

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0004

陈昌春,张余庆,王峻晔,等. 骤发干旱研究进展与展望[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 26-33. CHEN C C, ZHANG Y Q, WANG J Y, et al. Flash drought: Progress and prospect[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 26-33. (in Chinese)

骤发干旱研究进展与展望

陈昌春¹, 张余庆², 王峻晔³, 宋洁⁴, 骆利峰⁵, 岳元⁶

- (1. 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044; 2. 淮阴师范学院 城市与环境学院, 江苏 淮安 223300;
3. 阿萨巴斯卡大学, 加拿大 阿尔伯塔省阿萨巴斯卡, T9S 3A3; 4. 北伊利诺伊大学, 美国 伊利诺伊州迪卡尔布, IL 60115;
5. 密歇根州立大学 地理系, 美国密歇根州东兰辛, MI 48824; 6. 吉林省气象台, 长春 130062)

摘要:近年来,一种发生速度较快、破坏程度较高、预报难度较大的新干旱类型——“骤发干旱”被提出之后,随着美国2012年特大干旱的爆发,骤发干旱的研究引起了美国社会的高度重视,我国及其他国家的有关研究也迅速展开。介绍了骤发干旱定义的认识及深化过程,由最初定义的热浪型骤发干旱扩展为热浪型骤发干旱与降水短缺型骤发干旱两种。从地面气象观测数据为主、实测与模拟土壤含水量为主、遥感分析与解译技术为主三个方面归纳了识别与监测骤发干旱的现有方法。总结了骤发干旱发生机理与时空变化特征方面的进展,对骤发干旱的研究前景进行了展望。

关键词:骤发干旱; 识别; 机理; 时空变化; 进展

中图分类号: P463 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flash drought: Progress and prospect

CHEN Changchun¹, ZHANG Yuqing², WANG Junye³, SONG Jie⁴, LUO Lifeng⁵, YUE Yuan⁶

- (1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Urban and Environmental Science, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China;
3. Athabasca River Basin Research Institute, Athabasca University, Athabasca, Alberta T9S 3A3, Canada;
4. Department of Geography, College of Liberal Arts and Sciences, Northern Illinois University, DeKalb, IL 60115, USA;
5. Department of Geography, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA;
6. Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062, China)

Abstract: In recent years, a new concept of drought called flash drought has occurred at a rapid rate with a high degree of damage and which is hard to predict. With the outbreak of an extremely severe drought in the United States in 2012, the study of flash drought has been paid remarkable attention in the US. The research on flash drought has begun rapidly in China and other countries. This paper introduced the connotation of flash drought and its deepening process, which was drawn out from single heat wave flash drought to another precipitation deficit flash drought. The existing methods of identifying and monitoring of flash drought were summarized based on three sources, such as the ground meteorological data, the measured and simulated soil moisture, and the remote sensing analysis and interpretation techniques. Furthermore, the progress of the mechanism and spatiotemporal characteristics of flash drought were summarized and the research prospects of flash drought were proposed.

收稿日期: 2019-02-20 修回日期: 2019-09-25 网络出版时间: 2019-10-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191015.1155.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41907384); 教育部人文社会科学研究青年基金(19YJCZH259); 中国博士后科学基金(2019M650072); 美国NOAA资助项目(NA17OAR4310132)

作者简介: 陈昌春(1963—), 男, 江苏盐城人, 副教授, 博士, 主要从事水文气候学、水文水资源、水文学史等研究。E-mail: changchunc@nuist.edu.cn

Key words: flash drought; identification; mechanism; spatiotemporal change; progress

一般而言,干旱是一种缓慢发展的自然现象,往往需要数月甚至更长的时间才能达到强度和范围上的最大值,从而被人们明显察觉。然而,近年研究发现,干旱在异常大气环流特征与下垫面条件下,可以迅速发生。多位美国干旱专家 2002 年联合发表的论文《干旱监测》中根据干旱发生速度快慢引入了相对快速干旱的新概念——骤发干旱(flash drought, 以下也常简称为“骤旱”),用来表示容易发生于高温季节、来势迅猛、当时现有预报手段难以预测的干旱^[1-2]。这个概念提出十年后,美国 2012 年春、夏之际中西部遭遇来势凶猛的特大干旱,造成经济损失约 300 亿美元^[3],尤其对农业带来毁灭性的灾害,但当时的气候预报系统都未能及时、准确地预报这种发生相对快速的干旱。美国知名气候新闻科学作家 Andrew Freedman 在网络发文介绍:“2012 年,美国农业部预测该年玉米会有一个从 1937 年算起的创历史纪录的大丰收,然而仅隔三个月,玉米就遭受了毁灭性的旱灾^[4]”。由预报难度可以推知,一些机理不太明确且带有突发性的严重干旱,特别是骤发干旱的监测技术、发生机理与时空特征都是有待探索的重要科学问题,并且具有明显的应用价值。2012 年之后,骤发干旱迅速引起了美国政府机构、学术界与社会公众的强烈关注。骤发干旱的研究课题近年已受到 NASA(美国国家航空航天局)、NOAA(美国国家海洋和大气管理局)、USGS(美国地质勘探局)等多个机构的大力资助^[5]。我国的国家自然科学基金项目等也开始对骤旱研究进行资助^[6]。

由奥地利维也纳技术大学 Will Pozzi 等诸多学者呼吁加强包括骤发干旱在内的干旱预警研究^[7]。骤发干旱从新的视角审视与推动干旱研究,已引起包括我国在内的多个国家学术研究者及政府与社会的重视^[8]。

1 “骤发干旱”的内涵及其演进

骤发干旱的取名是强调它的突发性和难以预报,英文术语是仿照 flash flood(骤发洪水)造词得来的。“骤发干旱”往往表现为短时间尺度上异常高温和土壤含水量迅速减少。Mark D. Svoboda 等^[2]最早(2002)将“骤发干旱”定义为“由于严重的热浪和短期干旱的负面效应引起干旱的快速发生,导致作物的迅速退化,以及相关的对农业、火警和畜牧业

等领域的不良影响”。

骤发干旱的定义与类型也在争议与发展之中^[9]。2016 年在此前仅研究热浪骤发干旱的基础上将骤发干旱进一步区分为两种类型:热浪主导的骤发干旱、少雨主导的干旱,并认为这两种干旱有着不同的发生机理^[10]。高温热浪型骤旱(heat wave flash drought)主要是由高温热浪所驱动,高温热浪导致蒸散发迅速增加,进而造成土壤含水量迅速下降^[11]。降水短缺型骤旱(precipitation deficit flash drought)主要是由于降水短缺所致,尽管在植物生长季内的蒸散发能力很强,但降水不足导致土壤含水量和实际蒸散发量的下降,进而引起气温升高。Mo 与 Lettenmaier^[11]用 3 个指标对高温热浪型骤旱提出了一个操作性定义:“(1)气温距平大于 1 个标准差(以候为基期计算)。(2)蒸散发距平大于 0。(3)土壤湿度小于 40%”。他们^[10]也提出了降水短缺型骤旱的操作性定义:“(1)气温距平大于 1 个标准差;(2)蒸散发距平小于 0;(3)降水量小于 40%”。

Trent W. Ford 等^[12]从气象特征方面对骤发干旱爆发进行了分析,并在此基础上对骤发干旱的涵义进行了商榷,并强调农业影响的角度将骤旱定义为“候平均土壤容积含水量(0~40 cm),在 4 候或更短时期内从至少 40%降至不到 20%”。美国德克萨斯州 2011 年干旱属于热浪型骤发干旱还是降水缺少型骤发干旱也存在分歧^[10,13]。Jason A. Otkin 等^[9]在综述论文《骤发干旱—美国境内快速发生的干旱所致挑战的回顾及评估》中提出:“我们认为骤旱的任何定义都应该内在地解释其快速增强(flash,指骤发)和水分限制的实际条件(drought,指干旱)。我们建议将骤旱视为所有干旱的一个子集,这些干旱与其他常见的缓慢发展的干旱区别在于它们异常迅速的增强速度。该定义可以无缝地应用于所有类型的干旱。我们不建议在这种情况下将骤旱事件全过程归类为干旱;相反,骤旱一词应着眼于快速增强的时间段内。”Jason A. Otkin 等^[9]还认为:“Mo 和 Lettenmaier^[10-11]要求在一个为期 5 天的时间内土壤湿度必须低于 40%才能发生干旱。由于他们的定义不能解释土壤水分随时间的变化,阈值也不足以实际被认为是干旱,我们认为他们的定义并不能识别干旱,因此应停止使用。”

2 “骤发干旱”识别、监测方法的研究进展

2.1 地面气象数据为主的骤发干旱识别与监测方法研究进展

当前关于骤发干旱的识别与监测,仍处于探索阶段,一些研究利用或开发有关干旱指数围绕具体的骤发干旱事件进行了相应的分析。《区域和全球尺度干旱监测和预测系统综述》认为骤发的监测需要综合气象预报与气候预测^[14]。目前各类干旱指数众多,但适宜用于分析与监测骤发干旱的指数有限且待检验,如标准化降水指数 SPI 就不适宜,因为它没有考虑温度因子。有可能用于骤发干旱监测的标准化降水蒸散指数 SPEI,它的立意特别强调适于检测和监测全球变暖背景下干旱的变化特征,该指数同时考虑了降水与温度的影响^[15]。德国 Kira Rehfeldt 等^[16]正在对其境内的一个流域开展骤发干旱研究,并认为 SPEI 可以用于该流域的骤发干旱分析。

近几年提出的一种蒸发需求干旱指数 EDDI (evaporative demand drought index) 指数已被认为能够有效地用于骤发干旱检测、与其他方法结合时能够起到预警作用,正引起美国多家科研机构的注意与重视。它的原理清晰、算法简单且已经公开,数据上主要使用比较常规的地面气象资料(气温、湿度、风速、太阳辐射),不需要遥感数据^[17]。EDDI 除了具有良好的识别与监测骤发干旱能力外,它还有较强的预测能力。由于降水的季节预报不确定性很大,不需要降水信息的 EDDI 指数在骤发干旱爆发时机的捕捉上能够比其他指数提前 1~3 个月,体现了 EDDI 的预测潜力^[18]。Daniel J. Mcevoy 等^[19]指出,在美国大陆本土,与美国干旱监测(USDM, U. S. Drought Monitor)、SPI 及 SSI (standardized soil moisture index) 等干旱指数相比,EDDI 往往能够超前地发现干旱的爆发,对于骤发的预报能够提前于 USDM 指数两个月。目前我国也出现了使用 EDDI 的文章,用 SPI 指数、SPEI 指数与 EDDI 研究中国大陆 1961—2013 年干旱演变、严重程度与趋势,并推断 EDDI 在中国骤发干旱分析上有良好的前景^[20]。

Jordan I. Christian 等^[21]2019 年提出了一种基于客观百分位数的方法,通过标准化蒸发胁迫比 SESR (standardized evaporative stress ratio) 和特定时段内 SESR 值的变化来识别骤发,其中的 ESR 被定义为蒸散发与潜在蒸散发的比值。研究认为,使用 NARR 再分析资料 (north American regional reanalysis) 计算得到的 SESR,对美国 1979—2016

期间 4 个典型骤发事件的识别能力上,与基于遥感、识别骤发效果显著的蒸发胁迫指数 ESI (evaporative stress index) 指数相差不大。与 USDM 相比,SESR 提前识别骤发的性能具有比较显著的优势。

2.2 实测与模拟土壤含水量为主的骤发识别与监测方法研究进展

Martin Mozy 等根据自动气象站采集的 0~0.1、0.1~0.5、0.5~0.9 m 等不同土层的土壤含水量观测资料,使用土壤湿度指数 (soil moisture index, SMI) 研究了捷克境内的骤发变化,认为可望提前 3 周做出一个比较有效的预报^[22]。Trent W. Ford 等^[23]对 2000 年至 2013 年俄克拉荷马州发生的 5 次骤发事件进行了分析,认为基于原位土壤水分百分位数的识别方法能够提前美国干旱监测系统 (USDM) 2~3 周对骤发进行预警。

基于模拟土壤含水量的骤发识别方法的研究,目前虽然也很少,但由于实测土壤含水量数据的观测站点本身的稀缺性与获得的艰难性,模式模拟土壤含水量的研究正逐渐得到研究者们的重视。Mo 和 Lettenmaier^[11]使用温度观测和 VIC 等 4 个陆面模型重建的土壤水分和蒸散发,对 1916—2013 年的生长季节(4—9 月)美国骤发的时空特征进行了探索,认为美国大陆本土的骤发最有可能发生在生长季节期间的中西部和太平洋西北地区。

张余庆等^[24-25]在江西省赣江流域骤发研究中采用 VIC 模型模拟土壤湿度,认为 VIC 模型模拟与输出的土壤湿度能够较好地用于骤发分析,发现赣江流域北部的平原比南部的山地更容易发生骤发,骤发的增加可能归因于温度、降水、蒸散和土壤湿度等变量。此外,还采用 VIC 模型与 CMIP5 数据中不同模式数据进行单向耦合,发现不同耦合对骤发特征的反映程度有差异,认为 MRI-CGCM3、ACCESS1.0、BCC_CSM1.1、Can-ESM2 与 CESM1 (BGC) 5 个模型的组合既优于单个模式、又优于 CMIP5 中全模式数据的集合^[26]。

在结合土壤湿度与气候模式进行骤发识别与监测方面,美国国家基金委员会在官网的“亮点新闻”中介绍了在其资助下的一篇骤发预测论文,该研究认为观测数据与区域模式集合预报结合、注重前期土壤湿度与积雪状况,有使骤发预报提前几个月的潜力^[3]。

2.3 遥感分析与解译技术为主的骤发识别与监测方法研究进展

多年来,遥感技术监测干旱在国内外已经有了

大量研究,取得了很大的进展^[27-28]。但是,适用于骤发干旱的遥感监测方法及分析技术,目前仍比较薄弱。

近年出现的蒸发胁迫指数 ESI (evaporative stress index)、快速变化指数 RCI (rapid change index) 等卫星遥感反演算法已被用于对骤发干旱早期爆发的探索性研究^[1,29-30]。现有研究表明,基于遥感反演的蒸散胁迫指数 ESI 在分析与监测骤发干旱的发生发展上具有优良的效果^[31]。ESI 的优点之一,是主要通过遥感获得的每日地表温度 (LST) 为基础,可以不需要与不依赖地面降水,独立而非常有效地识别与监测骤发干旱。ESI 在具体操作层面,内嵌于 ALEXI 模型之中。ESI 方法也已被用于巴西、澳大利亚等地发生的骤发干旱检测研究^[32-33]。Jason A. Otkin 等^[29]在 ESI 算法的基础上提出的 RCI 算法,可以补充与丰富 ESI 刻画骤发干旱的能力。Jason A. Otkin 等^[9]还指出:“诸如 ESI 和 ED-DI 之类的工具是相互补充的,因为干旱信号经常在 EDDI 中出现,但是以高误报率为代价,因为并非具有异常高蒸发需求的区域都会干旱。ESI 可用于更好地描述在蒸发需求增加的广泛区域内哪些区域实际上正在经历水分胁迫状况。”

Gabriel B. Senay 等经过研究,认为 SSEB (simplified surface energy balance) 与 MODIS 遥感卫星产品的结合能够使基于 MODIS LST 的 SSEB 模型拥有更强的敏感性,有助于提高“快速发展性干旱”(例如骤发干旱)的识别能力^[34]。

关于提前预警预报,由于 USDM 与 VEGDRI (vegetation drought response index) 都难以有效地较大提前量预测突发性的骤发干旱,2013 年 NASA 委托美国多家气象、水文研究机构与高校合作研发可用于美国本土骤发干旱监测与预测的“快速干旱响应指数”(quick drought response index, QuickDRI)。QuickDRI 是一个集成系统,综合遥感信息与模式模拟数据与一些干旱指数(包括 SPEI),目前已被用于美国干旱与骤发干旱预报,具有良好的效果,并正在进一步改进^[35]。GRACE-FO 等^[36]遥感卫星也被作为 QuickDRI 的数据来源以预测骤旱。

国内研究者对于骤旱的遥感识别与监测研究也在逐步展开。袁星等^[37]对 2013 年严重影响中国南方 13 个省的夏季高温干旱,利用分位点映射方法,结合最新的 GLDASv2 陆面同化数据,分别对主、被动微波遥感产品进行校正并融合,发现经过校正后的 ESA CCI 卫星遥感产品能在不同空间尺度为短期干旱提供独立于再分析资料的监测信息,并认为这次影响中国南方多省的大范围严重干旱属于骤发

干旱。

3 “骤发干旱”机理与时空变化的研究进展

在成因上,骤发干旱一般表现为发生在作物生长季的短期干旱,常常伴随着热浪等高温天气,并通过陆气间的正反馈机制进一步加剧。骤发干旱的驱动因素既有大的环流异常为背景,又与地表的气象、水文、土壤、植被、地形、地貌等有明显关系,呈现出比较复杂的相互关系。Mo 和 Lettenmaier 研究指出,美国大陆本土 20 世纪 20 年代至 40 年代,曾有一段骤发干旱的高发期,1960—1972、1991—2006 为低发期,2011 后骤发干旱发生频率有所增加。从多年时段段看,骤发干旱发生势头略减的原因与 P (降水) 值的趋势及作物生长季的 SM (土壤水分) 增加有关。同时指出骤发干旱的发生主要集中在气候湿润、植被茂盛地区^[10]。Martin P. Hoerling 等^[38]认为,2012 年骤旱是美国中部大平原 117 年(1895—2012)以来最严重的干旱事件,并且认为此次大旱主要受气候的自然变率影响。Jeffrey B Basara 等^[39]采用 SESR 分析、地气耦合两种方法对比研究后认为,不利的地气条件,限制了深层大气对流的形成,加剧了蒸发胁迫,增强了骤旱 2012 年在美国中部的辐射式传播。Tobias Gerken 等^[40]采用低对流层湿度指数(lower tropospheric humidity index)研究了美国北部大平原 2017 年骤旱与对流抑制的关系后指出,将对流可能性加入干旱预报后,能够提前发现对流性降水在作物生长早期的异常偏少。美国、巴西、土耳其等国学者联合对巴西 2003—2013 年干旱形势进行了研究,认为 2009 与 2012 巴西分别发生过骤发干旱^[41]。捷克 Vera Potop 等^[32]采用 SPEI 指数、结合 EOF 分析了骤发干旱及发生前后的干旱特征与时空变化。袁星等^[42]以南非发生骤旱的 2015 年、2016 年雨季作为实例进行了研究,发现非洲南部的东部比西部更容易遭遇骤旱,并认为人为气候变化明显加剧了南部非洲骤发干旱。Jason A. Otkin 等^[43]2019 年首次采用“骤发恢复”(flash recovery)一词表示骤旱意义上的旱涝急转现象,并建议采用不同的数据集进行比较研究,以更好地追踪骤旱与“骤发恢复”的演变特征,并对“骤发恢复”在美国大平原地区的变化特征进行了分析。

我国学者在骤发干旱发生机理与时空变化上也积极探索,有关成果正在逐步增加^[44-46]。袁星等^[44]利用中国 2 474 个气象站 1961 年到 2014 年的每日地面气温和降水量数据,研究了骤发干旱的长期变化趋势后指出,1979—2010 年,中国骤发干旱增加

了 109%，骤发干旱更有可能在湿润半湿润地区发生，如中国南方和东北地区。他们认为，这种增加可能主要是长期变暖造成的，但与土壤湿度下降和蒸散发作用增强也有关系。王琳瑛^[45]对我国南方及东北地区发生骤发干旱的机会较多作了分析，认为可能是湿润半湿润地区（如南方和东北地区）水汽充足，蒸散发主要受能量控制，所以在高温条件下更容易发生蒸散发正异常，为骤发干旱的发生提供有利条件，并认为“由于地理位置的特殊性，重庆、四川盆地夏季热浪和干旱共同发生的概率极大”，并推断 2006 年入夏后川渝地区爆发了一次典型的骤发干旱。张余庆等^[25-26]对处于南方亚热带湿润区的江西省骤发干旱发生可能性、驱动机理与时空变化进行了一些探索，以鄱阳湖流域的最大子流域——赣江流域为重点，探讨了该流域内的骤发干旱特征与分布，发现赣江流域北部的平原比南部的山地更容易发生骤发干旱^[24]。有研究基于 1983—2015 数据分析了降雨骤旱、高温骤旱和复合骤旱等 3 类骤旱的发生情况及特点，认为我国农业区域的骤旱次数呈现逐年增加的趋势，尤其是高温引发的骤旱呈现急剧增长趋势，我国东北农业地区是骤旱的重灾区，发生频率高，骤旱主要集中在春季和夏季，分别以高温骤旱和降雨骤旱占主导^[46]。王琳瑛等^[47]探究了两类骤发干旱在我国不同地区的发展演变，并对不同驱动机制下骤发干旱的分布及其与季节干旱的联系进行了解释：“通常情况下，反气旋环流异常为骤发干旱的发生提供有利条件，但由于不同地区气候、植被和土壤条件的不同，两类骤发干旱的分布存在较大差异。在中国南方，由于水汽较为充足，蒸散发主要受到能量控制，温度升高极易引发蒸散发快速增加并导致干旱，I 型（注：即热浪型）骤发干旱更易发生在南方等湿润地区这一现象，并且约有 15% 的骤发干旱发生在季节干旱的爆发阶段。相反，北方由于长期水分供给不足，发生降水短缺时更易导致土壤湿度的快速减少从而引发 II 型（注：即降水短缺型）骤发干旱，且该地区骤发干旱较易发生在季节干旱的爆发阶段和恢复阶段”。Haoyue Zhang 等^[48]将热浪型骤旱视作一种短期并发性热干极值 SCHDE (short-term concurrent hot and dry extreme)，对珠江流域 1980—2010 年的热浪型骤旱进行了研究，定量估计了气温、土壤湿度、蒸散发对于 SCHDE 的不同贡献，认为气温 (T_{air}) 变异性对 SCHDE 变异性的贡献最大 (57.27%)，其次是土壤湿度 SM (28.43%) 和蒸散发 ET (14.30%)。Minxia Zhang 等^[49]以浙江省安吉县山川乡为例，对毛竹

的骤旱事件响应及其水分利用特征和生理机制进行了研究，并指出：当地下 50 cm 处的土壤容积含水量低于 $0.17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时，毛竹发生生理脱水，通过落叶减少蒸腾作用，导致水分利用效率下降。当平均林分密度小于 $3\ 500$ 棵树/ hm^2 时，竹林抵御骤旱的效果比较好。

4 骤发干旱的研究前景展望

骤发干旱研究尽管时间不长，但进展很快，在时空分布、形成机理与监测预警等方面都已有不少成果。但是，在骤旱机理及时间尺度关联、骤旱归因及自然、人为因素的定量贡献、骤旱监测与预警等方面仍需进一步深入探讨。就我国而言，全国范围以及大中型流域或区域的骤旱时空特征研究正逐步展开，呈方兴未艾之势。下面就这几个重点问题对骤旱的研究前景进行展望。

4.1 注重不同时间尺度的关联，深化骤旱机理研究

骤发干旱的响应特征、骤发干旱的启动机制与骤发干旱发生之后的持续性以及与大气环流、海陆气相互作用等的关联需要进一步探索。通过探究骤发干旱背后的环流机制研究，从动力学角度等分析骤发干旱的演变特征。在成因上，除大气环流、海气相互作用外，需要重视前期土壤水分及积雪，包括较长时间之前的状况对骤发干旱的控制作用。由于骤发干旱在一定条件下能演变成长期大干旱，因此，骤发干旱和长期干旱及与气候变化的关系及相互影响需要研究。此外，也迫切需要进行不同时空尺度上骤发干旱变化特征及其物理机制的深入研究。

4.2 定量区分自然与人为影响，加强骤旱归因研究

在全球气候变暖的大背景下，尽管现有的研究认为，气候变暖与骤旱的响应关系比较复杂，相对于以前的干旱研究，骤发干旱，特别是热浪型骤旱更关注高温与干旱的复合效应对干旱的影响。骤旱的归因研究及自然、人为因素的定量贡献，是值得深入探讨的问题。对骤旱发生机会多的区域而言，也需要做更多的研究来量化骤旱风险及其趋势。

4.3 综合及创新多种前沿技术，提高骤旱预警水平

由于骤发干旱发生迅速，如果缺乏相应预警措施，会给农业生产造成重大损失。关于骤发干旱的识别与监测，需要考虑在气候变暖的现实背景下，骤旱的有效识别与监测还需要改进与创新哪些理论工

具? 需在骤发干旱发生机制的研究基础上,通过比较与创新可用于骤旱识别与预警的干旱指数。在监测、预警手段上需要强调遥感技术、气候因素、下垫面因素的通盘。运用结合遥感、地理信息系统、大数据、智能算法等领域的前沿技术提高骤发干旱的预警能力。

4.4 统计技术与模式预报并举,加强骤旱预测预估

可采用精细化时空统计降尺度技术,提高分布式气候模型的计算精度,减小气候模式耦合水文模型所造成的误差。寻求更为科学的模式评估方案,优化多模式集合平均对骤发干旱的刻画能力。CMIP5 多模式试验基本能够再现骤发干旱的空间分布和长期变化,可在此基础上,对未来气候变化背景下骤发干旱的变化做出预估。对于全球特定温升阈值下骤发干旱的变化特征研究,可利用 CMIP6 资料,预估全球增温 1.5 °C 背景下骤发干旱变化特征。

4.5 针对水资源、农业及生态,加强骤旱影响研究

骤旱对水资源的影响,涉及到国家与区域的水安全,对农业与社会经济都有显著影响。骤旱的水文响应研究目前还比较薄弱,亟待加强。骤旱对农业的影响,也需要进行比较全面的评估。特别是在农作物的关键生长阶段,如种子萌发、授粉、灌浆等不同时期,骤发干旱对其生长发育和产量的影响需要进一步研究,从而为制定有效的预防措施提供科学依据和建议。骤旱对生态生理学和生态系统动态的长期影响的潜在机制,如植物生长减少和死亡率增加,物种竞争的变化以及虫害和病原体的爆发,也是值得研究的科学问题。此外,也需要对骤旱的水资源、农业及生态影响等提出适应性对策。

致谢:本文撰写与修改过程中,北京师范大学徐宗学教授、武汉大学谢平教授与审稿专家都提供了有益的建议,特致谢忱。

参考文献(References):

[1] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared-based evaporative stress index[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(4): 1057-1074. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0144. 1.

[2] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1181-1190.

[3] PAIMAZUMDER D, DONE J M. Potential predictability sources of the 2012 U. S. drought in observations and a regional model ensemble [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(21): 12581-12592. DOI: 10.1002/2016JD025322.

[4] FREEDMAN A. Lack of warning on drought reflects forecasting flaws[Z]. www.climatecentral.org/news/lack-of-warning-on-2012-us-drought-reflects-flaws-in-forecasting-14823, 2019-2-18.

[5] SMITH K H. NASA funds project to help spot flash drought [Z]. <http://news.unl.edu/newsrooms/unltoday/article/nasa-funds-project-to-help-spot-flash-drought/>, 2013-10-31.

[6] 袁星. 气候变化背景下我国南方骤发干旱的演变趋势及驱动机制[Z]. 2019. (YUAN X. The evolution trend and driving mechanism of flash droughts in southern China under the background of climate change[Z]. 2019. (in Chinese)) <http://fund.sciencenet.cn/index.php/item/view/595813>.

[7] WILL P, SHEFFIELD J, STEFANSKI R et al. Toward global drought early warning capability: expanding international cooperation for the development of a framework for monitoring and forecasting[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013(94): 776-785. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00176. 1.

[8] 李耀辉, 周广胜, 袁星, 等. 干旱气象科学研究—“我国北方干旱致灾过程及机理”项目概述与主要进展[J]. *干旱气象*, 2017, 35(2): 165-174. (LI Y H, ZHOU G S, YUAN X, et al. Summary of the main progress of drought meteorology scientific research: The mechanism and disaster formation processes of drought in the north region of China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, 35(2): 165-174. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0165.

[9] OTKIN J A, SVOBODA M, HUNT E D, et al. Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid onset droughts in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018(99): 911-919. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0149. 1.

[10] MO K C, LETTENMAIER D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016(17): 1169-1184. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0158. 1.

[11] MO K C, LETTENMAIER D P. Heat wave flash droughts in decline [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2823-2829. DOI: 10.1002/2015GL064018.

[12] FORD T W, LABOSIER C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the

- Eastern United States [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017 (247): 414-423. DOI: 10. 1016/j. agrformet. 2017. 08. 031.
- [13] YANG Z. Developing a flash drought indicator for the U. S. Great Plains[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2013.
- [14] HAO Z C, YUAN X, XIA Y L, et al, An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017 (98): 1879-1896. DOI: 10. 1175/bams-d-15-00149. 1.
- [15] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010(23): 1696-1718. DOI: 10. 1175/2009JCLI2909. 1.
- [16] REHFELDT K, BECKER A, ZIESE M. Data and drought monitoring activities at the Deutscher Wetterdienst [EB/OL]. http://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/EDO_User_Meeting/2017/12_Rehfeldt_DWD%20Drought%20Monitoring%20Activities.pdf, 2017-11-09.
- [17] HOBBS M, WOOD A, MCEVOY D, et al. The evaporative demand drought index. part I: linking drought evolution to variations in evaporative demand [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17 (6), 1745-1761. DOI: 10. 1175/JHM-D-15-0121. 1.
- [18] MCEVOY D J. Physically based evaporative demand as a drought metric: Historical analysis and seasonal prediction[D]. Reno: University of Nevada, 2015.
- [19] MCEVOY D J, HUNTINGTON J L, HOBBS M T, et al. The Evaporative demand drought index. Part II: CONUS-wide assessment against common drought indicators[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17 (6): 1763-1779. DOI: 10. 1175/JHM-D-15-0122. 1.
- [20] YAO N, LI Y, LEI T et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018(616-617): 73-89. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 10. 327.
- [21] CHRISTIAN J I, BASARA J B, OTKIN J A, et al. A methodology for flash drought identification: Application of flash drought frequency across the united states[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 833-846. DOI: 10. 1175/JHM-D-18-0198. 1.
- [22] MOZNY M, TRNKA M, ZALUD Z, et al. Use of a soil moisture network for drought monitoring in the Czech Republic[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 107 (1-2): 99-111. DOI: 10. 1007/s00704-011-0460-6.
- [23] FORD T W, MCROBERTS D B, QUIRING S M, et al. On the utility of in situ soil moisture observations for flash drought early warning in Oklahoma, USA [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (22): 9790-9798. DOI: 10. 1002/2015GL066600.
- [24] 张余庆. 气候变化下赣江流域骤发干旱研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017. (ZHANG Y Q. Impacts of climate change on flash droughts in the Gan river basin[D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 2017. (in Chinese)).
- [25] ZHANG Y Q, YOU Q L, CHEN C C, et al. Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: A case study in the Gan River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017(551): 162-176. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 05. 044.
- [26] ZHANG Y Q, YOU Q L, CHEN C C, et al. Evaluation of downscaled CMIP5 coupled with VIC model for flash drought simulation in a humid subtropical basin, China[J]. *Journal of Climate*, 2018(31): 1075-1090. DOI: 10. 1175/JCLI-D-17-0378. 1.
- [27] WARDLOW B D, ANDERSON M C, VERDIN J P. Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [28] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848. (LIU X F, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect [J]. *Acta geographica sinica*. 2015, 70 (11): 1835-1848. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201511012.
- [29] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining the relationship between drought development and rapid changes in the evaporative stress index [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014 (15): 938-956. DOI: 10. 1175/JHM-D-13-0110. 1.
- [30] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Using temporal changes in drought indices to generate probabilistic drought intensification forecasts [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015 (16): 88-105. DOI: 10. 1175/JHM-D-14-0064. 1.
- [31] ANDERSON M C, HAIN C R, WARDLOW B, et al. Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States[J]. *Journal of Climate*, 2011(24): 2025-2044. DOI: 10. 1175/2010JCLI3812. 1.
- [32] POTOP V, BORONEANȚC, MOŽNÝ M, et al. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 115 (3): 563-581. DOI: 10. 1007/s00704-013-0908-y.
- [33] NGUYEN H, WHEELER M C, OTKIN J A, et al.

- Using the evaporative stress index to monitor flash drought in Australia [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14 (6). DOI: 10.1088/1748-9326/ab2103. (in press).
- [34] SENAY G B, BUDDÉ M E, BROWN J F, et al. Mapping flash drought in the U. S. southern Great Plains [EB/OL]. 22nd Conference on Hydrology (AMS, USA). 2008. <https://ams.confex.com/ams/88Annual/webprogram/22HYDRO.html>, 2008-01-22.
- [35] BROWN J, LUBECK M. New warning system identifies flash drought quickly [EB/OL]. <https://www.usgs.gov/news/new-warning-system-identifies-flash-drought-quickly>, 2017-07-12.
- [36] RASMUSSEN C. GRACE-FO will help monitor droughts [EB/OL]. <https://gracefo.jpl.nasa.gov/news/129/grace-fo-will-help-monitor-droughts/>, 2018-05-14
- [37] YUAN X, MA Z, PAN M, et al. Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (11): 4394-4401. DOI: 10.1002/2015GL064125.
- [38] HOERLING M, EISCHEID J, KUMAR A, et al. Causes and predictability of the 2012 Great Plains drought [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014(95): 269-282. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00055.1.
- [39] BASARA J B, CHRISTIAN J I, WAKEFIELD R A, et al. The evolution, propagation, and spread of flash drought in the central United States during 2012 [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14 (8). DOI: 10.1088/1748-9326/ab2cc0. (in press).
- [40] GERKEN T, BROMLEY G T, RUDELL B L, et al. Convective suppression before and during the United States northern great plains flash drought of 2017 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22, 4155-4163. DOI: 10.5194/hess-22-4155-2018.
- [41] ANDERSON M C, ZOLIN C A, SENTELHAS P C, et al. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016(174): 82-99. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.034.
- [42] YUAN X, WANG L Y, WOOD E F. Anthropogenic intensification of southern African flash droughts as exemplified by the 2015/16 season [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(1): S86-S90. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0077.1.
- [43] OTKIN J A, ZHONG Y F, HUNT E D, et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during a flash drought-flash recovery sequence over the south-central United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019 (20): 549-562. DOI: 10.1175/JHM-D-18-0171.1.
- [44] WANG L Y, YUAN X, XIE Z H, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus [J]. *Scientific Reports*, 2016 (6): 30571. DOI: 10.1038/srep30571.
- [45] 王琳瑛. 中国区域骤旱的归因和影响研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. (WANG L Y. Attribution of flash drought and its impacts over China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese))
- [46] 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 1983—2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1048-1057. (ZHANG X, CHEN N C, HU C L, et al. Spatio temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015 [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (10): 1048-1057. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.10.1048.
- [47] WANG L Y, YUAN X. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35 (12): 1478-1490. DOI: 10.1007/s00376-018-8047-0.
- [48] ZHANG H Y, WU C H, HU B X. Recent intensification of short-term concurrent hot and dry extremes over the Pearl River basin, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2019. DOI: 10.1002/joc.6116. (in press).
- [49] ZHANG M X, CHEN S L, JIANG H, et al. Water-use characteristics and physiological response of moso bamboo to flash droughts [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (12): 2174. DOI: 10.3390/ijerph16122174.