

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.002

特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展

马明卫¹, 韩宇平¹, 严登华², 张小丽¹

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要:为有效推进特大干旱事件灾害孕育机理及其影响的研究,在回顾与展望特大干旱灾害的基础上,分别对其次生灾害孕育过程和对生态环境长期影响的研究进行梳理与评述,指出当前研究中存在的主要问题与薄弱环节,包括对特大干旱的聚焦不够、干旱灾害链及多灾种协同演进定量研究亟待深入、特大干旱对养分循环与生态过程的长期影响等方面的研究相对匮乏。认为特大干旱事件灾害孕育机理及影响方面的整体研究框架尚未确立,相应研究体系和技术方法体系也远未形成。建议未来着重研究特大干旱次生灾害的深层链式结构和复杂能量传递问题,有效揭示特大干旱事件灾害孕育机理与多灾种协同演进机制,进一步阐明特大干旱对水文生态过程和地表环境的多重影响。

关键词:特大干旱;次生灾害;灾害链;极端气候;全球变化;生态环境

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)05-0011-11

Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters // MA Mingwei¹, HAN Yuping¹, YAN Denghua², ZHANG Xiaoli¹ (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to effectively promote the research on the mechanism and influence of disasters caused by extreme drought events, this study provides an overview of scientific literatures regarding the evolution of extreme drought-induced disasters and relevant long-term influences on ecological environment based on the review and prospect of extreme drought disasters. It is pointed out that the major problem and weak link of current researches mainly include insufficient focus on extreme droughts, coarse quantification of drought disaster chains and concurrent evolution of multiple disasters, and deficient research on the long-term effects of extreme drought on nutrient cycling and ecological process. It is found that the overall research framework for the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters has not been established and the corresponding research and technical systems are far from formation. It is suggested that the future research should more focus on the deep chain structure and complex energy transfer of extreme drought-induced disasters, so as to effectively reveal the mechanism of extreme drought-induced disasters and concurrent evolution of multiple disasters, and to further illuminate the multifold impacts of extreme droughts on hydro-ecological process and land surface environment.

Key words: extreme drought; secondary disaster; disaster chain; extreme climate; global change; ecological environment

全球变化背景下干旱灾害愈演愈烈,已经成为当前社会经济发展的重要制约因素^[1-2]。一方面,干旱影响地表水和地下水,可能导致水资源供给不足、水质恶化、粮食减产、生产力降低、发电量减少,还会干扰河岸栖息地并影响其他社会经济活动;另一方面,干旱还可能改变区域水文特性,通过影响径流改变水体中泥沙、有机质、营养盐等的运移与分配,从

根本上影响江河湖库的水环境与水生态。除此以外,特大干旱及其次生灾害还可能在一定程度上重塑地表陆域生态环境,造成长期的、不可逆转的影响。目前,有关旱灾影响的研究仍多集中于直接影响,特别是干旱对缺水的影响^[3-6];而对干旱,尤其是特大干旱可能引发的次生灾害及其长期影响的关注不够,相关研究较为薄弱、分散,尚缺乏整体性的研

基金项目:国家自然科学基金(41701022)

作者简介:马明卫(1986—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: mamingwei@ncwu.edu.cn

通信作者:严登华,教授级高级工程师。E-mail: yandh@iwhr.com

究思路与框架。基于此,为有效推进特大干旱事件灾害孕育机理及其影响方面的研究,本文在回顾与展望特大干旱灾害的基础上,分别对其次生灾害孕育过程和对生态环境长期影响的相关研究进行梳理与评述,探讨当前研究中存在的主要问题与薄弱环节,并展望未来研究的可能发展方向。

1 特大干旱回顾与展望

近年来,我国局部性、区域性的干旱灾害连年发生,重特大干旱灾害也呈现频发的态势^[7]。我国历史上平均每2~3年即发生一次较大影响的旱灾。20世纪的100年间我国发生严重旱灾18次,而进入21世纪以来的前20年就已发生了10次较严重的旱灾。2006—2007年,我国川渝地区发生严重干旱;2009年底至2010年6月,西南5省(区、市)发生特大干旱灾害;2011年1—5月,长江中下游地区湖北、湖南、江西、安徽、江苏5省及西南部分省份发生了特大干旱^[8]。文献调研发现,目前国内特大干旱及其灾害的最新研究大多聚焦于西南地区的特大干旱(其中大部分重点探讨2009—2010年西南大旱)^[9-14],其他多见于对湖南、安徽、陕西、新疆、河南等局地历史特大干旱的场次分析^[15-19]。同时,有关干旱灾害后评估方面的研究亟待加强,特别是重特大干旱灾害相关研究还很不成熟。部分学者研究了历史特大干旱的发生规律,偏重对场次旱灾的具体评价,但往往只借助于经验分析或代表性数据对比,所得结果可能缺乏客观性^[20]。

近几十年,我国重特大干旱灾害频发的原因^[8]有以下几点:其主要原因是全球气候变化所导致的极端气候事件增加;其重要原因是人口数量、用水需求激增和用水结构变化等导致社会经济干旱灾害脆弱性增强;其客观原因是水利基础设施建设滞后于社会经济发展导致应对极端干旱事件能力偏弱。上述因素的交织与叠加,将进一步加重未来应对特大干旱的压力。

越来越多的证据表明,气候变化加剧了与水有关的极端事件,其中就包括极端干旱的频发,这将进一步影响水资源的时空分布和可用性。在全球范围内,预计特大干旱的影响面积将显著扩张^[21-22]。由于气候变化与干旱灾害对生态环境和社会经济方面的影响,许多国家将面临日益严重的水资源短缺压力。在可以预见的未来,气候变化引起的干旱及其灾害对人类社会的影响将更加广泛而深入,包括对水资源、生态环境、人类健康、粮食和农业、能源和工业等诸多方面可能造成的威胁与灾难性破坏^[23]。面对与特大干旱等极端事件相关的当前影响和未来

预期风险,我们必须为适应气候变化和减少灾害风险提供可持续的解决方案^[24-25]。

2 特大干旱次生灾害

目前国内外文献中“次生灾害”的表述多见于地震(占比最高)、暴雨洪涝、台风等重大突发现象,而鲜见于干旱或旱灾;而在灾害系统或灾害链的相关文献中,一般表述为“干旱灾害链”,考虑其中干旱或旱灾作为原生灾害的情形,但“干旱灾害链”相关文献的数量也不是很多。

2.1 干旱灾害链

通常情况下,一种灾害的发生往往触发或伴随另一种或多种灾害的发生。触发或伴发的灾害称为次生灾害,引起次生灾害触发或伴发的灾害被认为是初始灾害。同一地区或相邻地区的各种灾害,在一定条件下常常具有因果关系,构成自然灾害的链式结构(灾害链)^[26-27]。国内有关“干旱灾害链”的专门表述最早可能见于2002年^[28],据记载,2001年我国北方地区发生了严重的春夏连旱,不仅给工农业生产造成严重经济损失,而且还诱发了许多与干旱有关的灾害,形成一个“灾害链”,包括:虫灾(蝗灾)、火灾、风沙灾害、地面塌陷、危及野生动物等。此后,有少数学者对我国部分地区的干旱灾害链相关问题进行专门研究和探讨^[29-32]。

孤立的单一灾害客观上是不存在的,客观存在的是灾害系统,次生灾害是灾害系统的重要组成部分。而次生灾害具有多样性、扩散性、潜伏性、循环性、交叉性、破坏性等特性^[26]。最新数据显示,次生灾害将在全球范围内引发更多自然灾害损失;同时,次生灾害带来的风险往往被低估,因为其影响仍容易被原生灾害事件造成的损失所掩盖;然而已经有证据表明次生灾害带来的潜在损失在不断增加,且这一特征越发明显^[33]。以下围绕常见的干旱灾害链及次生灾害(图1),对国内外相关方面的研究现状展开综述。

2.2 高温热浪

干旱是一种较长时间尺度的气候灾害,而高温热浪是一种较短时间尺度的天气灾害;二者既有差异与区别,但又有紧密的内在联系。持续干旱通常是高温热浪发生的背景,而频繁的高温天气又会加快地表水分流失的速度,进一步加重干旱程度。干旱和高温热浪大都伴随降水量的显著偏少。在我国大部分地区,尤其夏季月平均气温与降水量呈负相关关系,温度高往往就意味着降水少。高温天气日数增多,促使平均气温上升,导致地表蒸发量增加,夏季高温酷暑天气伴随着干旱的情形很可能发生,

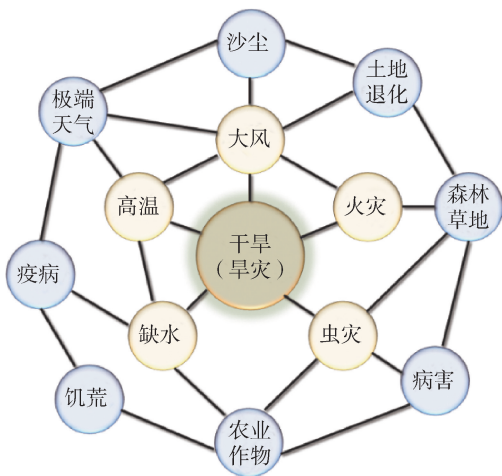


图1 干旱灾害链的互联关系

Fig. 1 The interconnections in drought disaster chains

或使干旱持续维持^[34-35]。地表变干和降水量减少与气温升高相关,地表变湿和降水量增多与气温降低有关^[36]。同时,土壤湿度与降水量呈正相关,与平均气温呈负相关,尤其夏季的气温与土壤湿度呈显著负相关^[37];随着气温升高,尤其夏季气温升高,促使上层土壤干旱化,深层土壤水分散失速度加快,土壤干旱程度加重^[38]。因此,气温对于分析和评估干旱程度而言举足轻重^[39]。如,我国北方夏季干旱范围及严重程度基本上与暖季极端气温变化相一致,若极端最高气温偏高、高温热浪频繁发生,则干旱趋势逐步加重,干旱影响范围也逐步扩大^[40]。

特别地,近年来有关高温热浪型骤发干旱的报道也需要引起重视,其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。骤发干旱是一种在植物生长季内发生迅速,持续1周到几周(一般维持时间在1个月以内),并以高温和土壤含水量短缺为主要特征的干旱事件,“短历时-高强度”导致其影响迅速、破坏性极大,且可能演变为长期持续性干旱^[41-42]。

2.3 森林火灾

高温-干旱-火灾是最常见的干旱灾害链之一。高温干旱极易引发森林、草原火灾和山火等。大多数森林火灾都发生在干旱高温季节,且一旦发生后难以控制和扑灭^[43]。如,2019年发生的澳大利亚山火和亚马孙森林火灾,除人为因素外,起火点多系干燥天气、强风及高温引起。

大量研究表明,世界各地的森林火灾与干旱气候因子有关。徐明超等^[44]认为干旱气候条件与森林火灾的发生有密切的关系,气温、日照、蒸发量、风力、空气湿度等影响着森林火灾的发生与发展;一般情况下,气温高、降水少、湿度小、风力大易发生森林火灾。张磊等^[45]发现气候越干旱林区火灾发生的

可能性越大,长期连续干旱可能导致森林大火的发生。兰明才等^[46]认为干旱情况下森林等植被含水率下降,当下降到一定程度时,森林火灾容易发生;最长干旱持续日数和森林火灾发生次数、受灾面积的相关性较高;森林火灾多发生在干旱条件下的连晴时段内。Siegert等^[47]发现厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)引起的特大干旱可能导致森林易燃性和火灾发生风险增加。Brown等^[48]揭示了草原火灾周期与草原干旱之间具有密切联系。Reinhard等^[49]发现气候变化导致大部分气候变量呈现有利于干旱和森林火灾的趋势,如无降水持续日数、日照时间和温度的增加以及相对湿度的降低等。Dimitrakopoulos等^[50]也认为气候变化导致干旱事件增加,将对山火的发生产生重要影响。Littell等^[51]发现森林火灾的发生及面积都明显随干旱而增加,且短期和长期干旱都很重要,会在多个方面影响火情的时空特征(火灾强度、严重性、空间范围和频率等)。Sutanto等^[52]通过分析高温热浪、干旱、火灾等多种灾害遭遇和相继发生的时空特征,认为高温干旱将极大增加火灾发生可能性和危险性。

2.4 风沙灾害

季节性的高温、干旱、少雨很容易导致区域性大风或强风天气盛行。我国东北、内蒙古和西南主要林区,春旱引发大风,进一步加剧干旱的情况较为常见^[53]。其他地区也多有干旱气象引发短时大风(强风)的报道,如新疆在每年三月(南疆)、四月(北疆)至十月期间的大气干旱常引发大范围旱风。干旱还会引发旱风型干热风,其特点是风速大。在遭遇高温低湿情况下,大风还会加剧大气干燥程度,加速作物蒸散发,使叶卷缩呈绳状,严重时可致叶片撕裂破碎。此种情形常见于我国新疆地区和西北黄土高原的多风地带,尤其在干旱年份频繁出现。有研究^[54]表明,我国北方气候总体呈现长期暖干化的趋势,可能导致干旱和干热风发生区域扩大、次数增多、强度增强、危害加重。

持续干旱还可能诱发沙尘天气,甚至沙尘暴。沙尘天气的出现受风力作用和地表状况的综合影响。一方面,风是沙尘的重要驱动力,决定着沙尘天气的强度;另一方面,地表是沙尘的主要来源,植被覆盖、土壤湿度等状况制约着沙尘天气的规模 and 范围。长期干旱很可能造成植被减少和土壤退化(如荒漠化、沙化),恶化地表总体环境状况。因而,在遭遇强风时极易形成浮尘、扬沙、沙尘暴等不同程度的沙尘灾害。如,我国新疆地区的沙尘天气主要发生在易旱的春季,其干旱灾害与沙尘天气之间存在明显的正相关关系^[55]。预计随着干旱程度增加、极

端天气事件增多,风蚀和随之而来的粉尘也会相应增加^[56]。在未来干旱条件下,通常伴随人为扰动并依赖足够水分的传统生态修复方法,可能带来更大的地表侵蚀风险,这一点需要特别加以重视。

2.5 病虫害

蝗虫灾害是一类常见且对地表植被(特别是农作物)具有极大破坏性的病虫害,其发生与蔓延过程大都与连续干旱少雨有关。1942—1943年发生在河南地区的旱、风、蝗灾害,其灾情之重、范围之广为近代所罕见^[57-58]。1942年,该地区夏季降水量仅为常年降水的1/10~1/3,远不能满足作物生长需水;夏季雨水奇缺、秋季干旱持续是大旱发生的关键所在。同时,麦收季节干热风的肆虐导致小麦大幅减产,仅收获二成左右。1943年,多数县水旱交叠,夏季小麦灾重者仅收二三成,轻者五六成;麦后正值秋季作物生长季,河南全境爆发蝗灾,蝗虫肆虐,秋粮灾重者绝收,灾轻者仅能收一二成。据《河南大事记稿》载“河南本年饿死300万人,流亡他省300万人,濒于死亡边缘等待救济者1500万人”。回顾此次触目惊心的特大旱灾,因旱而生蝗灾的灾难性后果可见一斑。姜逢清等^[55]的研究也表明我国蝗灾的暴发与旱灾的发生具有一定的时空同步性,表现出明显的灾害链效应,如新疆地区农田干旱受灾面积与蝗灾受灾面积之间存在显著线性相关关系。2019年大规模暴发的东非沙漠蝗灾,也与热带暴雨、洪涝、干旱等异常天气与气候条件不无关系^[59]。

除了蝗灾,其他虫害也是暖干条件下容易发生的干旱衍生自然灾害^[60]。受近几十年全球气候变暖的影响,我国大部分地区暖冬现象明显多发,有利于病菌卵越冬。入春后,由于南方暖湿、阴雨寡照及北方暖干等气象条件,适宜某些病虫害的发生与蔓延,而且发生早、范围广^[61]。黄淮海地区及四川、湖北、上海、陕西、甘肃等地各类农作物有红蜘蛛、赤霉病、白粉病、条锈病、蚜虫、吸浆虫、纹枯病等病虫害发生与蔓延。特别是春夏长期干旱,容易继发麦虫、棉虫等病虫害,在作物生长季造成严重威胁^[62];松毛虫等林区病虫害,也会引起树木病害甚至死亡^[63]。

2.6 疫病和饥荒

持续干旱可能导致水源枯竭,造成供水严重不足(人畜饮用水困难、农业灌溉和工业生产缺水等)。特别是长期严重干旱导致饮用水源水质恶化、卫生条件差,很容易诱发各类疾病^[64]。干旱期间水资源供应不足,水源的补给量和水位降低,水的稀释能力减弱;持续的干旱使不符合饮用水标准的二次供水和自备水源比例增加,且水中游离余氯、细

菌总数和大肠菌群超标率较高。因而,干旱期间的水源更容易受到粪尿和病原体污染,引起消化道疾病的暴发流行^[65]。同时,干旱缺水直接导致农作物大面积枯萎、减产甚至绝收,进而引发粮食危机和饥荒。2002—2003年南部非洲的粮食危机和1998年苏丹南部的灾难性饥荒,大量人口和牲畜因缺水、缺粮而死,进一步导致疫病的流行和死亡率的上升。此外,干旱和气候变化也是导致贫困发生的重要原因之一,特别是落后的农村和山区,用水和粮食安全问题仍较为突出^[66]。

3 特大干旱对生态环境的长期影响

20世纪下半叶以来,全球处于快速升温增暖状态;不过在1998—2012年出现过暂时的增温停滞现象,近几年全球快速变暖趋势已基本恢复到原来的水平^[67]。在此种背景下,全球气候和地表环境的长期暖干化趋势似乎越来越明显。全球干旱化的加剧,特别是超大范围(地区、大陆尺度)极端干旱事件的频繁发生,将在不同程度上对地表生态环境(能量圈、水圈、大气圈、土壤圈、生物圈、人类圈等)产生广泛而深远的影响(图2)。

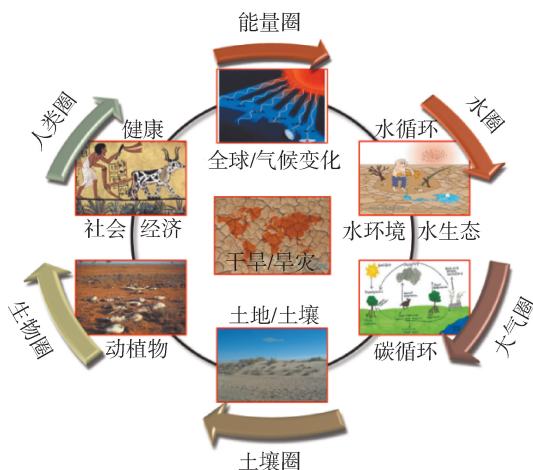


图2 干旱对地表圈层的长期影响

Fig. 2 The long-term effects of drought disasters on the surface circumstance

3.1 全球变化与干旱

一般认为,太阳辐射变化(如太阳黑子活动)对地球天气气候具有重大影响^[68]。但全球变化和干旱气候对地表能量交换与平衡可能产生何种程度的反馈作用,即对地表辐射和能量平衡的影响,值得深入研究与探讨。大量事实表明,地球表面已经并且正在发生巨大的变化,这种变化对整个地球能量平衡造成了不容忽视的影响。人类活动以外,气候变化本身会引起地表反照率的改变,而全球干旱加剧(特别是北半球中高纬度干湿过渡区)则通过影响

土地覆被间接改变地表反照率和比辐射率等,这些都是导致地表能量不平衡的重要原因^[69]。植被的存在对地表能量收支具有显著影响,如增加地表吸收的短波辐射和地表蒸发潜热,减少地表释放的长波辐射等。土壤湿度可以通过蒸散发作用,调节感热和潜热通量的占比,进而影响地表能量平衡及再分配。在极端干旱条件下,土壤湿度下降会大大抑制潜热通量,导致感热通量急剧增加^[70]。有研究发现,我国西北干旱气候环境的进一步发展,将对全球的能量平衡过程及其空间分布状态产生影响^[71]。过去几十年,我国黄土高原地区气候干旱化对地表能量平衡的影响比气温变暖的影响更为突出^[72]。地表土壤热通量和土壤干湿变化会对地表辐射过程和能量平衡各分量产生重要影响,土壤湿度较小时(干旱条件下),地表净辐射和潜热通量较低,而感热通量较大,土壤热通量差异明显^[73]。综合看来,干旱化加剧导致的地表能量分布改变可能会在一定程度上影响未来全球变化(天气气候、陆气相互作用、地表环境等)的进程。

3.2 水资源与水生态

气候和地表环境的长期暖干化趋势将加速全球水循环,加剧极端水文事件发生,导致全球不同尺度水资源的重新分配。大气增温必然会引起大气物理过程和大气环流的改变或调整,从而造成降水量及其时空格局的变化;气候暖干和降水变化也会引起土壤温度和湿度等土壤特性的改变^[72]。如,在全球变暖和干旱加剧的背景下,我国西北干旱地区的水资源系统将变得更加脆弱,其水文水资源可能面临的变化^[74]包括:①降水、径流“突变型”增加;②冰川积雪融水径流量增加;③径流丰、枯变化加剧。气候变化与极端干旱将增加水文波动和水资源的不确定性,降水和气温较小的变化都可能引起径流较大幅度的改变,对区域生态水文过程产生重大影响。

频繁发生的干旱和极端干旱会对水生态系统产生显著影响^[75]。作为重要驱动力,干旱造成的水分亏缺,可能从根本上改变水文循环条件和水文-生态过程,其主要表现有:水量减少、流速降低、水域面积减少、污染物迁移与转化规律改变、水体各尺度连通性降低、生物量减少和物种多样性降低等。干旱对水生态系统的影响程度取决于干旱发生时间和季节、干旱持续时间、干旱期间最枯径流量、干旱覆盖的空间范围以及区域本底或前期水文气候状况等^[76]。在极端干旱条件下,由于水生态系统中物质和能量匮乏、栖息地面积萎缩、水环境恶化、捕食竞争性加剧等原因,将导致水生生物空间分布特征改变、多样性降低、繁殖能力下降、种群规模减小等严

重后果^[77]。

3.3 碳循环与养分

陆地生态系统是全球碳循环的重要组成部分,在全球碳收支中占主导地位^[70,78]。有数据显示,过去十多年间陆地生物圈吸收了约30%的化石燃料碳排放,使其成为全球碳库的关键组成部分,一定程度上缓解了化石燃料CO₂排放及其造成的全球变暖^[79]。陆地总初级生产力(gross primary production, GPP)是全球植被生长和粮食生产的基础,影响着生态系统碳平衡,在调节大气CO₂中发挥着重要作用。尽管未来几十年大气中较高的CO₂浓度可能通过施肥效应促进GPP,但由于养分限制和干旱频率、强度增加等因素的影响,GPP的未来趋势仍然不确定^[80]。干旱可以通过直接方式(如水分限制和热胁迫)和间接方式(如造成火灾和昆虫爆发)影响GPP。一些模型研究表明,21世纪期间全球许多地区干旱发生的风险在增加,极端干旱对GPP的影响比轻度和中度干旱的影响更大。在中高排放情景下,到21世纪末极端干旱造成GPP的减少幅度预计将比2000年多3倍。随着大气变暖和干旱加剧,全球碳循环面临受极端干旱影响的高风险,具体量化未来全球范围内干旱对GPP影响的研究也存在高度不确定性^[81]。另有研究表明,干旱气候环境进一步发展的情景下,全球平均陆地植被通过生理过程产生的CO₂净通量将有所减少,而干旱气候环境改善的情景下,上述植被生理过程CO₂净通量将有所增加^[71]。同时,气温升高也会显著增加土壤的碳排放,降低土壤净CO₂吸收。因此,伴随全球长期暖干化趋势,地表储存的有机碳可能不断减少,向大气中释放出更多CO₂;但受高温干旱影响,地表总固碳能力和初级生产力可能逐渐下降^[70]。

3.4 陆地生态系统

由气候变化引起的干旱日益加剧,将深刻影响陆地生态系统的结构和功能属性,包括土壤肥力、养分循环、植物生产力、动物栖息地和微生物群落等^[12]。然而,这些影响是渐进式的还是突变性的,还有待进一步研究。同时,生态系统属性之间相互依存、高度关联,某一特定属性发生突变,将可能导致其他关联属性发生改变,进而在不同时空尺度上形成级联反应。如,干旱加剧可能导致土壤微生物组成发生迅速改变,进而引发植物-微生物相互作用的变化,最终导致养分循环和动植物群落发生结构性变化。在全球变化背景下,理解多个相互关联的生态系统属性对干旱加剧的响应是否可以相互抵消或者放大,对于描绘和预估全球陆地生态系统的干旱脆弱性和服务供给至关重要^[82]。最新研究表明,

大多数陆地生态系统功能和结构属性对干旱加剧的响应都是非线性的,一旦达到某个水平,干旱的小幅增强都会造成生态系统属性发生剧烈变化,导致其与干旱的关系发生改变^[83]。不仅如此,生态系统属性对干旱加剧的响应存在一系列连续的干旱阈值。由于干旱影响,生态系统首先进入“植被衰退”阶段,其主要特征是植被生产力急剧下降;随着干旱发展,生态系统继而进入“土壤失调”阶段,此时土壤养分迅速下降,微生物菌群功能衰退,微生物-植物之间的积极相互作用频率降低,植被和土壤退化明显,动物栖息地受限且获取食物困难;若干旱继续增强,最终可能进入“生态系统崩溃”阶段,大多数植物和微生物无法在这种极端缺水、养分匮乏的环境中生存,动植物大面积死亡、数量急剧下降,土壤中动物病原菌的增加还可能导致真菌疾病暴发^[84-85]。良好的生态环境和气候资源优势有利于增强防御极端干旱的能力,缓解干旱不利影响,提升区域生态系统的干旱韧性与恢复力^[86-87]。

3.5 社会经济系统

干旱对人类社会的影响是非结构性的和分散的,其影响的范围比洪水、风暴和地震等其他自然灾害所造成损失的范围更大。粮食安全、城乡居住、能源生产、工业发展、经济增长和人类健康等方面都对水高度依赖,很容易受到气候变化和干旱的影响。特大干旱灾害可能导致难民流离失所,引发社会动荡和不安全因素。历史上特大干旱灾害所导致的人类社会崩塌和文明衰退(甚至消亡),也警醒着未来可能引发的政治、经济和文化等方面的混乱^[88]。

随着水及其他有限自然资源供给压力的增大,特大干旱导致的工农业生产、社会经济发展和生活用水等方面的损失可能倍增。过去的干旱相关研究(农业上的、水文学上的和社会经济上的)把重点放在了干旱的社会性影响方面,并更关注干旱作为自然现象与人类活动之际的相互作用和相互关系,即降水是否能为社会和环境提供足够的水资源^[89-91]。然而,随着研究的深入,人们逐渐认识到宏观干旱事件的微观影响似乎并不直接取决于降水量,而受制于社会经济系统内部对水的多重调蓄和对干旱的抵御能力。换言之,研究中对于干旱自然属性(降水缺乏)的强调程度逐渐降低,而对于其影响复杂性和导致冲突的强调程度逐渐增加^[92-93]。尤其对于特大干旱可能导致的社会系统性灾害压力,必须从根源(资源获取、管理体制)、宏观压力(人口增长、经济发展、生态环境等)和保障(资金投入、基础设施、教育培训等)等宏观与微观层面予以全盘考虑^[94-95]。

干旱对人类健康的影响通常是间接的^[96-97]。如,粮食短缺可能导致人体能量供应不足、营养不良,如某些维生素和微量元素缺乏。干旱通过影响居民生活用水质量,间接影响腹泻发病率。呼吸道相关疾病的严重程度、发病率等也与干旱程度有关,干旱所营造的有利生存条件可能导致蚊媒传染病的爆发。干旱还会在一定程度上加剧环境、气候、经济、社会压力,影响人类心理健康。

4 研究展望

由于对特大干旱次生灾害认识的局限,特别是其对生态环境的影响存在复合、潜在、不确定性等诸多复杂特征,目前特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究尚处于起步阶段,基础非常薄弱。研究中的主要问题与可能发展方向包括:

a. 对特大干旱的界定认识不清,缺乏合理、客观的判别依据和标准。同时,现有研究对特大干旱的聚焦不够,而更多关注一般意义上的干旱现象与旱灾。

b. 灾害链研究意义重大,但目前国内外灾害链相关研究仍较为薄弱,且多集中于研究沿海地区的台风灾害链和山区的地震灾害链,而对于干旱灾害链的研究十分有限。

c. 干旱灾害链上的能量传递涉及多维、非线性系统问题,而目前的研究一般仅通过定性方法分析灾害链的链条结构及灾害传递方向。如何利用定量方法有效揭示灾害系统中干旱引发次生灾害的机理及多灾种协同演进过程,亟待进一步深入研究。

d. 多渠道检索显示,该领域内最新研究文献占比较低。大量文献仅集中于少数几个方面的研究,特别是气候变化对干旱的复杂影响、森林火灾和植被(森林、草地)退化等,而某些方面的研究(如特大干旱对养分循环、生态过程的长期影响)则相对匮乏。

e. 当前研究开展情况和已有研究成果表明,特大干旱事件灾害孕育机理及影响方面的整体研究框架尚未确立,相应研究体系和技术方法体系也远未形成。

参考文献:

- [1] 严登华,王浩,周梦,等. 全球治水模式思辨与发展展望[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 1-7. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHOU Meng, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 1-7. (in Chinese))

- [2] 金菊良,宋占智,崔毅,等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展[J]. 水利学报,2016,47(3):398-412. (JIN Juliang, SONG Zhanzhi, CUI Yi, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):398-412. (in Chinese))
- [3] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护,2017,33(5):1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):1-4. (in Chinese))
- [4] 周玉良,周平,金菊良,等. 基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J]. 水利学报,2014,45(9):1038-1047. (ZHOU Yuliang, ZHOU Ping, JIN Juliang, et al. Establishment of hydrological drought index based on sources of regional water supply and its application to drought frequency analysis for Kunming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9):1038-1047. (in Chinese))
- [5] 粟晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [6] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(1):51-56. (WU Zhiyong, LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection,2016,32(1):51-56. (in Chinese))
- [7] 任国玉,封国林,严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究,2010,15(4):337-353. (REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4):337-353. (in Chinese))
- [8] 吴玉成. 我国重特大干旱灾害频发原因探析[J]. 中国防汛抗旱,2012,22(5):10-11. (WU Yucheng. Analysis of the causes of frequent extreme drought disasters in China[J]. China Flood and Drought Management,2012,22(5):10-11. (in Chinese))
- [9] 郑建萌,张万诚,陈艳,等. 2009—2010 年云南特大干旱的气候特征及成因[J]. 气象科学,2015,35(4):488-496. (ZHENG Jianmeng, ZHANG Wancheng, CHEN Yan, et al. Analysis on climatologic characteristics and causes of the severe drought during 2009-2010 in Yunnan province [J]. Journal of the Meteorological Sciences,2015,35(4):488-496. (in Chinese))
- [10] 费玲玲,陆桂华,吴志勇,等. 西南地区特大干旱大气环流特征分析[J]. 中国农村水利水电,2014(8):26-29. (FEI Lingling, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Research on the anomalies of atmospheric circulation of the extremely severe drought in southwest China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014 (8): 26-29. (in Chinese))
- [11] 梅传贵,陆桂华,吴志勇,等. 西南地区特大干旱前期天气系统异常特征分析[J]. 水电能源科学,2013,31(10):1-5. (MEI Chuangui, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Study on abnormal characteristics of weather system during the drought in southwest [J]. Water Resources and Power,2013,31(10):1-5. (in Chinese))
- [12] 黄新会,李小英,穆兴民,等. 2010 年中国西南特大干旱灾害:从生态学视角的审视[J]. 水土保持研究,2013,20(4):282-287. (HUANG Xinhui, LI Xiaoying, MU Xingmin, et al. The severe drought occurred in southwest China in 2010; an examination from perspective of ecology [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(4):282-287. (in Chinese))
- [13] 刘建刚,谭徐明,万金红,等. 2010 年西南特大干旱及典型场次旱灾对比分析[J]. 中国水利,2011(9):17-19. (LIU Jiangang, TAN Xuming, WAN Jinhong, et al. Comparative analysis between the 2010 severe drought in southwest China and typical drought disasters [J]. China Water Resources,2011(9):17-19. (in Chinese))
- [14] 马建华. 西南地区近年特大干旱灾害的启示与对策[J]. 人民长江,2010,41(24):7-12. (MA Jianhua. Revelation and counter measures of catastrophic drought disasters in recent years in southwest China [J]. Yangtze River,2010,41(24):7-12. (in Chinese))
- [15] 黎祖贤,周盛,樊志超,等. 湖南特大干旱时空变化特征分析[J]. 干旱气象,2018,36(4):578-582. (LI Zuxian, ZHOU Sheng, FAN Zhichao, et al. Analysis of temporal and spatial variation of extreme drought in Hunan province [J]. Journal of Arid Meteorology,2018,36(4):578-582. (in Chinese))
- [16] 郭姝姝,辛景峰. 安徽省 1978 年特大干旱研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(1):8-14. (GUO Shushu, XIN Jingfeng. Study on dreadful drought in 1978 for Anhui Province [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2014,12(1):8-14. (in Chinese))
- [17] 张玉芳,邢大伟,刘明云,等. 关中地区历史特大干旱探讨[J]. 西北水资源与水工程,2002,13(3):15-18. (ZHANG Yufang, XING Dawei, LIU Mingyun, et al. Discussion on history extraordinary drought in Guanzhong region [J]. Northwest Water Resources and Water Engineering,2002,13(3):15-18. (in Chinese))
- [18] 白云岗,木沙·如孜,雷晓云,等. 新疆干旱灾害的特征及其影响因素分析[J]. 人民黄河,2012,34(7):61-63. (BAI Yungang, MUSA Ruzi, LEI Xiaoyun, et al. Analysis on characteristic and affecting factor of drought

- disaster of Xinjiang[J]. Yellow River, 2012, 34(7): 61-63. (in Chinese))
- [19] 董安祥,王劲松,李忆平. 1920 年中国北方 7 省(市)大旱的灾情及其成因[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 750-755. (DONG Anxiang, WANG Jinsong, LI Yiping. The disaster and causes of serious drought in seven provinces of northern China in 1920 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 750-755. (in Chinese))
- [20] 高辉,苏志诚,屈艳萍. 基于 AHP 的我国重特大干旱灾害综合评判指标及其应用[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(5): 12-15. (GAO Hui, SU Zhicheng, QU Yanping. AHP-based comprehensive assessment indicators of extreme drought disasters and relevant applications in China[J]. China Flood and Drought Management, 2012, 22(5): 12-15. (in Chinese))
- [21] GOSLING S N, WARREN R, ARNELL N W, et al. A review of recent developments in climate change science. Part II: the global-scale impacts of climate change[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(4): 443-464.
- [22] WILHITE D, PULWARTY R S. Drought and water crises: integrating science, management, and policy [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [23] DOBLAS-MIRANDA E, ALONSO R, ARNAN X, et al. A review of the combination among global change factors in forests, shrublands and pastures of the Mediterranean Region: beyond drought effects[J]. Global and Planetary Change, 2017, 148(1): 42-54.
- [24] FLOOD S, CRADOCK-HENRY N A, BLACKETT P, et al. Adaptive and interactive climate futures: systematic review of “serious games” for engagement and decision-making [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 63005.
- [25] PEARCE T, RODRÍGUEZ E, FAWCETT D, et al. How is Australia adapting to climate change based on a systematic review? [J]. Sustainability, 2018, 10(9): 3280.
- [26] 陶家元. 关于次生灾害特性的探讨[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 1993, 27(4): 126-128. (TAO Jiayuan. The discussion of character of the secondary catastrophe [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 1993, 27(4): 126-128. (in Chinese))
- [27] 李德威. 初论地球自然灾害系统[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 69-75. (LI Dewei. Preliminary discussion on earth's natural hazard system[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 69-75. (in Chinese))
- [28] 佚名. 干旱带来“灾害链”[J]. 大众标准化, 2002(5): 16. (Anonymous. The disaster chain induced by drought [J]. Popular Standardization, 2002(5): 16. (in Chinese))
- [29] 刘江龙, 刘会平, 王艳丽. 广东旱灾成因与灾害链研究[J]. 广东水利水电, 2005(2): 3-5. (LIU Jianglong, LIU Huiping, WANG Yanli. Study on the causes of drought disaster and disaster chain in Guangdong [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2005(2): 3-5. (in Chinese))
- [30] 王劲松, 张强, 王素萍, 等. 西南和华南干旱灾害链特征分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 187-194. (WANG Jinsong, ZHANG Qiang, WANG Suping, et al. Characteristic analysis of drought disaster chain in southwest and south China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 187-194. (in Chinese))
- [31] 贾慧聪, 王静爱, 杨洋, 等. 关于西北地区的自然灾害链[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 72-77. (JIA Huicong, WANG Jingai, YANG Yang, et al. Analysis of natural disaster chain in northwest China [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 72-77. (in Chinese))
- [32] 哈斯, 张继权, 郭恩亮, 等. 基于贝叶斯网络的草原干旱雪灾灾害链推理模型研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 20-29. (HA Si, ZHANG Jiquan, GUO Enliang, et al. Study on inference model of the grassland drought and snow disaster chain based on Bayesian networks [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4): 20-29. (in Chinese))
- [33] 瑞士再保险研究院. 次生灾害将在全球范围引发更多自然灾害损失[J]. 中国保险, 2019(5): 62-64. (Swiss Re Institute. Secondary disasters will cause more natural disaster losses worldwide [J]. China Insurance, 2019(5): 62-64. (in Chinese))
- [34] 邓振镭, 文小航, 黄涛, 等. 干旱与高温热浪的区别与联系[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 702-709. (DENG Zhenyong, WEN Xiaohang, HUANG Tao, et al. Relationship and difference between drought and high temperature heat waves [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(3): 702-709. (in Chinese))
- [35] 徐金芳, 邓振镭, 陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 163-167. (XU Jinfang, DENG Zhenyong, CHEN Min. A summary of studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(2): 163-167. (in Chinese))
- [36] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001(6): 737-746. (MA Zhuguo, FU Congbin. Study on surface humid index in the arid area of northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001(6): 737-746. (in Chinese))
- [37] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊 1): 75-82. (XIE An, SUN Yonggang, BAI Renhai. Arid climate trend over northeastern China and its response to global warming [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58

- (Sup1):75-82. (in Chinese))
- [38] 蒲金涌,姚小英,邓振镛,等. 气候变化对甘肃黄土高原土壤贮水量的影响[J]. 土壤通报,2006,37(6):1086-1090. (PU Jinyong, YAO Xiaoying, DEN Zhenyong, et al. Impact of climatic change on soil water content in Loess Plateau, Gansu[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6):1086-1090. (in Chinese))
- [39] 卫捷,马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报,2003,58(增刊1):117-124. (WEI Jie, MA Zhuguo. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(Sup1):117-124. (in Chinese)).
- [40] 王志伟,翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征[J]. 地理学报,2003,58(增刊1):61-68. (WANG Zhiwei, ZHAI Panmao. Climate change in drought over northern China during 1950-2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(Sup1):61-68. (in Chinese))
- [41] 张余庆. 气候变化背景下赣江流域骤发干旱研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.
- [42] 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(5):911-919.
- [43] 任金鑫,肖慧娟,张超,等. 持续干旱对森林火灾的影响研究综述[J]. 内蒙古林业调查设计,2013,36(5):135-138. (REN Jinxin, XIAO Huijuan, ZHANG Chao, et al. Reviewing on effects of continuous drought on forest fire[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2013, 36(5):135-138. (in Chinese))
- [44] 徐明超,马文婷. 干旱气候因子与森林火灾[J]. 冰川冻土,2012,34(3):603-608. (XU Mingchao, MA Wenting. Relationship between arid climatic factors and forest fires[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3):603-608. (in Chinese))
- [45] 张磊,王晓春. 满归地区兴安落叶松林火灾历史及其与干旱的关系[J]. 东北林业大学学报,2012,40(12):81-86. (ZHANG Lei, WANG Xiaochun. Fire history of a larch forest and its relationship with drought in Mangui of Daxing'an Mountains, China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(12):81-86. (in Chinese))
- [46] 兰明才,周莉,刘红武,等. 长沙地区干旱时空分布特征及其对森林火灾的影响[J]. 安徽农业科学,2017,45(29):174-179. (LAN Mingcai, ZHOU Li, LIU Hongwu, et al. Spatial and temporal distribution of drought and its impact on forest fire in Changsha area[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2017, 45(29):174-179. (in Chinese))
- [47] SIEGERT F, RUECKER G, HINRICHS A, et al. Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Niño[J]. Nature, 2001, 414(6862):437-440.
- [48] BROWN K J, CLARK J S, GRIMM E C, et al. Fire cycles in North American interior grasslands and their relation to prairie drought[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(25):8865-8870.
- [49] REINHARD M, REBETEZ M, SCHLAEPFER R. Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 82(1-2):17-25.
- [50] DIMITRAKOPOULOS A P, VLAHOU M, ANAGNOSTOPOULOU C G, et al. Impact of drought on wildland fires in Greece: implications of climatic change?[J]. Climatic Change, 2011, 109(3/4):331-347.
- [51] LITTELL J S, PETERSON D L, RILEY K L, et al. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States[J]. Global Change Biology, 2016, 22(7):2353-2369.
- [52] SUTANTO S J, VITOLO C, DI NAPOLI C, et al. Heatwaves, droughts, and fires: exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale[J]. Environment International, 2020, 134(1):105276.
- [53] 陆均天. 东北华北旱象发展 四川风雹灾害严重[J]. 气象, 1989, 15(7):62-63. (LU Juntian. Development of drought in northern and northeastern China, and severe wind-hail disaster in Sichuan[J]. Meteorological Monthly, 1989, 15(7):62-63.
- [54] 邓振镛,张强,倾继祖,等. 气候暖干化对中国北方干热风的影响[J]. 冰川冻土,2009,31(4):664-671. (DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, QING Jizu, et al. Impact of climate warming and drying on dry-hot wind in the North of China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4):664-671. (in Chinese))
- [55] 姜逢清,李珍,胡汝骥. 20 世纪下半叶干旱对新疆农业的影响及灾害链效应[J]. 干旱区地理,2005,28(4):49-57. (JIANG Fengqing, LI Zhen, HU Ruji. Influences of drought on agriculture and disaster-chain effect during the second half of the 20th century in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(4):49-57.
- [56] DUNIWAY M C, PFENNIGWERTH A A, FICK S E, et al. Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world[J]. Ecosphere, 2019, 10(3):e2650.
- [57] 崔铭. 河南省 1942—1943 年旱、风、蝗灾害略考[J]. 灾害学, 1994, 9(1):74-77. (CUI Ming. A brief study on drought, wind and locust disasters in Henan province from 1942 to 1943[J]. Journal of Catastrophology, 1994, 9(1):74-77. (in Chinese))
- [58] 董安祥,李耀辉,张宇. 1942 年中国北方八省市大旱的成因[J]. 地理科学, 2014, 34(2):205-210. (DONG

- Anxiang, LI Yaohui, ZHANG Yu. Reasons of serious drought in eight cities or provinces of northern China in 1942[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 205-210. (in Chinese))
- [59] FAO. Horn of Africa: locust infestation-Oct. 2019 [EB/OL]. (2019-10-16) [2020-03-21]. <https://reliefweb.int/disaster/2019-000149-eth>.
- [60] 李祎君,王春乙,赵蓓,等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 263-271. (LI Yijun, WANG Chunyi, ZHAO Bei, et al. Effects of climate change on agricultural meteorological disaster and crop insects diseases[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Sup1): 263-271. (in Chinese))
- [61] 霍治国,李茂松,王丽,等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1926-1934. (HUO Zhiguo, LI Maosong, WANG Li, et al. Impacts of climate warming on crop diseases and pests in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10): 1926-1934. (in Chinese))
- [62] 叶彩玲,霍治国,丁胜利,等. 农作物病虫害气象环境成因研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(1): 90-97. (YE Cailing, HUO Zhiguo, DING Shengli, et al. Advance in study on formation of meteorological environment causing crop's diseases and insect pests[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(1): 90-97. (in Chinese))
- [63] 叶建仁. 中国森林病虫害防治现状与展望[J]. *南京林业大学学报*, 2000, 24(6): 1-5. (YE Jianren. Current status and perspective on forest pests control in China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(6): 1-5. (in Chinese))
- [64] ALPINO T A, MARTINS DE SENA A R, DE FREITAS C M. Disasters related to droughts and public health: a review of the scientific literature [J]. *Ciencia & Saude Coletiva*, 2016, 21(3): 809-820.
- [65] DAVIES G, MCIVER L, KIM Y, et al. Water-borne diseases and extreme weather events in Cambodia; review of impacts and implications of climate change [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(1): 191-213.
- [66] EVANS G W. Projected behavioral impacts of global climate change [J]. *Annual Review of Psychology*, 2019, 70(1): 449-474.
- [67] ZHANG C, LI S, LUO F, et al. The global warming hiatus has faded away; an analysis of 2014-2016 global surface air temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(12): 4853-4868.
- [68] 黄寅亮. 太阳辐射变化与地球天气气候的关系 [J]. *云南天文台台刊*, 1985(2): 73-100. (HUANG Yinliang. The relationships linking solar activity to weather and climate [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 1985(2): 73-100. (in Chinese))
- [69] 翟俊. 中国近 30 年土地覆被变化对地表辐射平衡的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [70] 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁, 等. 全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 995-1004. (GUAN Xiaodan, SHI Rui, KONG Xiangning, et al. An overview of researches on land-atmosphere interaction over semi-arid region under global changes [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 995-1004. (in Chinese))
- [71] 范广洲, 李洪权, 陈芳丽. 西北干旱环境对全球气候变化可能影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 2004(增刊1): 89-96. (FAN Guangzhou, LI Hongquan, CHEN Fangli. Preliminary numerical simulation of influence of drought environment over northwest China on global climate change [J]. *Plateau Meteorology*, 2004(Sup1): 89-96. (in Chinese))
- [72] 张强, 黄菁, 张良, 等. 黄土高原区域气候暖干化对地表能量交换特征的影响 [J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 561-572. (ZHANG Qiang, HUANG Jing, ZHANG Liang, et al. Warming and drying climate over Loess Plateau area in China and its effect on land surface energy exchange [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 561-572. (in Chinese))
- [73] 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响 [J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 840-848. (ZUO Jinqing, WANG Jiemin, HUANG Jianping, et al. Estimation of ground heat flux for a semi-arid grassland and its impact on the surface energy budget [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(4): 840-848. (in Chinese))
- [74] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展 [J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304. (CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese))
- [75] 程兵芬. 干旱对马颊河流域水环境的影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [76] MOSLEY L M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems: review and integration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 140(1): 203-214.
- [77] 黄彬彬, 严登华, 王浩. 干旱对河流水生态系统影响研究与展望 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 12-18. (HUANG Binbin, YAN Denghua, WANG Hao. Research and prospect on effects of drought on river water ecosystem [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 12-18. (in Chinese))
- [78] PIAO S, ZHANG X, CHEN A, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: a review [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1551-

- 1563.
- [79] LEI T, PANG Z, WANG X, et al. Drought and carbon cycling of grassland ecosystems under global change: a review[J]. *Water*, 2016, 8(10): 460.
- [80] DARYANTO S, WANG L, JACINTHE P. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: a review[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179(1): 18-33.
- [81] XU C, MCDOWELL N G, FISHER R A, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 948-953.
- [82] VITTOZ P, CHERIX D, GONSETH Y, et al. Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: a review[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2013, 21(3): 154-162.
- [83] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 38-46. (BAO Chao, FANG Chuanglin. Impact of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area: progress and prospect[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(3): 38-46. (in Chinese))
- [84] BERDUGO M, DELGADO-BAQUERIZO M, SOLIVERES S, et al. Global ecosystem thresholds driven by aridity[J]. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [85] 李立新. 干旱对海河流域典型森林土壤生态系统演变的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [86] 刘孝富, 蒋卫国, 李京, 等. 生态系统恢复力研究进展及其在防灾减灾中的应用前景[J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 154-159. (LIU Xiaofu, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Research advances in ecosystem resilience and its application prospect in disaster prevention and reduction[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(2): 154-159. (in Chinese))
- [87] UMMENHOFER C C, MEEHL G A. Extreme weather and climate events with ecological relevance: a review[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2017, 372: 135.
- [88] KANIEWSKI D, GUIOT J, VAN CAMPO E. Drought and societal collapse 3200 years ago in the Eastern Mediterranean: a review[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2015, 6(4): 369-382.
- [89] 荣艳淑, 石丹丹, 吕星玥, 等. 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(3): 14-24. (RONG Yanshu, SHI Dandan, LYU Xingyue, et al. Influence of La Nina events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 14-24. (in Chinese))
- [90] 尚松浩. 基于水旱灾害的中国农业水安全情势评价[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1): 10-14. (SHANG Songhao. Assessment on agricultural water security regime in China based on flood and drought disasters[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2018, 39(1): 10-14. (in Chinese))
- [91] 张强, 孙鹏, 程辰, 等. ENSO 影响下安徽省旱涝灾害及农业生产损失时空变化特征[J]. *水资源保护*, 2016, 32(6): 6-18. (ZHANG Qiang, SUN Peng, CHENG Chen, et al. Temporal and spatial variations of ENSO-induced flood and drought disasters and loss in agricultural production in Anhui Province[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 6-18. (in Chinese))
- [92] 许朗, 张维诚. 区域农业旱灾脆弱性评价及其影响因素[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(2): 14-19. (XU Lang, ZHANG Weicheng. Assessment of regional agricultural drought vulnerability and main influencing factors[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(2): 14-19. (in Chinese))
- [93] 彭顺风, 孙勇, 王式成, 等. 干旱与水危机: 技术和管理[J]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [94] 金菊良, 邴建强, 周玉良, 等. 旱灾风险评估的初步理论框架[J]. *灾害学*, 2014, 29(3): 1-10. (JIN Juliang, LI Jianqiang, ZHOU Yuliang, et al. Research on the theoretical framework of drought risk assessment[J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 1-10. (in Chinese))
- [95] 李俊. 基于系统论的水旱风灾害防御机制研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(3): 35-41. (LI Jun. Analysis of flood, drought and typhoon defense mechanism based on system theory[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2017, 38(3): 35-41. (in Chinese))
- [96] 余兰英, 刘达伟. 高温干旱对人群健康影响的研究进展[J]. *现代预防医学*, 2008, 35(4): 756-757. (YU Lanying, LIU Dawei. Research progress on the impact of high temperature and drought on human health[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2008, 35(4): 756-757. (in Chinese))
- [97] 王宁, 李杰, 李学文, 等. 极端天气事件干旱对人类健康影响研究进展[J]. *中国公共卫生*, 2015, 31(3): 379-382. (WANG Ning, LI Jie, LI Xuewen, et al. Health effects of drought: a review of recent studies[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2015, 31(3): 379-382. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-03 编辑: 王 芳)

