的研究中

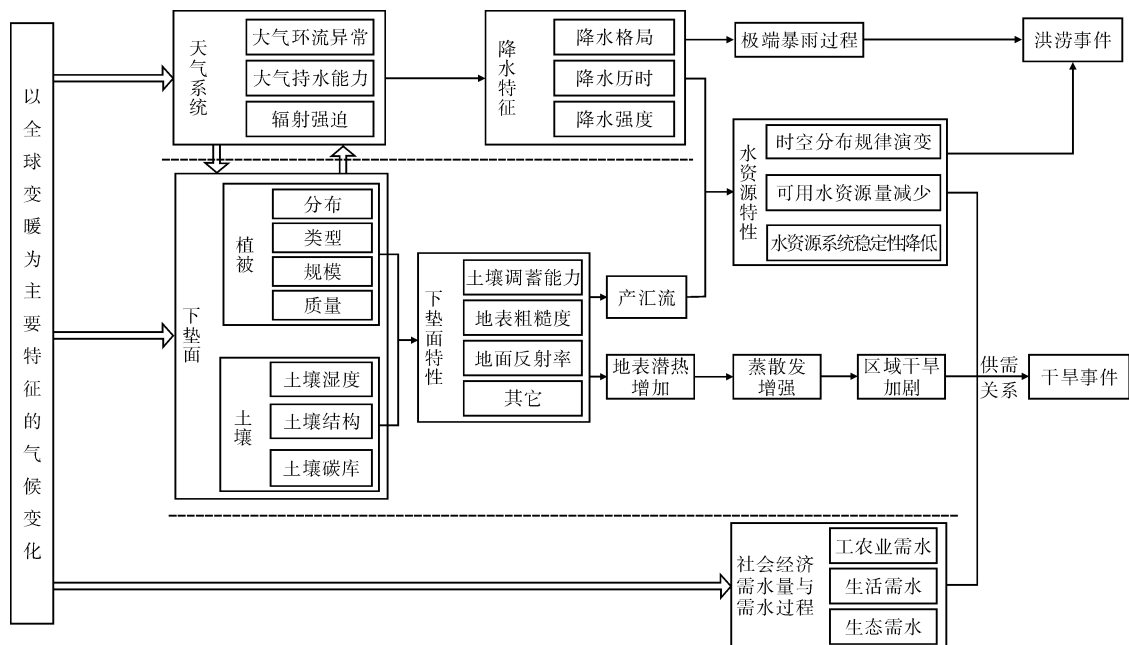


图1 气候变化对旱涝事件的驱动机制

也得到证实<sup>[16]</sup>。因此,大尺度大气环流特性的改变是洪水频率波动的决定性因素<sup>[17]</sup>。大气中的水汽和热量的增加,意味着暴雨将产生更大的峰值降水率,从而使得许多地区的洪涝加剧<sup>[18-19]</sup>。大气环流的异常,不仅引起降水总量的变化,还可以改变降水的格局<sup>[20]</sup>。环地中海地区以及欧洲、中南美洲和南亚的部分地区降水减少,加剧水资源危机;东亚地区虽然降水有所增加,但一般都发生在汛期,并不能增加旱季的可利用水资源量<sup>[21]</sup>。

李跃清<sup>[22]</sup>分析了青藏高原上空 100 hPa 高度场与其东侧地区夏季降水场的空间结构和相互关系,表明前期 10-12 月、1-4 月高度场大气环流的变化引起后期南亚高压状况异常,最终导致东侧地区旱涝灾害。张琼和吴国雄<sup>[23]</sup>分析了 1958-1999 年长江流域大范围旱涝的时空分布特征,发现南亚高压强度指数与长江流域降水有显著相关关系,二者的年代际变化趋势非常一致。黄荣辉等<sup>[10]</sup>人的研究成果也表明我国旱涝气候灾害年代际变化与东亚气候系统的环流异常分布的年代际变化密切相关。吴志伟等<sup>[24]</sup>分析了大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转的关系,发现了异常年的同期和早期大尺度大气环流异常特征。符淙斌<sup>[25]</sup>分析了干旱化形成的大尺度气候背景,深化了对干旱化机理的认识。李长顺等<sup>[26]</sup>通过对我国西南地区气流三维轨迹的模拟,研究了我国西南地区水汽输送机理,发现干旱期间气团位势降低不利于降水形成的基本特征。在降水总量变化趋势不明显,降水日数显著减少,降水过程存在强化趋势,长江及长江以南地区极端降水事件和洪涝灾害趋于频繁<sup>[27-28]</sup>。

## 2.2 气候变化对下垫面条件的影响

### 2.2.1 地表覆被条件

植被尤其是森林植被可以通过改变粗糙度、土壤湿度、土壤结构等下垫面条件影响产汇流过程,在蓄水保土减蚀中发挥重要作用。气候变化引发的造林与砍伐将会影响水量平衡、洪水的发生以及由加剧或降低的侵蚀带来的产沙量的变化<sup>[3,15]</sup>。作为全球变化的一部分,气候变化带来的气温与降水的变化将会改变能量、水和营养物的时空分布,增加自然扰动,改变自然过程以及生态系统的结构和功能,并改变植被的分布格局。由于树木具有较长的生命周期,不允许其对气候变化做出迅速的适应,因此森林系统对气候变化尤其敏感<sup>[29]</sup>。相对平均气候状况渐进式变化,极端事件(如大范围的干旱和热胁迫)往往会有对树

木的生长和存活产生更加显著的影响<sup>[30-31]</sup>。

水资源、营养物质、光、热资源和 CO<sub>2</sub> 的良好匹配性是决定森林生态系统健康和持续发展的关键性因素。CO<sub>2</sub> 浓度的增加和气候变暖在短-中期时间尺度上会对林木的生长和木材生产产生积极的效应。但另一方面,增加的干旱和扰动风险将导致负面效应的发生,在东欧和南欧地区这些负面影响很可能会超过其正面效应。这样,由于受到其它限制性因素比如可获取营养物等的影响,树木生长速度并不会随着光合作用的增强而相应增加<sup>[32]</sup>。气候变化也会带来生物的(虫害、疾病爆发)或非生物的扰动(火灾、风暴发生频率及强度的改变等),增加森林的病死率,降低其恢复能力,从而显著影响着森林系统<sup>[29,33-34]</sup>。气候变暖情景下增温加剧了土壤干旱化,降水和土壤含水量成为制约草原植被生长的决定性因素<sup>[35]</sup>。降水变率的增加比总量的变化对高草草原的影响更为严重,例如,旱季延长 50% 将降低 10% 的净初级生产力<sup>[36]</sup>。

然而,一般认为,土地利用类型的变化,尤其是森林覆被的变化,对于小洪水的影响更加显著<sup>[37]</sup>。而大江大河的洪水受天气系统因素的影响要比受上游山区流域土地利用改变的影响更为明显。Bioschl 等<sup>[38]</sup>认为土地利用类型对洪水的影响主要是尺度效应。在小流域尺度上,土地利用类型变化会显著改变径流过程,从而影响洪水强度和发生频率,而随着流域尺度增大,这种效应会逐渐减小<sup>[39]</sup>。

### 2.2.2 土壤的水文地质特性

土壤湿度是陆面过程研究中影响水文循环的一个重要参量,积累了地表水文过程的大部分信息<sup>[40]</sup>,控制着径流、蒸散发和深层渗漏之间的降水分配。通过改变土壤热容量和地表反射率以及向大气输送的潜热及感热通量分配,土壤湿度对于气候过程有一些其它方面的影响,尤其是对土壤温度、边界层稳定性以及一些局地的降水的影响等<sup>[41]</sup>。气候变化与土壤湿度两者之间是相互作用,相互影响的,但在年代际时间尺度上,土壤湿度则更多地受到气候变化的影响<sup>[42]</sup>。干燥的土壤环境会产生一些负面的反馈效应,比如加剧高温热浪的影响和持续时间<sup>[43]</sup>,延长气候干旱的影响等<sup>[44]</sup>。

土壤水库可有效调节径流,对于防洪抗旱减灾意义重大<sup>[45]</sup>。土层深厚、土壤质地与孔隙结构良好的土壤,具有较大的有效库容和较强的调节功能。气候变化尤其是大范围长时间的高温少雨

环境会破坏土壤结构,降低其持水能力,导致干旱发生。而旱涝交替致使水土流失加剧则会严重损失土壤的有效库容,导致在丰水期地表集流快,径流模数大,产洪量高;而在枯水期水量减少,地表缺水时间延长,最终使水旱灾害交替演进,极大地增加成灾率和灾害损失<sup>[46]</sup>。

### 2.2.3 土壤有机碳库

由于温室气体浓度增加引起的全球气候变化已经在全世界达成广泛共识。土壤有机碳(SOC)是一个很重要的碳库。作为碳循环的关键环节,它可以缓解大气中CO<sub>2</sub>浓度的增加。据估计,世界上地下一米深土壤范围内的碳库有机碳储量达到1 000~3 000 Gt,这分别是大气碳库和生物碳库储量的大约3倍和4.5倍<sup>[47]</sup>。

气候变化也是土地利用类型变化的驱动力之一,进而影响到陆地生态系统中碳通量变化<sup>[48]</sup>。已经有证据表明,气温的升高和降水量变化已经影响到土壤碳循环过程,并显著地增加土壤向大气中的温室气体排放<sup>[47, 49]</sup>。如果土壤碳库没有其它碳输入, SOC 下降的趋势将会进一步增加。由于土壤碳库的巨大容量,它们对气候变化的积极反馈效应也是不容低估的。因为大气中CO<sub>2</sub>浓度的增加将会显著加剧气候变化<sup>[50-51]</sup>。另外,在高纬度地区,纬度和气候变化对土壤碳储量的影响占据主导地位,而在低纬度地区,植被(耕种,森林等)和地形的影响超过气候变化对土壤碳库的影响<sup>[52]</sup>。

### 2.3 气候变化对经济社会需水量的影响

气候变化在改变水资源的时空分布、增加水源供水随机特性的同时,也会增大需水的不确定性,使社会经济用水需求发生变化,进一步降低整个水资源系统的稳定性和可靠性<sup>[53]</sup>。

农业是最大的用水部门,而温度是影响作物蒸散发、进而影响灌溉需水量的最为重要的气象因素;气候变暖导致蒸散发的增加,加之降水格局的改变,未来如果不采取积极的减缓措施,灌溉需水量的增加将会进一步加剧水资源短缺<sup>[54-56]</sup>。同时,我国学者假定参照作物蒸散量是影响作物需水量的关键因子,设定气候要素变化情景或基于不同排放情景,对我国粮食主产区主要农作物需水规律的研究结果表明,气候变暖对冬小麦、夏玉米、棉花等作物生育期需水产生不同程度的影响,在一定程度上增加作物需水量<sup>[57-58]</sup>。而曹红霞等<sup>[59]</sup>对于关中地区主要作物需水量与相应生育期内气候因子的变化趋势的探讨发现,气候变化对农作物需水量的影响是气温、降水、风速、

日照时数等气象因子变化共同作用的结果,风速和日照时数的降低趋势在很大程度上抵消了由气温升高引起的冬小麦需水量的升高趋势,冬小麦生育期内降水量减少是导致净灌溉水量增加的主要原因。这表明研究成果的区域差异性和气候变化对农业需水影响的复杂性。区域性的变暖延长了作物潜在生长期,导致作物耕作制度的变化(播种提前、收获延迟等)以及水稻种植边界的北移<sup>[60]</sup>,比如我国西北地区棉花生长期在1983-2004年间相对于1970年代延长了9 d;水稻在黑龙江省的种植边界上限从48°N北移至52°N,种植面积大幅增加<sup>[61]</sup>。作物种植制度的变化必然导致作物需水规律的变化。

另外,据相关研究的初步分析<sup>[62]</sup>,在相对气温升高1℃、降水增加3%的前提下,我国农业用水将增加2.7%;气温每升高1℃将导致工业冷却用水增加1%~2%,生活用水量增加1%左右。同时,随着水面蒸发增大,生态需水量也将一定程度上增加。

### 2.4 气候变化对旱涝事件影响的评估方法

气候变化对洪涝事件影响的评估一般采用设置气候情景驱动水文模型的方法,即基于IPCC提供的气候变化情景,以“离线”(off-line)的方式使用气候模型的输出结果,作为水文模型的输入模拟计算流域的径流过程。气候变化对干旱事件的影响评估,往往还需结合一定的干旱指数进行,而水文模型的输出项可为干旱指数的计算提供相应的参数;如果仅采用基于降水异常变化的干旱指数(如标准化降水指数SPI),则可以直接使用气候模型对降水的模拟结果,而不必再应用水文模型。

Das等<sup>[63]</sup>通过16个气候模式和VIC模型分析高温室气体排放情景下(SRES-A2)内华达山区2~50年重现期洪水的变化,模拟结果表明在内华达北部山区50年一遇洪水将比历史情景增加30%~90%;而在南部山区将增加50%~100%。Veijalainen等<sup>[64]</sup>应用一种概念性水文模型和基于全球及区域气候模型的20种气候情景,对芬兰全国尺度上67个研究站点的百年一遇洪水变化特征进行了模拟,结果发现在融雪性洪水控制的地区洪水事件的发生频率因积雪减少而降低或保持不变,而在中部湖泊区洪水事件则因降水增加而增多。这表明气候变化对洪水的影响结果不是唯一的,而是随着流域位置、流域特性和设置的气候情景而有所差异。Sen等<sup>[65]</sup>应用区域气候模型ICTP-RegCM3,模拟IPCC-A2情景下土耳其在21世纪的

的降水变化特征,并结合标准化降水指数 SPI 对区域干旱演变特征进行预测,结果表明,土耳其西南地区降水将减少 40%,同时在这些地区干旱发生的频次、强度、持续时间都将显著增加。Jung 和 Chang<sup>[66]</sup>基于大气环流模型 GCMs 的模拟结果,运用一种具有物理机制的、半分布式水文模型 PRMS,并结合相对标准化降水指数 rSPI 和相对标准化径流指数 rSRI,对美国俄勒冈州未来干旱风险进行了评估,结果表明,短期干旱的发生频率因夏季降水和融雪的减少而增大,而长期干旱的发生频率则因冬季降水和径流的增加而未出现显著变化。

受气候模式本身、情景的设置、降尺度技术的不确定性以及水文系统的复杂性等因素的影响,利用气候模式驱动水文模型的方法评估未来气候变化对水资源的影响仍存在很大的不确定性<sup>[67-68]</sup>。因此,也有学者基于已有的气象、水文要素资料,通过建立统计评估模型的方法研究气候变化对旱涝事件的影响。如孙力等<sup>[69]</sup>应用 NCEP/NCAR(美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心)长系列再分析资料,建立了我国东北地区水资源各分量(地表径流量、浅层土壤含水量、深层土壤含水量等)与气温和(或)降水线性统计评估模型,结果表明,1℃和10%的气温和降水变化所导致径流量的增减可以达到25%~30%,因此,这种气候上的“小扰动”引起的地表水资源的变化是不可低估的。

### 3 结论与研究展望

在全球气候变化背景下,极端气候事件有增多增强趋势。同时,大规模经济社会活动的持续增强,形成了复杂的人类活动影响链,加剧了灾变过程预测和防治的复杂性。研究气候变化对旱涝灾害的驱动机制和致灾机理研究,降低旱涝灾害对自然和社会的影响,是满足国家防灾减灾需求的重大需求的基础性工作。

当前国内外学者就气候变化对旱涝事件影响的某一过程要素(如大气环流特征、下垫面条件改变等)开展了大量研究。但从水循环的角度系统研究气候变化对旱涝事件影响机理的成果较少。气候变化改变了水循环现状,影响到降水、蒸发、径流、土壤湿度、地下水等水循环要素的时空分布及动力耦合机制,最终导致旱涝事件的发生。未来应加强气候变化对水循环的影响,发展基于水循环要素动力耦合过程的理论方法,揭示气候

变化流域水循环关键过程及其时空变化的影响机制、程度和趋势,为气候变化对旱涝事件影响研究提供理论与技术支撑。另外,在气候变化对旱涝事件影响评估方面,虽然目前可通过气候模型与水文模型的松散“耦合”,刻画气候变化对水资源之间的定量关系,但未来气候变化情景的不确定性很大,模型本身也有较大不确定性,并且目前的研究仅针对平均气候变化情景,对极端气候变化尚还没有理想的表征方法。因此,寻求合理的定量评估方法、增强对极端天气事件的模拟能力也是未来需要关注的关键问题之一。

### 参考文献:

- [1] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. GISS surface temperature analysis [R]//Global Temperature Trends: 2005 Summation. Technical report. New York: NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University Earth Institute, 2006.
- [2] IPCC. Climate change and water[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2008.
- [3] Beniston M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps[J]. Journal of Hydrology, 2012, 412: 291-296.
- [4] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. Science, 2008, 321: 1481-1484.
- [5] Zhou Y, Ma Z, Wang L. Chaotic dynamics of the flood series in the Huaihe River Basin for the last 500 years[J]. Journal of Hydrology, 2002, 258(1): 100-110.
- [6] Dai A. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [7] 黄荣辉. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究综述[J]. 中国基础科学, 2004(4): 6-16.
- [8] 倪深海, 顾颖. 我国抗旱面临的形势和抗旱工作的战略性转变[J]. 中国水利, 2011(13): 25-26, 34.
- [9] Rossi G, Cancelliere A. Managing drought risk in water supply systems in Europe: a review[J]. International Journal of Water Resources Development, 2013, 29(2): 272-289.
- [10] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 730-743.
- [11] 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J]. 科学通报, 2006, 51(14): 1717-1724.
- [12] Yan D H, Wu D, Huang R, et al. Drought evolution characteristics and precipitation intensity changes during alternating dry-wet changes in the Huang-Huai-Hai River basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(3): 2665-2696.
- [13] Khon V C, Mokhov I I, Roeckner E, et al. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(1): 118-123.
- [14] Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. Land-atmosphere cou-

- pling and climate change in Europe[J]. *Nature*, 2006, 443: 205 – 209.
- [15] Tu M, Hall M J, de Laat P J M, et al. Extreme floods in the Meuse river over the past century: aggravated by land-use changes? [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(4): 267 – 276.
- [16] Jacobeit J, Wanner H, Luterbacher J, et al. Atmospheric circulation variability in the North-Atlantic-European area since the mid-seventeenth century[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 20(4): 341 – 352.
- [17] Schmocker-Fackel P, Naef F. More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1): 1 – 8.
- [18] Maurer E P, Wood A W, Adam J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the Conterminous United States[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(22): 3237 – 3251.
- [19] Kunkel K E, Karl T R, Easterling D R, et al. Probable maximum precipitation and climate change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1402 – 1408.
- [20] Dore M H I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? [J]. *Environment international*, 2005, 31(8): 1167 – 1181.
- [21] Arnell N W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios[J]. *Global environmental change*, 2004, 14(1): 31 – 52.
- [22] 李跃清. 青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析[J]. *大气科学*, 2000, 24(4): 470 – 476.
- [23] 张琼, 吴国雄. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J]. *气象学报*, 2001, 59(5): 569 – 577.
- [24] 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J]. *科学通报*, 2006, 51(14): 1717 – 1724.
- [25] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752 – 760.
- [26] 李长顺, 唐德才, 宋平. 水汽输送异常对中国西南地区的影响研究[J]. *灾害学*, 2012, 27(4): 28 – 33.
- [27] 翟盘茂, 章国材. 气候变化与气象灾害[J]. *科技导报*, 2004(7): 11 – 14.
- [28] 白莹莹, 高阳华, 张焱, 等. 气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响[J]. *气象*, 2010, 36(9): 47 – 54.
- [29] Lindner M, Maroschek M, Netherer S, et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 698 – 709.
- [30] Fuhrer J, Beniston M, Fischlin A, et al. Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland [M]//*Climate Variability, Predictability and Climate Risks*. Springer Netherlands, 2006: 79 – 102.
- [31] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660 – 684.
- [32] Hungate B A, Dukes J S, Shaw M R, et al. Nitrogen and climate change[J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1512 – 1513.
- [33] Vucetich J A, Reed D D, Breymer A, et al. Carbon pools and ecosystem properties along a latitudinal gradient in northern Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 136(1): 135 – 145.
- [34] Desprez-Loustau M L, Marçais B, Nageleisen L M, et al. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees[J]. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(6): 597 – 612.
- [35] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 254 – 261.
- [36] 吴绍洪, 赵宗慈. 气候变化和水的最新科学认识[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(3): 125 – 133.
- [37] Brooks K N, Folliott P F, Gregersen H M, et al. *Hydrology and the Management of Watersheds* (second ed.) [M]. Iowa State University Press, 1997.
- [38] Blöschl G, Ardoin-Bardin S, Bonell M, et al. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(9): 1241 – 1247.
- [39] Petrow T, Merz B. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 – 2002[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1): 129 – 141.
- [40] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 563 – 568.
- [41] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3): 125 – 161.
- [42] 赵国强. 我国北方典型生态区气候变化对农田、森林和草地生态的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [43] Brabson B B, Lister D H, Jones P D, et al. Soil moisture and predicted spells of extreme temperatures in Britain[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 – 2012), 2005, 110(D5).
- [44] Nicholson S. Land surface processes and Sahel climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(1): 117 – 139.
- [45] 何福红, 黄明斌, 李景保. 土壤水库和森林植被对水资源的调节作用[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(1): 42 – 44.
- [46] 李景保, 谢炳庚. 论湖南水土流失对水旱致灾能力的放大效应[J]. *水利学报*, 2000(8): 46 – 50.
- [47] Wan Y, Lin E, Xiong W, et al. Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1): 23 – 31.
- [48] Falloon P, Jones C D, Cerri C E, et al. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2007, 122(1): 114 – 124.
- [49] Lu X, Cheng G. Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in *Abies fabri* forest of subalpine, southwest China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 1015 – 1021.
- [50] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184 – 187.
- [51] Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, et al. Positive feedback between future climate change and the carbon cycle[J]. *Geophysical*

- Research Letters, 2001, 28(4): 1543–1546.
- [52] Martin D, Lal T, Sachdev C B, et al. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2010, 138(1): 64–73.
- [53] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289: 284–288.
- [54] Döll P. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective[J]. Climatic Change, 2002, 54(3): 269–293.
- [55] Fischer G, Tubiello F N, Van Velthuisen H, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74(7): 1083–1107.
- [56] Díaz J A R, Weatherhead E K, Knox J W, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain[J]. Regional Environmental Change, 2007, 7(3): 149–159.
- [57] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004(2): 77–82, 87.
- [58] 张建平, 王春乙, 杨晓光, 等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 50–55.
- [59] 曹红霞, 栗晓玲, 康绍忠, 等. 关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 6–9.
- [60] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology, 2006, 12(4): 672–685.
- [61] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467: 43–51.
- [62] 张建云. 气候变化与中国水安全[J]. 阅江学刊, 2010, 2(4): 15–19.
- [63] Das T, Maurer E P, Pierce D W, et al. Increases in flood magnitudes in California under warming climates[J]. Journal of Hydrology, 2013, 501: 101–110.
- [64] Veijalainen N, Lotsari E, Alho P, et al. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(3): 333–350.
- [65] Sen B, Topcu S, Türkes M, et al. Projecting climate change, drought conditions and crop productivity in Turkey[J]. Climate Research, 2012, 52: 175–191.
- [66] Jung I W, Chang H. Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the Willamette River Basin, Oregon, USA[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 108(3/4): 355–371.
- [67] 贺瑞敏, 刘九夫, 王国庆, 等. 气候变化影响评价中的不确定性问题[J]. 中国水利, 2008(2): 62–64.
- [68] Wilby R L. Evaluating climate model outputs for hydrological applications[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques, 2010, 55(7): 1090–1093.
- [69] 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 42–49.

## Advances in the Research on the Impact of Climate Change on Drought and Flood Events

Wang Gang<sup>1,2</sup>, Xiao Weihua<sup>1,2</sup>, Lu Xianpin<sup>3</sup> and Liu Shaohua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;  
2. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Tiancheng Industrial Cooperation Branch, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** The driving mechanism of climate change on drought and flood events is analyzed from the perspective of water circulation and water resources system. Related domestic and foreign research progress at present are summarized in the study of the impact of climate change on the weather systems, ground conditions, social-economic water demand as well as relevant evaluation methods. It can be concluded that climate change has lead to large-scale atmospheric circulation anomalies, resulting in a wide range of persistent droughts and floods. Climate change can also increase the risk of droughts and floods through changing the ground conditions including land cover and soil characteristics. Meanwhile, an increase in social-economic water demand in the context of climate change will exacerbate the water shortage crisis.

**Key words:** climate change; drought and flood; driving mechanism; water circulation; impact evaluation