

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190445

# 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展

王 文,王靖淑,陶奕源,程 慧

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

**摘 要:**在高强度人类活动对地球系统产生全方位深刻影响下,干旱灾害已经不再是严格意义上的自然灾害,而成为自然-人为复合灾害。人类活动通过改变大气成分(主要通过温室气体排放)引起全球或区域性水循环过程的变化,导致气象干旱时空特性变化,从而间接影响到水文干旱的形成发展;通过改变河流蓄存状态与水力联系(主要通过蓄、引、提、调水工程)以及用水特性变化,改变河流与地下水系统调蓄功能与产汇流过程,从而直接影响到气象干旱向水文干旱的传递过程以及水文干旱的发展过程。考虑自然和社会水循环之间复杂的相互作用过程,揭示人类活动对干旱形成与发展的影响是干旱研究的重要发展方向。

**关键词:**人类活动;水文干旱;气象干旱;干旱传递;水库调节;用水

**中图分类号:**P462 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2020)03-0001-08

20世纪中叶以来,高强度的人类活动直接或间接参与到大尺度区域的水文过程,加之不断强化的气候变化,致使很多区域的水文循环产生了显著变化<sup>[1]</sup>,并引发区域性干旱特性的变化<sup>[2-3]</sup>。从全球而言,干旱强度普遍因人类活动而加剧<sup>[4-5]</sup>。干旱已不再是单纯的自然灾害,而是一种双重成因的复合性灾害。

干旱通常被划分为水文干旱、气象干旱、农业干旱、社会经济干旱。其中,水文干旱以水的短缺为特征,流域水文干旱的产生和发展在受降雨、径流、蒸发和下渗等结构性自然因素约束的同时,也受诸如经济社会活动、土地开发利用、水利工程建设与管理等区域性人类活动所影响。在人类活动频繁的地区,人类活动不仅改变着水文循环规律和过程,也同时影响着水文干旱的时空演变和发展<sup>[6]</sup>。在高强度人类活动对地球系统产生全方位的深刻影响下,人类活动对水文干旱的影响已经成为国际干旱研究学者共同关注的研究热点<sup>[7-10]</sup>。对这一问题的深入研究,从理论角度有助于丰富社会水文学的理论与方法,从实际应用角度有助于我们更好地预测干旱、降低干旱发生风险,并为我国实施最严格水资源管理制度提供决策依据。本文主要从人类活

动影响水文干旱形式以及对水文干旱影响程度的定量分析方法这两个方面,阐述国内外关于人类活动对水文干旱形成与发展过程影响的研究进展,并提出一些亟需解决的关键问题。

## 1 人类活动影响水文干旱的主要方式

人类活动对水文干旱形成发展的影响可以分为两个层次:在区域及至全球尺度上,通过改变大气成分(主要通过温室气体排放)引起全球或区域性水循环过程的变化,导致气象干旱时空特性变化,从而间接影响到水文干旱的形成发展;在流域尺度上,通过改变河流蓄存状态与水力联系(主要通过蓄、引、提、调水工程)引起河流与地下水系统调蓄功能变化,或者通过改变用水时空结构与分布(突出体现在灌溉农业与城镇化方面)引起地表产流条件与耗排条件的变化,从而直接影响到气象干旱向水文干旱的传递过程以及水文干旱的发展过程。

### 1.1 温室气体排放改变气象干旱发生频率

研究表明,20世纪中期以来的全球变暖极大可能是温室气体排放导致的<sup>[11]</sup>。全球变暖的同时,降水时空

收稿日期:2019-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41971042,41961134003)

作者简介:王文(1967-),男,江苏姜堰人,博士,教授,主要研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: w.wang@126.com

分布格局也发生变化,并使一些地区的蒸散量增加,一些地区的蒸散量减小,从而对不同地区的气象干旱发生频率或强度产生差异性影响。Gudmundsson 和 Seneviratne<sup>[12]</sup>对观测数据与全球气候模型(GCM)模拟数据的分析表明,温室气体排放使得欧洲南部的降水量减小,从而增加了欧洲南部地中海地区的干旱发生概率;但欧洲北部地区的降水量增加使得该地区的干旱发生概率降低。Boisier 等<sup>[13]</sup>认为智利中部 2010 年以来出现的干旱的降水亏缺量有 1/4 与温室气体排放有关。Diffenbaugh 等<sup>[14]</sup>通过历史数据分析表明,由于人类活动导致的气候变暖增加了美国加州地区偏暖天气与偏干天气同时出现的概率,而正是这种同时出现的暖、干天气导致加州地区降水量严重减少,加剧了该地区的干旱发生频率,对 GCM 模拟结果的分析也证实了这种现象。类似地,Williams 等<sup>[15]</sup>认为加州 2012~2014 年间干旱主要是降水减少导致的,而干旱指标异常量的 8%~27%与人类活动引起的变暖有关。从这些地区的研究结果可以看出,由于人类排放温室气体,使大陆尺度-全球尺度的气候发生改变,影响到气象干旱的发生频率,进而间接影响到水文干旱的形成。

## 1.2 水利工程调蓄改变地表水的时空分配

筑坝、水库蓄水、跨流域调水这类水利工程措施是造成流域水文状况改变的最主要因素。这些工程措施通过调节水量的时间分配来增加干旱缺水时段的可用水量,对减轻干旱影响、增加干旱应对能力有益。如在美国加州 2014 年的严重干旱期间,通过水库调节使南加州在枯水期的缺水量减少了 50%<sup>[16]</sup>。Tijdeman 等<sup>[7]</sup>对英格兰与威尔士的若干河流的分析表明,由于水库的蓄量调节以及地下水取水,使干旱期间的地表径流得到一定补偿,从而减轻水文干旱的影响。水库的调节作用使得河道径流对降水变化的响应关系发生明显变化,从而使水文干旱出现时间、频率、强度及历时发生改变。Vicente-Serrano 等<sup>[17]</sup>对一个地中海山区流域的分析表明,地表径流与标准化降水指数的响应时间为 1~4 个月,而水库蓄量与 SPI 的响应时间为 7~10 个月。Zhang 等<sup>[18]</sup>对淮河支流沙颍河二个水库的分析也发现,由于上游单一水库的调节,河道径流与降水变化的响应时间由不到 1 个月延长到 6~7 个月;水库调节使水文干旱的出现频率降低,并使极端干旱的历时被缩短,但中等干旱的历时被延长。Rangecroft 等<sup>[19]</sup>的研究也发现,水库调节降低了水文干旱事件的频率、历时和强度,但不能缓和历时多年的干旱事件。Wu 等<sup>[20-21]</sup>

的研究也指出水库调度改变了水文干旱对气象干旱的关系,使得气象干旱到水文干旱的传播时间缩短,并显著减少水文干旱的持续时间和干旱程度。Wan 等<sup>[22]</sup>通过水文水资源综合模型模拟了取水与水库运行对美国水文干旱的影响,表明在夏季灌溉季节期间由于水库调节增加下泄流量,水库下游地区干旱得到缓解,但在非灌溉季节水库蓄水强化了下游的水文干旱。尹正杰等<sup>[23]</sup>利用人工生成径流系列结合水库运行模拟,研究表明随着水库调节库容的增加,对径流的调节能力增强,对水文干旱的影响也增大,能够抵御的干旱烈度越高;水库径流调节方式对地表水文干旱的历时与强度有很大影响,径流式水电站只能在应对短期干旱中发挥作用,但是抵御多年连续干旱则必须依靠多年调节水库。

除大型水利工程,零散分布的大量池塘、水窑等小型雨水集蓄利用工程也可以直接蓄水防旱,同时补给地下水,对减轻短历时干旱的影响有一定作用。如在印度拉贾斯坦邦的 Jodhpur 地区,已有及可建的雨水蓄集设施的蓄水量可以满足 69%农村饮用水需要<sup>[24]</sup>;在我国台湾桃源县,农村池塘蓄水可以满足 6.70%~10.50%耕地灌溉用水需要<sup>[25]</sup>;增加塘坝蓄水量是提高我国江淮丘陵灌区抗旱能力的一个重要措施<sup>[26]</sup>。但另一方面,池塘会截留地表径流,导致地表径流量的减少,这种作用在干季大于湿季、暖季大于冷季<sup>[27]</sup>,从径流的水文干旱角度会增加干旱强度。

总体而言,蓄水、调水工程对抗旱有益,但其对于不同区域、不同用水对象的影响有差异,使某些区域或行业受益的同时可能对另外某些地区或行业造成负面影响。目前的研究普遍发现,水库对于减轻库区及其主要供水区的干旱强度与历时有益,但对水库下游地区则可能存在负面影响。比如,López-Moreno 等<sup>[28]</sup>分析欧洲第二大水库 Alcántara 对干旱的影响时发现,在大坝上游地区干旱减轻的同时,大坝下游区域的干旱持续时间及强度有所增加。Wen 等<sup>[29]</sup>也发现在澳大利亚 Murrumbidgee 河紧邻大坝的下游地区由于得到水库的可靠供水保障有效降低了水文干旱程度,但由于河道入渗蒸发及人为取水,距大坝越远,这种有效作用逐渐消失。Van Dijk 等<sup>[30]</sup>发现,在澳大利亚 2001~2006 年干旱期间,受旱严重的 Murray-Darling 流域降水减少 18%,河流下游实测流量减少 82%;如果没有水库调节及河道取水,流量只应减少 45%。水库调节在满足其受供者用水需求的同时,使河道水量减少,

从而加重了下游的水文干旱,同时加重了干旱对河道与河岸生态系统的负面影响。Van Oel 等<sup>[31]</sup>也以巴西一个流域为例,说明流域水库群分布的综合作用结果是使流域上游地区的水文干旱持续时间和强度减轻,而下游则加重。Firoz 等<sup>[9]</sup>分析水库对越南中部二条河流的水文干旱影响时也发现,有客水调入的河流的水文干旱日数减少,而水量调出的河流则水文干旱日数增加。Wang 等<sup>[10]</sup>对我国滦河流域的研究表明,由于上游水库调节及水量外调的影响,改变了下游地区气象干旱向水文干旱的传递类型,并使水文干旱的历时延长、亏缺值增大。三峡水库蓄水后,2003~2011年期间宜昌站(大约距三峡坝址下游 44km)的水文干旱现象有所增加<sup>[32]</sup>。同时,三峡大坝蓄水使长江对鄱阳湖的雍水作用减弱,从而使鄱阳湖的流出水量增加,导致鄱阳湖的水文干旱强度增加<sup>[33]</sup>。黄河中上游地区大量水库的建设,也使黄河下游地区的干旱问题更加严重<sup>[34]</sup>。由此可见,水库对水文干旱的影响仍是一个有争议的问题,评价水库对干旱的影响需要综合考虑水库功能、水库供水保障范围、水库群调度等多因素的影响。

现有关于水库对干旱特性的影响分析大多是针对水库蓄量或河道流量或水库可蓄量的调节作用,从社会水文学的角度,规划与政策也是值得关注的问题,即避免对水库的过度依赖。水库会降低其供水区域(主要是上游地区)的水文干旱程度,但也可能带来更高用水需求,从而抵消水库的初期效益;过度依赖水库供水会增加干旱脆弱性,从而增加干旱的潜在破坏力。从这个角度看,水库会使缺水问题更加严重<sup>[35]</sup>。另一个相关的问题是,从供水安全的角度,一个地区的调节总库容与供水能力应该多大?当调节库容超过一定阈值时,对抗旱供水毫无益处。例如 Null 等<sup>[36]</sup>的分析表明在美国加州,如果去除若干座水库,加州的供水不会产生多大影响。如何在水库设计时从区域干旱管理的角度进行最优库容设计也是水利工程建设中应加以考虑的问题。

### 1.3 地下水取用与补给改变地表水与地下水之间的转换关系

地下水干旱,即地下水蓄量持续且广泛低于平均水平现象,是水文干旱的一种重要形式。地下水干旱对气象干旱的响应时间远慢于地表水干旱。在干旱发生时地下水在供水总量中所占比例会大大提高,在某些地区甚至超过地表水。如美国加州平常年份地下水只占供水总量的 30%,但在严重干旱年份地下水在总供水量的比重可达 60%以上<sup>[37]</sup>。我国历年发布的《中国

水旱灾害公报》,应急打井是旱情发生期间保障旱区供水的重要措施之一。地下水调蓄能力对于干旱的传递速度、干旱事件的历时与强度等也有很大影响。如果地下水储量足够大,并与地表水有充分的水力联系,则可以弱化气象干旱的影响,并可避免发生气象干旱向水文干旱的传递。当地下水被大量开采后,地下水与地表水的水力联系可能被切断,由气象干旱向水文干旱传递的速度则会加快。Kustu 等<sup>[38]</sup>发现在美国中西部的高平原地区由于大量抽取地下水灌溉,地下水位不断降低,地下水与河道径流之间的水力联系不断弱化,并因此导致了河道水量(包括枯季流量)的持续减少。类似地,在澳大利亚,由于长期干旱及抽取地下水灌溉,地下水位降到河床以下,失去对河流的补给作用,引起流量的减少量大于正常状况<sup>[39]</sup>。随着地下水调蓄能力的下降甚至消失,水文干旱的历时延长,强度也会加重。Van Loon 等<sup>[40]</sup>对欧洲一些河流的研究就表明了这种现象的存在。

在取用地下水的同时,人们也会通过多种地表补给(如河流梯级拦蓄、地表各种雨水蓄积设施等)以及井水回注补给等方式补给地下水。发展中国家大量采用地表雨水蓄集设施,通过自然入渗补给地下水<sup>[41]</sup>,而欧美发达国家的许多地区大量采用注井的形式进行地下水补给<sup>[42]</sup>。在地下水超采形成地下水漏斗的地区,有极其丰富的地下水储蓄空间。例如加州中部山谷和亚利桑那州的地下储蓄空间分别相当于加州的地表水库库容,是亚利桑那地表水库库容的三倍<sup>[43]</sup>。利用好这些地下空间,可以通过长期的地下水储备,与地表水库的短期性补给形成有效互补,增加干旱应对能力<sup>[44]</sup>。

### 1.4 用水耗水改变地表水分消耗时空分布与强度

干旱的严重程度不仅取决于干旱的历时、强度及影响范围,也与受影响地区人类用水与植被耗水有关。人类土地利用方式变化及土地覆盖变化(LUCC)改变了下垫面条件,进而改变产汇流及蒸散发特征,在这个过程中也通过各种形式的用水,改变着区域水文循环与水量平衡,从而对水文干旱的形成发展造成影响。当林地、草地转为农业用地时,由于地表引水量、地下取水量大量增加,以及生长期蒸散发量增加,通常会导致径流量减少。根据 Boisier 等<sup>[45]</sup>的估算,工业革命以来全球的蒸散发量以每年  $1260 \pm 850 \text{ km}^3$  的速度在减少,但在耕地面积扩张的地区,夏季的蒸散发量却大幅增加。

人类用水主要包括农业用水、工业用水、生活用水、人工生态环境补水等,其中约一半为消耗性用水。农业用水在总用水量中约占 1/3,消耗性用水量也最大。在过去几十年间全球用水量成倍增加,最主要原因就是灌溉用水的增加。Wada 等<sup>[4]</sup>认为由于各类用水行为使全球的干旱频率增加了 27( $\pm 6$ )%,干旱强度增加了 10%~500%,而灌溉是使干旱强化的最主要因素。Van Loon 等<sup>[46]</sup>对西班牙 Guadiana 河上游地区 1980~2000 年期间的水文特征分析发现,由于大量抽取地下水用于农业灌溉,干旱期间地表水的缺水量增加了 4 倍,地下水位的最大偏低量也增大了约 4 倍,同时,地表水与地下水干旱事件数减少,但平均历时分别增加了 4 倍和 6 倍,使许多小的干旱事件被串接成较大的干旱事件。在非农业地区,供水系统与居民生活用水需求之间的矛盾,也会引发严重的社会经济干旱。Wan 等<sup>[22]</sup>的模拟结果也证实,由于取用地表水进行灌溉使美国未来的水文干旱增强,尤其是在极端干旱情形下,取水使水文干旱的强化作用超过水库对水文干旱的缓解作用。

人类活动在消耗地表水与地下水的同时,也会以生活污水、工业退水、灌溉退水等形式回补地表水或地下水。De Graaf 等<sup>[47]</sup>的模拟表明在灌溉退水影响显著的区域,基流对河道的补给量增加,尤其在枯季。Arumi 等<sup>[48]</sup>发现在秘鲁的 Peumo 地区,地下水补给的 22%来自灌溉损失、52%来自渠道渗漏,只有 26%来自降水补给,而渠道衬砌是导致地下水位下降的原因之一。我国河西走廊、伊朗等其他地区的研究成果也说明了灌溉用水对地下水补给的重要性<sup>[49-50]</sup>。从地下水干旱的角度,以渠灌为主的大中型灌区的灌溉用水在增强地表水干旱的同时,会降低地下水干旱强度。

目前已经认识到消耗性用水会加强干旱,但对于不同类型用水对干旱影响的差异性缺乏深入研究。比如生活用水相对比较稳定,而灌溉用水则受季节性、水价等因素的影响很大。由于产业布局、人口分布等因素导致的用水形式、用水结构差异必然对干旱的时空特性造成一定的差异性影响。

## 2 人类活动影响水文干旱的定量分析方法

分析人类活动如何影响干旱特性与发展过程的核心在于定量分离自然与人类活动在干旱形成与发展中的作用,大致有四类:(1)相似流域对比<sup>[18,20-21]</sup>。选用具有相似地理特征(相似的面积、气候、植被、土壤、坡

度、坡向,并且位置相邻或相近)但不同人类活动特征(水库调节、灌溉用水)的对照流域,对比二者的干旱特征,将干旱特征的差异归为人类活动的影响;(2)流域受人类活动干扰前后期或河流受干扰段上下游观测数据对比。对比前后时段(或上下游)的干旱特征,并将干旱特征的差异归为人类活动的影响<sup>[20-21,51]</sup>;(3)水文时间序列分解与统计分析。通过分解水文时间序列中的周期性成分、突变点、趋势,及气候因子的时间序列变化特性,然后剔除水文时间序列变化中的气候变化成分,或对比分析变点前后水文干旱特性,以确定人类活动对水文过程与干旱特性的影响力度,在此基础上分析对干旱的影响力度<sup>[52-53]</sup>;(4)水文模型模拟。以受人类活动干扰前为基准期构建水文模型,利用该模型模拟受影响时段的径流过程,对比分析人类活动影响时段实测径流过程中的干旱特性与模拟的“自然”径流过程中的干旱特性,可区分出由于人类活动造成的干旱特性变化<sup>[10]</sup>。这些方法也可以组合应用<sup>[54-55]</sup>。

上述 4 类分析方法中,前三种的分析结果体现的是各种人类活动对干旱过程的综合影响,难以区分不同人类活动各自的影响,只有流域水文模型模拟法有可能较好地区分不同的人类活动,前提是该模型能有效模拟不同类型的人类活动(尤其是灌溉用水、水库调度)。目前很多流域水文模型或多或少考虑了人类活动对水文过程的影响,但它们还是以降雨径流模拟为核心,对人类活动做了相当大的概化处理(比如 SWAT 模型);也有很多流域尺度的较为全面考虑水资源管理各环节的模型,如水资源管理和决策模型 AQUATOOL、流域规划与管理模型 RIBSIM、水资源优化模型 WARGI-SIM、水资源评价与规划模型 WEAP、及全球水平衡模型 PCR-GLOBWB 等。其中,荷兰乌得勒支大学开发的 PCR-GLOBWB 模型<sup>[56]</sup>是一个基于网格的大尺度模型,考虑了不同形式的人类用水,在全球和区域尺度上都得到成功应用<sup>[24,16]</sup>,是一个比较适于分析人类活动影响的水文干旱分布式模拟工具。

## 3 问题讨论

### 3.1 水文干旱的成因

通常认为干旱是由降水不足引发的。由于人类活动对干旱发生发展过程具有很强的影响,有学者又提出一种新的干旱成因,即人类活动(包括不断增加的

各种用水需求、不当的水资源管理措施、水资源供给量的减少、土地利用变化以及人类活动引起的温室效应等)引发的干旱<sup>[6]</sup>。Van Loon<sup>[67]</sup>进一步提出将干旱分为三类,即气候引发的干旱、人类活动引发的干旱及人类活动改变的干旱。这里对“人类活动引发的干旱”做进一步的分析。

如前所述,人类活动影响水文干旱的途径可以分为两类,一是通过影响气候来间接影响,二是通过改变地表水资源时空分布格局直接影响。从气候的角度,尽管已有研究成果表明,人类活动通过温室气体排放、改变下垫面的水热特性等方式改变气候,从而影响气象干旱的形成,但这种影响是间接的,而且人类能在多大程度上影响气象干旱的发生也难以量化。当前的气候变暖普遍被认为与人类活动有关,但变暖可能导致降水变少也可导致降水增加。有研究表明,从全球而言气候变暖并没有导致干旱事件的普遍性增加<sup>[68]</sup>。从局部地区来看,干旱的发生是否该归因于人类活动也存在争议,如对于加州干旱的成因,虽然 Williams 等<sup>[19]</sup>认为加州 2012-2014 年间干旱指标异常量的 8%~27%与人类活动引起的变暖有关,但 Seager 等<sup>[69]</sup>认为 2011-2014 年间加州干旱的发生受控于气候的自然波动过程,与人类活动引起的气候变暖无直接关系。也就是说,人类活动通过改变气候而引发干旱这一看法是难以得到实证的。

从地表水资源时空分配的角度,人类活动可能引发两种时间尺度的地表水资源格局变化,一类是经过人类活动改造的流域水资源系统因人为出现短期的功能性缺水,比如由于中长期预报不准,在汛期将水库腾空以备强降水的来临,结果实际降水很少,导致汛后水库可供水量不足,进而引发水文干旱;另一类是由于大规模的土地利用方式改变及大型水利工程建设导致下游地区趋势性、长期性甚至永久性的缺水,比如由于上游建水库、大规模发展灌溉导致世界第四大内陆水体咸海逐渐干涸。前者是严格意义上的干旱,但这类干旱涉及的区域以及在干旱事件中所占比例实际上非常有限。后者在许多地区普遍存在,属于人类活动引起的环境变化,缺水成为新常态,这时的水分亏缺实际上不属于干旱,尽管在不少研究中把这类现象当作干旱对待。如何考虑环境变化因素进行非平稳条件下的干旱成因与特性分析是干旱研究中的一个难题。

### 3.2 人为调控下水文干旱强度与影响的时空转移

水文干旱的强度通常是以江河流量、湖库水位、地

下水位等指标来衡量,水文干旱的影响则以干旱造成的生态破坏及社会经济损失来衡量。从干旱管理的角度,通过适当的应对措施控制干旱强度,以减轻干旱的影响。但减轻干旱强度与减轻干旱影响这二者之间可能在不同地区与干旱发展阶段存在矛盾。这里涉及到两个方面的问题,一是干旱强度与影响在时间上的转移,如果干旱前期水库正常供水,可降低前期的干旱影响,但从水库蓄量的角度而言水文干旱强度增加,并且随着干旱持续发展,干旱后期可能供水困难,导致后期的干旱强度与影响都被放大。因此在干旱期需要对水库供水采取避险规则<sup>[60]</sup>,或称为限制供水规则,适当限制当前供水,使前期干旱影响有所增大,可以避免在后期遭受更加严重的影响。对于这个问题已有很多研究成果,是当前水文干旱研究的一个热点问题<sup>[61-63]</sup>。二是干旱强度与影响在空间上的转移,这主要体现在水库大坝上下游地区之间<sup>[28,31]</sup>或者跨流域调水的供水水源地与受水地之间<sup>[9]</sup>,在大范围干旱发生时,水库大坝上游地区或跨流域调水受水地区的水文干旱强度与其他干旱影响降低,下游地区或调水水源地的水文干旱强度与干旱影响增加。在干旱管理中,如何在干旱预测或情景分析基础上,分析由于水库调节与调水引起的不同流域、行政区之间的干旱特性变化与干旱风险转移,通过采用合理的供水策略以及用水管理等调控措施协调干旱强度与干旱影响的时间与空间关系,是需要不断深入探讨的课题。

## 4 结论与展望

人类活动的水文效应是水文科学研究关注的重点领域。在高强度人类活动对水文循环产生全方位深刻影响下,水文干旱已经不再是严格意义上的自然灾害,而成为自然-人为复合灾害。要准确地预测水文干旱的发生发展过程,有效地实现干旱管理,不能单从自然角度考虑干旱的形成与发展,需要充分考虑人类活动在水文干旱形成发展过程的作用。对此还有许多需要深入探索的问题,包括:调蓄工程对干旱影响的时空差异性、水利工程群应对干旱的联合优化运用方法、不同区域与行业的不同用水形式对干旱影响的时空差异性、如何考虑干旱发展过程的不确定性、协调地表水地下水的取用、以及干旱管理措施-干旱社会经济影响-干旱传递过程之间的相互作用等。由于对这些问题认识不清,大大影响了干旱管理措施的有效性。未来必须考虑自然和社会水循环之间复杂的相互

作用过程,对不同人类活动在多环节(从流域产流到蓄泄过程)、多层面(从干旱管理政策制定到具体措施运用)影响干旱特性的机理形成系统性认识,在此基础上建立增强干旱应对能力的区域水资源管理方法,为变化环境下的抗旱减灾与水资源管理决策提供科学支撑。

#### 参考文献:

- [1] Montanari A, Young G, Savenije H H G, et al. 'Panta Rhei—everything flows': change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022 [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013,58(6):1256–1275.
- [2] Veldkamp T I E, Wada Y, Aerts J, et al. Water scarcity hotspots travel downstream due to human interventions in the 20th and 21st century [J]. *Nature communications*, 2017,8(1):1–12.
- [3] Naumann G, Alfieri L, Wyser K, et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018,45:3285–3296.
- [4] Wada Y, Van Beek L P H, Wanders N, et al. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide [J]. *Environmental Research Letters*, 2013,8(3):34–36.
- [5] Aghakouchak A, Feldman D L, Hoerling M P, et al. Water and climate: recognize anthropogenic drought [J]. *Nature*, 2015,524(7566):409–411.
- [6] Wang W, Ertsen M W, Svoboda M D, et al. Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought [J]. *Advances in Meteorology*, 2016:1–5.
- [7] Tisdeman E, Hannaford J, Stahl K, et al. Human influences on streamflow drought characteristics in England and Wales [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(2):1051–1064.
- [8] Van Loon A F, Rangelcroft S, Coxon G, et al. Using paired catchments to quantify the human influence on hydrological droughts [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019,23(3):1725–1739.
- [9] Firoz A B, Nauditt A, Fink M, et al. Quantifying human impacts on hydrological drought using a combined modelling approach in a tropical river basin in central Vietnam [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,22(1):547–565.
- [10] Wang Y, Li J, Zhang T, et al. Changes in drought propagation under the regulation of reservoirs and water diversion [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019:701–711
- [11] Allen S K, Plattner G K, Nauels A, et al. An overview of the working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. *Computational Geometry*, 2007,18(2):95–123.
- [12] Gudmundsson L, Seneviratne S I. Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe [J]. *Environmental Research Letters*, 2016,11(4).
- [13] Boisier J P, Rondanelli R, Garreaud R D, et al. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016,43(1):413–421.
- [14] Diffenbaugh N S, Swain D L, Touma D, et al. Anthropogenic warming has increased drought risk in California [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(13):3931–3936.
- [15] Williams A P, Seager R, Abatzoglou J T, et al. Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012–2014 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015,42(16):6819–6828.
- [16] He X, Wada Y, Wanders N, et al. Intensification of hydrological drought in California by human water management [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017,44(4):1777–1785.
- [17] Vicenteserrano S M, López-moreno J I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005,9(5):523–533.
- [18] Zhang R, Chen X, Zhang Z, et al. Evolution of hydrological drought under the regulation of two reservoirs in the headwater basin of the Huaihe River, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015,29(2):487–499.
- [19] Rangelcroft S, Van Loon A F, Maureira H, et al. Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region [J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2016:1–32.
- [20] Wu J, Chen X, Yao H, et al. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir [J]. *Journal of Hydrology*, 2017:495–507.
- [21] Wu J, Liu Z, Yao H, et al. Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought [J]. *Journal of Hydrology*, 2018:726–736.
- [22] Wan W, Zhao J, Li H Y, et al. Hydrological drought in the Anthropocene: impacts of local water extraction and reservoir regulation in the US [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017,122(21):11313–11328.
- [23] 尹正杰,黄薇,陈进. 水库径流调节对水文干旱的影响分析[J]. *水文*, 2009,29(2):41–44. (YIN Zhengjie, HUANG Wei, CHEN Jin. Impacts of reservoir flow regulation on hydrologic drought [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009,29(2):41–44. (in Chinese))
- [24] Narain P, Khan M A, Singh G. Potential for water conservation and harvesting against drought in Rajasthan, India [J]. *Iwmi Working Paper*, 2005,75(4):336–340.
- [25] Liou Y, Wang T, Chan H, et al. Impacts of pond change on the regional sustainability of water resources in Taoyuan, Taiwan region [J]. *Advances in Meteorology*, 2013,2013(2013):1–6.
- [26] 金菊良,原晨阳,蒋尚明,等. 基于水量供需平衡分析的江淮丘陵区塘坝灌区抗旱能力评价 [J]. *水利学报*, 2013,(5):34–41. (JIN Juliang, YUAN Chenyang, JIANG Shangming, et al. Assessment of drought resistance ability for pond and retaining dam irrigated

- area of Jianghuai hilly area based on water supply and demand balance analysis [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013,(5): 34-41. (in Chinese)
- [27] Jiao Yang, Yuan Xing. More severe hydrological drought events emerge at different warming levels over the Wudinghe watershed in northern China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019,23(1):621-635.
- [28] López-moreno J I, Vicenteserrano S M, Begueria S, et al. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: the lower River Tagus, Spain and Portugal [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(2).
- [29] Wen L, Rogers K, Ling J, et al. The impacts of river regulation and water diversion on the hydrological drought characteristics in the lower Murrumbidgee River, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,405(3):382-391.
- [30] Van Dijk A, Beck H E, Crosbie R, et al. The millennium drought in southeast Australia (2001-2009): natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society [J]. *Water Resources Research*, 2013,49(2):1040-1057.
- [31] Van Oel P R, Martins E S, Costa A C, et al. Diagnosing drought using the downstreamness concept: the effect of reservoir networks on drought evolution [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018,63(7):979-990.
- [32] Li S, Xiong L, Dong L, et al. Effects of the Three Gorges Reservoir on the hydrological droughts at the downstream Yichang station during 2003 - 2011[J]. *Hydrological Processes*, 2013,27(26): 3981-3993.
- [33] Liu Y, Wu G. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016,20(1):93-107.
- [34] Wang Y, Yang J, Chang J, et al. Assessing the drought mitigation ability of the reservoir in the downstream of the Yellow River [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,646:1327-1335.
- [35] Di Baldassarre G, Wanders N, AghaKouchak A, et al. Water shortages worsened by reservoir effects [J]. *Nature Sustainability*, 2018,1(11):617-622.
- [36] Null S E, Medellinazuara J, Escrivabou A, et al. Optimizing the dammed: water supply losses and fish habitat gains from dam removal in California [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014,136(1):121-131.
- [37] Carle D. *Introduction to Water in California* [M]. Berkeley: University of California Press, 2004.
- [38] Kustu M D, Fan Y, Robock A. Large-scale water cycle perturbation due to irrigation pumping in the US High Plains: a synthesis of observed streamflow changes [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,390:222-244.
- [39] Petrone K C, Hughes J, Van Niel T G, et al. Streamflow decline in southwestern Australia, 1950 - 2008 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(11).
- [40] Van Loon A F, Van Lanen H A J. Testing the observation-modelling framework to distinguish between hydrological drought and water scarcity in case studies around Europe [J]. *European Water*, 2015,49:65-75.
- [41] Pavelic P, Srisuk K, Saraphirom P, et al. Balancing-out floods and droughts: opportunities to utilize floodwater harvesting and groundwater storage for agricultural development in Thailand [J]. *Journal of Hydrology*, 2012:55-64.
- [42] Sukhija B S. Adaptation to climate change: strategies for sustaining groundwater resources during droughts [J]. London: Geological Society, 2008,288(1):169-181.
- [43] Scanlon B R, Reedy R C, Faunt C C, et al. Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3).
- [44] Langridge R, Daniels B. Accounting for climate change and drought in implementing sustainable groundwater management [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(11):3287-3298.
- [45] Boisier J P, De Nobletducoude N, Ciais P, et al. Historical land-use-induced evapotranspiration changes estimated from present-day observations and reconstructed land-cover maps [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014,18(9):3571-3590.
- [46] Van Loon A F, Van Lanen H A. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework [J]. *Water Resources Research*, 2013,49(3):1483-1502.
- [47] De Graaf I E, Van Beek L P, Wada Y, et al. Dynamic attribution of global water demand to surface water and groundwater resources: effects of abstractions and return flows on river discharges [J]. *Advances in Water Resources*, 2014:21-33.
- [48] Arumi J L, Rivera D, Holzapfel E, et al. Effect of drought on groundwater in a Chilean irrigated valley [J]. *Water Management*, 2013,166:231-241.
- [49] Ebrahimi H, Ghazavi R, Karimi H, et al. Estimation of groundwater recharge from the rainfall and irrigation in an arid environment using inverse modeling approach and RS [J]. *Water Resources Management*, 2016,30(6):1939-1951.
- [50] 王根绪,杨玲媛,陈玲,等. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J]. *地理学报*, 2005,60(3):456-466. (WANG Genxu, YANG Lingyuan, CHEN Ling, et al. Impacts of land use changes on groundwater resources in the Heihe River basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005,60(3):456-466. (in Chinese))
- [51] Lin Q, Wu Z, Singh V P, et al. Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang basin, South China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017: 512-524.
- [52] Sadri S, Kam J, Sheffield J, et al. Nonstationarity of low flows and their timing in the eastern United States [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,20(2):633-649.
- [53] Zhu S, Xu Z, Luo X, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to drought extremes, using an improved evaluation framework [J]. *Water Resources*

- Management, 2019:1-15.
- [54] Van Loon A F, Van Lanen H A J. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework [J]. *Water Resources Research*, 2013,49(3):1483-1502.
- [55] Liu Y, Ren L, Zhu Y, et al. Evolution of hydrological drought in human disturbed areas: a case study in the Laohahe Catchment, northern China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016:1-12.
- [56] Sutanudjaja E H, Van Beek R, Wanders N, et al. PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model [J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2018,11:2429-2453.
- [57] Van Loon A F, Gleeson T, Clark J, et al. Drought in the Anthropocene [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9(2):89-91.
- [58] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L, et al. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012,491(7424):435-438.
- [59] Seager R, Hoerling M P, Schubert S D, et al. Causes of the 2011-14 California drought [J]. *Journal of Climate*, 2015,28(18):6997-7024.
- [60] Shih J S, ReVelle C. Water-supply operations during drought: continuous hedging rule [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994,120(5):613-629.
- [61] Chang J, Guo A, Wang Y, et al. Reservoir operations to mitigate drought effects with a hedging policy triggered by the drought prevention limiting water level [J]. *Water Resources Research*, 2019,55(2):904-922.
- [62] Jin Y, Lee S. Comparative effectiveness of reservoir operation applying hedging rules based on available water and beginning storage to cope with droughts [J]. *Water resources management*, 2019,33(5):1897-1911.
- [63] 曹润祥,李发文,冯平. 基于水库旱限水位动态控制的供水策略研究 [J]. *安全与环境学报*, 2019,19(3):916-922. (CAO Runxiang, LI Fawen, FENG Ping. Water supply strategy based on dynamic control of drought limit water level [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019,19(3):916-922. (in Chinese))

## Review of Human Impacts on Formation and Development of Hydrologic Drought

WANG Wen, WANG Jingshu, TAO Yiyuan, CHENG Hui

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Drought becomes a natural and artificial composite hazard rather than a purely natural hazard in the age of Anthropocene that human activities have profound impacts on the earth system. The anthropogenic activities have caused the variation of global or continental meteorological drought characteristics through changing the atmospheric composition (by greenhouse gas emission), which indirectly impact the formation and evolution of hydrological droughts. Besides, it has caused the changes in rainfall-runoff transformation and storage of the river-groundwater system through changing the state of river storage and hydraulic connection (by means of reservoir impoundment, water diversion, and transfer project) and river flows pathways (by means of land use change and various means of water consumption), which directly affects the propagation from meteorological drought to hydrologic drought and the evolution of hydrologic drought. The drought research is an import theme to reveal the impacts of human activities on drought development by taking the complex interactions between natural and social water cycles into account.

**Key words:** anthropocene; hydrologic drought; meteorological drought; drought propagation; reservoir regulation; water consumption



(上接第 33 页)

## Numerical Simulation of Overland Flow by Lattice Boltzmann Method

LIU Zhanjun, LIU Ningning

(Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Taking one-dimensional kinematic wave equation as research object, this paper showed the detailed steps applying D1Q5 model on the numerical simulation of one-dimensional overland flow by Lattice Boltzmann, compared calculation results with analytical solutions, and analyzed the influence of intervals and relaxation time on calculation accuracy. The results indicate that the Lattice Boltzmann method could be well applied to the numerical simulation of overland flow. The selection of space interval has a great influence on calculation accuracy. The range of relaxation time should be within [1.0,1.2].

**Key words:** Lattice Boltzmann method; overland flow; equilibrium distribution function; relaxation time