

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.003

生态干旱的概念及研究进展

粟晓玲^{1,2}, 姜田亮^{1,2}, 牛纪苹^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:分析了生态干旱的研究背景及概念框架,系统阐述了生态干旱监测指标、气象要素和地下水对生态干旱的驱动机制以及生态干旱的脆弱性评估方法等研究进展,指出生态干旱研究还处于起步阶段,应进一步开展生态干旱指数构建与评估方法、气象干旱和地下水干旱对生态干旱的联合驱动机制以及生态干旱的脆弱性评估与预测方法等方面的研究,以期推动生态干旱研究的发展,拓展干旱分类和干旱指标研究的理论体系。

关键词:生态干旱;气象干旱;地下水干旱;脆弱性评估

中图分类号:TV213.4;P33 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0015-07

Concept and research progress of ecological drought//SU Xiaoling^{1,2}, JIANG Tianliang^{1,2}, NIU Jiping^{1,2} (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The research background and conceptual framework of ecological drought were analyzed, and the research progress including ecological drought monitoring index, driving mechanisms of meteorological elements and groundwater to ecological drought, and vulnerability assessment method of ecological drought were systematically reviewed. It is pointed out that the research of ecological drought is still in its infancy. Further research should be carried out on the construction and assessment methods of ecological drought index, the joint driving mechanism of meteorological drought and groundwater drought on ecological drought, and the vulnerability assessment and prediction methods of ecological drought, so as to promote the development of ecological drought research and expand the theoretical system of drought classification and drought index research

Key words: ecological drought; meteorological drought; groundwater drought; vulnerability assessment

全球变暖加剧了水循环过程,导致极端气候事件频发。干旱是一种极端气候现象,由降水不足引起的气象干旱随着时间的推移演变为农业干旱和人文干旱,导致流入湿地和地下含水层的水量减少,加上干旱早期人类需水的增加,进一步加剧了干旱程度,使得生态系统可获得的水量进一步减少,进而改变水文生态过程,并以各种形式影响水域和陆地生态系统,发生生态干旱,出现水量减少、流速降低、水域面积缩减、污染物形成迁移规律改变、水体连通性降低、生物量减少和物种多样性降低等水域生态恶化现象^[1]。在极端干旱条件下,甚至出现水生生物空间分布特征改变、繁殖能力下降、种群规模减小等生

态后果^[2]。干旱对陆地生态系统的植物生理生态过程、生物地球化学循环、结构和功能、生物多样性等产生显著的影响^[3],引起野生动物生境破坏、森林火灾、土壤侵蚀、植被胁迫,导致依赖生态系统提供资源和服务的人类社会发生连锁反应。

21 世纪的干旱具有温度高、时间长、范围广等特点,增加了生态系统的脆弱性和生态损失。如,澳大利亚 2002—2010 年的 1 000 年一遇干旱对 Murray-Darling 地区水文生态系统提供的关键服务造成了超过 8 亿澳元的生态损失^[4];亚马逊地区 2010 年发生的极端干旱事件,导致该区热带雨林生态系统碳净损失约 2.2 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g),几乎占全

基金项目:国家自然科学基金(52079111,51879222)

作者简介:粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟研究。E-mail: xiaolingsu@nwfufu.edu.cn

球森林生态系统 1 a 的净碳吸收量^[3];美国加州 2012—2015 年的 1 000 年一遇干旱导致大面积针叶林死亡^[5]。我国西北地区气候总体呈现暖湿化趋势,但空间差异较大,西部降水增多,东部降水相对减少,干旱缺水导致植被退化、土地荒漠化,生态环境不断恶化,如,祁连山 21 世纪以来林地面积相比 20 世纪 50 年代减少近 50%^[6],新疆荒漠植被退化严重,塔里木河两岸原有的 53 万 hm^2 胡杨林只剩不到 8.48 万 hm^2 ^[7]。Yao 等^[8] 基于标准化降水蒸散发指数 (SPEI) 评估预测 2011—2100 年在 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下西北地区将发生更加严重和频繁的干旱。

人类难以影响降雨模式,但通过监测生态干旱时空演变过程,可以调整水土资源管理策略,从而缓解或减轻干旱损失^[9]。因此,开展生态干旱的监测方法及其驱动机制和脆弱性评估方法的研究,有助于更好地认识和预测生态干旱,并采取适当的政策措施应对干旱,为降低日益增加的生态干旱风险、实施生态保护提供技术支撑。本文分析生态干旱的研究背景及概念框架,重点阐述生态干旱监测指标及其驱动机制以及生态干旱的脆弱性评估方法等的研究进展和发展趋势,旨在促进生态干旱研究。

1 生态干旱的定义及概念框架

以往的干旱管理多以人类为中心,围绕干旱的水文影响、农业影响及社会经济影响展开,但对干旱的生态影响关注较少。随着干旱频率的增加和干旱程度的加剧,干旱对人类社会和生态系统不利影响的增加,越来越多的生态学家开始关注干旱的生态效应,如树木死亡、养分物质循环等^[4]。

在国内,生态干旱研究主要以湿地为研究对象^[10-12]。牛文娟等^[13] 最早引入生态干旱概念,初步探讨了干旱对生态系统的影响。国际上,关于干旱的生态影响研究较多^[14],但对生态干旱明确定义的文献很少。2016 年美国人与自然合作组织 (SNAPP) 成立的生态干旱工作组 (Ecological Drought Working Group) 定义生态干旱是“由自然或人类管理引发的周期性供水不足导致植被正常生长发育的水文气象条件发生变化,使受水分胁迫的植被与其生存的土壤环境构成旱生环境,进而反馈至其他系统的综合复杂过程”^[15]。该定义强调了干旱对陆地生态系统的影响。Crausbay 等^[16] 认为,为了应对 21 世纪的干旱风险,需要定义新的干旱类型,当可获得的水低于关键阈值时,强调持续的生态系统及其提供的关键服务对人类社会的重要价值,集

成生态、气候、水文等多维干旱,定义生态干旱为“一种间歇性的供水不足,并导致生态系统超过其脆弱性阈值,影响生态系统服务,并在自然和/或人类系统中触发反馈”。该定义不仅适用于陆地生态系统,也适用于淡水生态系统,但没有考虑在缺水加剧期间生态系统可能产生的全部响应。这种仅根据生态系统的反馈定义生态干旱,会导致某些干旱信息丢失,如高度耐旱或抗旱的生态系统可能对干旱反映并不敏感。Munson 等^[17] 认为,理想的生态干旱定义应考虑生态系统对于干旱强度变化的敏感性,以及不同层次生物的响应,且能够在多时空尺度上进行生态推断,因此定义为“一种可获得的水量短缺,并导致生物或生态系统的性能偏离其上限”。该定义的核心是可获得的水量指标与生物或生态系统性能指标之间的关系。生物的性能包括生长、生存和繁殖力,它会影响生态系统的性能,如生产力、能量和物质的循环。

笔者认为,生态干旱的定义应能识别生态学意义上的缺水条件以及缺水导致的生态系统反馈两个方面,因此定义生态干旱是“由自然与人类活动引发的生态系统可获得的水量低于其需水阈值,导致生态系统超过脆弱性阈值,影响生态系统服务,并在自然和/或人类系统中触发反馈”。生态系统服务是人类通过生态系统的各种服务功能直接或间接得到的产品和服务^[18]。生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的环境条件与效用^[19]。

Crausbay 等^[16] 进一步提出了生态干旱的概念框架 (图 1) 是由脆弱性组分 (暴露性 + 敏感性 + 影响性) 和人类与自然因素的连续统一体 2 个维度构成。这个框架有助于生态干旱研究者和决策者理

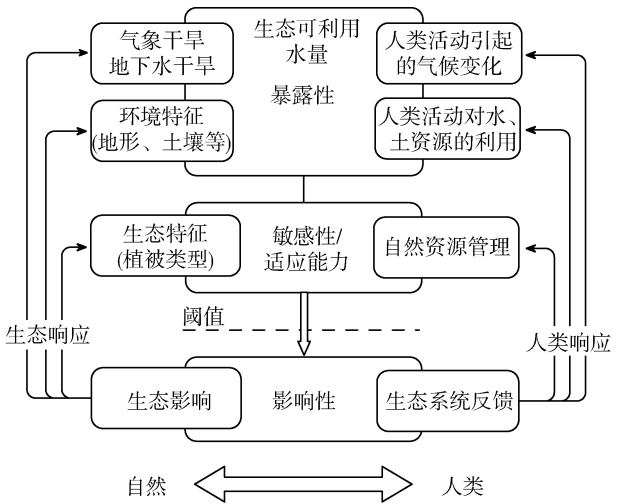


图 1 生态干旱概念框架

Fig. 1 Conceptual diagram of ecological drought

解:人类和自然作为生态系统脆弱性驱动因素产生作用;生态干旱的影响通过生态系统服务转移到人类社会;这些生态及其服务的影响又将反馈给自然和人类系统。

生态干旱的研究,主要围绕生态干旱监测指标、生态干旱的驱动机制以及生态系统对干旱的脆弱性评估来开展。

2 研究进展

2.1 生态干旱监测指标研究

建立干旱监测指标是量化干旱及其影响程度的重要手段^[20],合理构建干旱监测指标是及时准确监测生态干旱的前提。Park 等^[21]提出了“在哪监测(where)、监测什么(what)、如何监测(how)”的生态干旱监测框架。Where 指在陆地(森林、土壤、植被)与水域(河流、湿地、湖泊、河口)进行监测;What 明确了检测对象,包括陆地生态系统的植被状况、土壤污染和野火,水域生态系统中的鱼类栖息地和水质;How 强调生态干旱的阈值,包括严重程度监测、脆弱性评价及影响评价三方面。

关于水域生态系统的干旱监测评估研究不多,国内主要围绕湿地依据水位构建生态干旱指标,如马寨璞等^[10]依据水位确定生态干旱临界点,监测白洋淀的生态干旱;张丽丽等^[11]通过构建生态水位隶属函数来描述白洋淀生态干旱;侯军等^[12]利用湿地水量平衡关系,选取湿地最小生态水位作为呼伦湖湿地生态干旱指示指标。近年来国际上开始重视河流域生态干旱研究,围绕生态干旱的影响、水质风险等开展研究,如 Mcevoy 等^[22]利用生态干旱概念框架分析了美国蒙大拿州西南部的 5 个流域尺度干旱规划,评价干旱的生态影响;Kim 等^[23]通过应用非参数核密度估计和假设极端干旱后河流水质超过水质目标的概率,对生态干旱引起的水质风险进行了定量评估。也有研究依据生态流量建立生态干旱指标,如 Park 等^[21]建立了以河流生态流量和最小流量为双阈值的生态干旱指标,评估加姆河生态系统可能发生的生态干旱程度,并提出了监测和预警生态干旱的方法。

对于陆地生态系统,通常采用基于遥感的植被指数表征植被受旱状况,如温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)^[24]、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[25]、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)^[26]、植被条件指数(vegetation condition index, VCI)^[27]、植被供水指数(vegetation supply water index, VSWI)^[28]等。这些植被指数能

间接反映干旱对植被的影响和植被耗水情况,但不能直接反映生态干旱过程中可获得的水与需水之间平衡关系的动态变化,在人类对水资源系统具有很强调节能力的背景下,难以结合实际缺水状况开展有效的干旱管理,如开展干旱预警和抗旱减灾工作。

2.2 气象要素对生态干旱的驱动机制研究

气象要素的变化对植被的分布和生长有重要的影响,因此,理解植被对气象要素的响应至关重要,是明晰气象要素与生态干旱之间联系的基础。温度和降水是影响植被生长最重要的气象因素。Xu 等^[29]发现亚欧大陆中部植被生长取决于春季温度的快速升高,生长季和夏季植被的生长主要由降水驱动;在温带干旱地区,尽管降水增加,但一些地区响应气候变化的植被变化可能会减弱降水增加的影响,导致更多的生态干旱风险^[30]。随着遥感技术的发展,一些学者利用 NDVI、净初级生产力(net primary production, NPP)和作物水分利用效率(water use efficiency, WUE)等表征植被生长状态和活力指标,分析生态植被对气候变化的响应。如 Chu 等^[31]研究表明,黑龙江东北部生长季 NDVI 主要受降水的调节,气温是影响春季植被生长的主导因子,而秋季 NDVI 与降水量呈负相关关系;Jhaa 等^[32]以 NDVI 表征植被干旱指数,采用基于 Copula 的多变量概率模型描述印度各地在温度、降水和土壤含水量变化下发生植被干旱的可能性;相较于 NDVI, NPP 对气候变化的响应更为敏感,如我国华北地区农牧交错带影响 NPP 的主要因子是年降水量^[33];Lu 等^[34]利用 MODIS GPP 产品和估算的 ET 对美国 2004—2005 年的生态系统 WUE 进行了计算,发现 WUE 在干旱强度中等时增加,在严重干旱条件下则呈下降趋势。

近年来,一些学者结合植被指数探讨气象干旱对植被的影响,如 Vicente-Serrano 等^[35]通过分析世界范围内标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)和植被指数、年轮数据及 NPP 的关系后发现,持续的水分亏缺决定了陆地植被群落对干旱响应的敏感性,气象干旱对旱区植被的影响更加显著;Zhang 等^[36]研究表明中国大部分地区 NDVI 与 SPEI 呈显著正相关关系,即植被的分布与水资源可利用量的时空特点密切相关;张更喜等^[37]基于中国的改进帕尔默干旱指数(scPDSI)与 NDVI 数据的相关性分析,发现草地对干旱的响应最敏感,其次是林地和耕地。

上述研究主要以 NDVI 中气象要素或气象干旱指数的相关关系为研究内容,研究方法常用线性相关或多元回归建立生态植被与气象要素或气象干旱

之间的关系。对时空尺度上气象干旱驱动生态干旱的机制研究较少,难以揭示生态干旱与气象干旱之间的响应关系。植被干旱是一种比气象干旱更为复杂的现象,从联合似然的角度建立生态干旱-气候要素或气象干旱之间的相互作用模型更为合适^[32]。

2.3 地下水对生态干旱的驱动机制研究

干旱地区降雨稀少,地下水是植被生长的主要水源。在干早期,降水减少、蒸发潜力增加、缺水导致地下水的开采增加,使得地下水采补失衡,地下水位下降,依赖地下水生长的植被缺水,发生生态干旱。在生态植被对地下水的响应关系研究方面,主要集中于植被生长与地下水埋深之间的关系研究。如 Hao 等^[38]发现地下水埋深过浅或过深都会对塔里木河中下游地区植被生长及植被分布产生影响,在地下水埋深为 2~4 m 时植被种类丰富度达到最大;Chen 等^[39]认为在塔里木河下游地区,地下水埋深大于 6 m 对植被生长便不再产生影响。近年来,一些学者探讨了植被指数与地下水埋深的关系,如 Lyu 等^[40]研究发现沙地植被指数总体上随地下水埋深的增加而减小;王旭升等^[41]研究发现,银川平原和内蒙古额济纳旗盆地的 NDVI 随地下水埋深的增加而减小,地下水埋深主要影响 NDVI 的均值和峰值;齐蕊等^[42]建立了鄂尔多斯高原增强型植被指数(EVI)对地下水埋深与干旱指数双因素的联合响应关系,结果表明干旱指数和地下水埋深的增大都会导致植被指数的概率统计值减小,干旱指数介于 3~5 时,地下水埋深对植被指数的影响比较显著,且地下水埋深介于 1~3 m 最利于高盖度植被的出现,地下水显著影响植被分布的临界埋深约 7 m。Phiri 等^[43]分析了 NDVI 和地下水数据的时间序列,得出南非 Gauteng 省草地的 NDVI 对地下水埋深变化的响应存在 1 个月的时滞,灌木时滞为 2 个月。Zhang 等^[44]基于信息熵建立了 NDVI 与地下水埋深之间的非线性关系。

由于地下水干旱是近几年提出的新的干旱类型,关于地下水干旱与生态干旱之间的关系尚未见报道,相关研究还处于探索阶段。随着地下水干旱研究的发展,在干旱区探讨生态干旱对气象干旱和地下水干旱的响应关系,可以更好地理解生态干旱的驱动机制,为生态干旱的预警提供依据。

2.4 生态干旱脆弱性评估研究

Turner 等^[45]认为脆弱性是系统暴露于灾害并受到受影响的可能性,包括暴露性、敏感性及恢复能力。政府间气候变化专门委员会将脆弱性定义为“系统受到不良影响的倾向,是不同历史、社会、经济、政治、文化、组织、自然资源和环境条件共同作用

的结果”^[46]。干旱是一种复杂的自然现象,不同地区不同部门对于干旱脆弱性程度的定义主要取决于其缺水情况、现有的水资源管理政策框架及其执行情况。Oikonomou 等^[47]将降水模式、供需趋势和社会经济背景作为干旱脆弱性的关键因素,提出了标准化干旱脆弱性指数(standardized drought vulnerability index, SDVI),并结合地面观测数据和卫星监测遥感反演的数据来改进研究结果,以弥补干旱相关信息的匮乏,同时有助于突破以往脆弱性概念在时间和空间传播上的局限。

生态干旱脆弱性由生态系统的暴露性、敏感性以及对水量减少的适应性所确定。生态干旱脆弱性评估是控制和缓解干旱的重要环节。Crausbay 等^[16]建立了生态干旱脆弱性研究框架,以突出人类和自然系统缓解或适应干旱的能力,以及干旱对生态系统的潜在影响。生态干旱脆弱性评估有分为半结构化访谈和脆弱性指数两种途径。如 Raheem 等^[48]使用生态系统服务的通用国际分类和半结构化访谈相结合的方法评估生态干旱脆弱性;Jordaan 等^[49]在对南非东开普省农户调查的基础上,利用生态脆弱性指数评估了该地区生态干旱脆弱性,结果表明,气候与生态脆弱性之间并没有必然的联系,高降水量地区干旱的生态脆弱性较高,这是由于供水规划和管理、放牧方式和土地管理不善导致了严重的土地退化。

在生态干旱脆弱性指数构建方面,主要通过标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)分析暴露性^[47],基于加权的气象、生态、高程等指标分析敏感性,较少反应不同类别植被的暴露性特点,以及不同植被对于干旱适应能力的临界点,另外脆弱性指数很少考虑生态干旱的影响性,因此,本文参考区域灾害系统论的评判方法,用植被在干旱状态下的暴露性、敏感性及影响性来描述生态干旱脆弱性(图 2)。其中,暴露性是指一定气候条件下干旱可能发生地区群落的自然特征,如植被种类、盖度;敏感性指在一定气象水文条件影响下,特定区域自然植被对于干旱响应的强烈程度,表现为不同植被抵御和适应干旱影响的能力;影响性是指一定气候特征下,生态干旱对自然环境和经济社会造成的损失大小。根据不同的生态系统分类,可进一步探讨暴露性、敏感性及影响性等脆弱性指数的定量描述方法,以及生态干旱脆弱性的综合评价方法。

总之,与气象干旱、水文干旱、农业干旱相比,表征生态干旱的指标更多,不仅包括卫星遥感资料反演的植被指数、植被覆盖度、植被 NPP、积雪面积、水

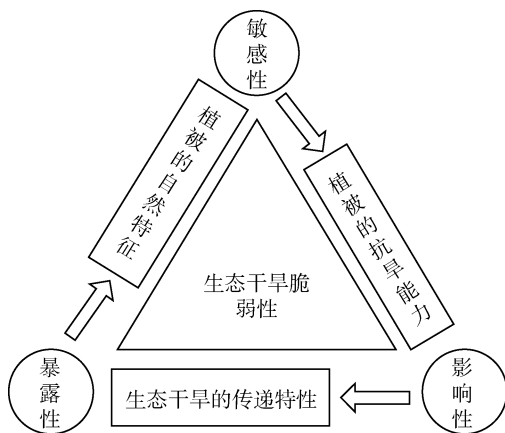


图2 生态干旱脆弱性组成

Fig.2 Vulnerability component of ecological drought

库水面面积等,还包括地面观测的河川径流、地下水位、沙丘移动速度等指标。在干旱地区,地下水是生态植被的主要水源,气象干旱和地下水干旱是生态干旱形成和演变的驱动因素,它们之间的关系更加复杂。然而有关生态干旱的监测评估方法以及生态干旱对其他干旱的反馈机理尚不明确^[13],生态干旱脆弱性的评估方法也有待深入研究。

3 研究展望

关于生态干旱指数的构建、气象干旱和地下水干旱对生态干旱的驱动机制以及生态干旱的脆弱性评估、预测方法等将是未来生态干旱研究的主要内容。

3.1 生态干旱指数的构建与评估方法研究

构建合适的干旱指数,是准确监测、评估以及研究干旱的基础^[50]。基于遥感数据反演的植被指数监测评估生态干旱,反映了植被对干旱的响应,不能直接描述不同植被水分亏缺的实际动态。对于陆地生态系统,与农业干旱指数的构建方法类似,构建既能反映气象水文条件,也能反映植被生长状态的基于植被缺水动态的干旱指数,可以监测生态干旱的形成演变过程。同时受限于生态植被生长、耗水等观测数据的匮乏,基于多源遥感反演数据,构建反应气象、水文、生态植被等多变量的综合生态干旱指数也是发展趋势。对于水域生态系统,可结合已有的生态需水研究成果,以及标准化干旱指数(如SPI、SPEI^[51])的构建方法,探索水域系统生态干旱指数的构建方法,并探讨生态干旱指数适用性的评估方法。

3.2 气象干旱和地下水干旱对生态干旱的驱动机制研究

水文循环过程的不同环节失衡,会导致不同类型的干旱,因此需要从流域或区域水文过程系统认

识生态干旱的形成和驱动机制。现有的生态干旱评估方法多是依据干旱形成的某一因素(如气象因素)或生态响应状态(如植被指数)来判断干旱的严重程度,缺乏物理机制研究,难以客观描述干旱形成的过程,同时也难以预报未来的干旱程度。因此,基于生态水文过程模拟地下水和植被耗水的演变过程,识别气象干旱、地下水干旱和生态干旱,探讨气象干旱和地下水干旱对生态干旱的联合驱动机制,定量分析气象干旱或地下水干旱单独或联合触发生态干旱的阈值,以及不同程度的气象干旱和地下水干旱发生生态干旱的概率,揭示生态干旱对气象干旱和地下水干旱的时空响应机制。

3.3 生态干旱的脆弱性评估方法及未来生态脆弱性预测研究

生态干旱影响生态系统服务,因此将生态系统服务与生态干旱的影响相结合,探讨生态干旱脆弱性指数(暴露性、敏感性及影响性)的定量描述方法,以及生态干旱脆弱性的综合评价和分区方法,通过评估典型人类活动(如植树造林、灌溉)对生态干旱脆弱性的影响,识别干旱胁迫下的生态脆弱区,分析生态干旱脆弱性的空间变化特征,并预测未来不同气候模式下的生态干旱脆弱性时空演变趋势,为应对气候变化、生态环境保护及降低生态干旱风险提供依据。

参考文献:

- [1] 马明卫,韩宇平,严登华,等.特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J].水资源保护,2020,36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 11-21. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 周贵尧,周灵燕,邵钧炯,等.极端干旱对陆地生态系统的影响:进展与展望[J].植物生态学报,2020,44(5):515-525. (ZHOU Guiyao, ZHOU Lingyan, SHAO Junjong. Effects of extreme drought on terrestrial ecosystems: review and prospects [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(5): 515-525. (in Chinese))
- [4] MILLAR C I, STEPHENSON N L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance [J]. Science, 2015, 349(6250): 823-826.
- [5] GOULDEN M L, BALES R C. California forest die-off

- linked to multi-year deep soil drying in 2012-2015 drought [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 632-637.
- [6] DENG S, YANG T, ZENG B, et al. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000-2011 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1050-1062.
- [7] LIANG S, YI Q, LIU J. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 64-76.
- [8] YAO N, LI L, FENG P, et al. Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135245.
- [9] JORDAAN A, BAHTA Y T, PHATUDI-MPHAHLELE B. Ecological vulnerability indicators to drought: Case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa [J]. *Journal of Disaster Risk Studies*, 2019, 11(1): a591.
- [10] 马寨璞, 刘强, 井爱芹. 白洋淀防洪排涝与生态干旱监测数字化研究 [J]. *河北大学学报 (自然科学版)*, 2006, 26(5): 536-541. (MA Zhaipu, LIU Qiang, JING Aiqin. Studies on the digitization of Baiyangdian Lake for flood control and drought monitoring [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2006, 26(5): 536-541. (in Chinese))
- [11] 张丽丽, 殷峻暹, 侯召成. 基于模糊隶属度的白洋淀生态干旱评价函数研究 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2010, 38(3): 252-257. (ZHANG Lili, YIN Junxian, HOU Zhaocheng. Ecological drought evaluation function of Baiyangdian based on fuzzy membership degree [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(3): 252-257. (in Chinese))
- [12] 侯军, 刘小刚, 严登华, 等. 呼伦湖湿地生态干旱评价 [J]. *水利水电技术*, 2015, 46(4): 22-25. (HOU Jun, LIU Xiaogang, YAN Denghua, et al. Hulun Lake ecological drought evaluate [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(4): 22-25. (in Chinese))
- [13] 牛文娟, 苟思, 刘超, 等. 生态干旱初探 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(增刊1): 84-89. (NIU Wenjuan, GOU Si, LIU Chao, et al. Preliminary studies on ecological drought [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(Sup1): 84-89. (in Chinese))
- [14] SLETTE IJ, POST AK, AWAD M, et al. How ecologists define drought, and why we should do better [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3193-3200.
- [15] SNAPP. Workinggroup: ecological drought [EB/OL]. (2016-08-20) [2021-01-26]. <https://snappartnership.net/groups/ecological-drought>.
- [16] CRAUSBAY S D, RAMIREZ A R, CARTER S L, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(12): 2543-2550.
- [17] MUNSON S M, BRADFORD J B, HULTINE K R. An integrative ecological drought framework to span plant stress to ecosystem transformation [J]. *Ecosystems*, 2020, 9(19): 1-16.
- [18] COSTANZA R, d'ARGE R, de GROOT RS, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [19] DE GROOT R S, WILSON M A, BOUMANS R M J. A typology for the description, classification, and valuation of ecosystem functions, goods and services [J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-420.
- [20] 栗晓玲, 梁笋. 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))
- [21] PARK S Y, SUR C, LEE J H, et al. Ecological drought monitoring through fish habitat-based flow assessment in the Gam River Basin of Korea [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105830.
- [22] MCEVOY J, BATHKE D J, BURKARDT N, et al. Ecological drought: accounting for the non-human impacts of water shortage in the upper Missouri headwaters basin, Montana, USA [J]. *Resources*, 2018, 7(1): 1-14.
- [23] KIM J S, JAIN S, LEE J H, et al. Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 688-697.
- [24] 杜灵通, 刘可, 胡悦, 等. 宁夏不同生态功能区 2000—2010 年生态干旱特征及驱动分析 [J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(5): 149-156. (DU Lingtong, LIU Ke, HU Yue, et al. Ecological drought characteristics and analysis of driving factors of different ecological zones in Ningxia from 2000 to 2010 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 149-156. (in Chinese))
- [25] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 177-186. (WANG Zhaoli, HUANG Zeqin, LI Jun, et al. Assessing impacts of meteorological drought on vegetation at catchment scale in China based on SPEI and NDVI [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 177-186. (in Chinese))
- [26] 杨强, 王婷婷, 陈昊, 等. 基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 191-198. (YANG Qiang, WANG Tingting, CHEN Hao, et al. Characteristics of vegetation cover change in Xilin Gol League based on MODIS EVI data [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (22) :191-198. (in Chinese))
- [27] YANG Z, DI L, YU G, et al. Vegetation condition indices for crop vegetation condition monitoring[C]//Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver; British Columbia, 2011; 3534-3537.
- [28] SONG C, YUE C, ZHANG W, et al. A remote sensing-based method for drought monitoring using the similarity between drought eigenvectors[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(23) :8838-8856.
- [29] XU H, WANG X, YANG T. Trend shifts in satellite-derived vegetation growth in Central Eurasia, 1982-2013 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1658-1674.
- [30] TIETJEN B, SCHLAEPFER D R, BRADFORD J B, et al. Climate change-induced vegetation shifts lead to more ecological droughts despite projected rainfall increases in many global temperate drylands [J]. Global Change Biology, 2017, 23(7) :2743-2754.
- [31] CHU H, VENEVSKY S, WU C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:2051-2062.
- [32] JHAA S, DASA J, SHARMAB A, et al. Probabilistic evaluation of vegetation drought likelihood and its implications to resilience across India [J]. Global and Planetary Change, 2019, 176:23-35.
- [33] JIANG H, XU X, GUAN M, et al. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-postural transitional zone of northern China from 2000 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2019, 134:871.
- [34] LU X, ZHUANG Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9) : 1924-1939.
- [35] VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1) :52-57.
- [36] ZHANG Q, KONG D, SINGH V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: spatiotemporal patterns, causes and implications [J]. Global and Planetary Change, 2017, 152:1-11.
- [37] 张更喜, 栗晓玲, 郝丽娜, 等. 基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982-2015 年中国植被对干旱的响应[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (20) : 145-151. (ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, HAO Lina, et al. Response of vegetation to drought based on NDVI and scPDSI data sets from 1982 to 2015 across China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (21) :145-151. (in Chinese))
- [38] HAO X, LI W, HUANG X, et al. Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China [J]. Hydrological Processes, 2009, 24 (2) : 178-186.
- [39] CHEN Y, LI W, XU C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73 (2) : 547-558.
- [40] LYU J, WANG X, ZHOU Y, et al. Groundwater-dependent distribution of vegetation in Hailiutu River catchment, a semi-arid region in China [J]. Ecohydrology, 2013, 6(1) : 142-149.
- [41] 王旭升, 万力, 齐蕊, 等. 鄂尔多斯高原地下水与植被盖度的相互影响 [J]. 第四纪研究, 2014, 34 (5) : 1013-1022. (WANG Xusheng, WAN Li, QI Rui, et al. Interactions between groundwater and vegetation coverage in Odos Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34 (5) : 1013-1022. (in Chinese))
- [42] 齐蕊, 王旭升, 万力, 等. 地下水和干旱指数对植被指数空间分布的联合影响: 以鄂尔多斯高原为例 [J]. 地学前缘, 2017, 24 (2) : 265-273. (QI Rui, WANG Xusheng, WAN Li, et al. Joint influences of groundwater and aridity index on the spatial distribution of vegetation index: a case study in the Ordos Plateau, China [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2) :265-273. (in Chinese))
- [43] PHIRI M, SHIFERAW Y A, TESFAMICHAEL S G. Modelling the relationship between groundwater depth and NDVI using time series regression with distributed lag M [J]. South African Journal of Geomatics, 2018, 7 (2) : 147-163.
- [44] ZHANG G, SU X, SINGH V P. Modelling groundwater-dependent vegetation index using Entropy theory [J]. Ecological Modelling, 2020, 416:108916.
- [45] TURNER B L, KASPERSON R E, MATSON P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(14) :8074-8079.
- [46] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [47] OIKONOMOU P D, TSESMELIS D E, WASKOM R M, et al. Enhancing the standardized drought vulnerability index by integrating spatiotemporal information from satellite and in situ data [J]. Journal of Hydrology, 2019, 569:265-277.

- Water Resources Research,2018,54(3):2288-2316.
- [19] ZHUO L, HOEKSTRA A Y, WU P, et al. Monthly blue water footprint caps in a river basin to achieve sustainable water consumption; the role of reservoirs [J]. Science of the Total Environment,2019,650(1):891-899.
- [20] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(11):4098-4104.
- [21] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: evolution of a new research field [J]. Water Resources Management,2017,31(10):3061-3081.
- [22] LOVARELLI D, INGRAO C, FIALA M, et al. Beyond the water footprint: a new framework proposal to assess freshwater environmental impact and consumption [J]. Journal of Cleaner Production,2018,172:4189-4199.
- [23] CHUKALLA A D, KROL M S, HOEKSTRA A Y. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015,19(12):4877-4891.
- [24] ERCIN A E, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: the case study for France [J]. Ecological Economics,2013,88:133-147.
- [25] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, van OEL P R. Progress in water footprint assessment: towards collective action in water governance [J]. Water,2019,11:10705.
- [26] JOLLIET O, ANTON A, BOULAY A, et al. Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(11):2189-2207.
- [27] PAYEN S, FALCONER S, LEDGARD S F. Water scarcity footprint of dairy milk production in New Zealand: a comparison of methods and spatio-temporal resolution [J]. Science of the Total Environment,2018,639:504-515.
- [28] FRANKE N A, HOEKSTRA A Y, BOYACIOGLU H. Grey water footprint accounting: tier 1 supporting guidelines [M]. Delft:Institute for Water Education,2013.
- (收稿日期:2020-08-08 编辑:彭桃英)
- +++++
- (上接第 21 页)
- [48] RAHEEM N, CRAVENS A E, CROSS M S, et al. Planning for ecological drought: integrating ecosystem services and vulnerability assessment [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews:Water,2019,6(4):e1352.
- [49] JORDAAN A, BAHTA Y T, PHATUDI-MPHAHLELE B. Ecological vulnerability indicators to drought: case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa [J]. Jamba,2019,11(1):591.
- [50] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展 [J]. 水资源保护,2021,37(1):36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):36-45. (in Chinese))
- [51] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析 [J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-10-29 编辑:彭桃英)
- +++++

· 征订启事 ·

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933,CN 32-1356/TV)是水利部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊,针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题,主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985 年创刊,经过 30 多年的努力,《水资源保护》办刊成绩斐然,目前是美国《工程索引》(EI)收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊,同时被美国化学文摘(CA)、波兰哥白尼索引(IC)等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,30 元/册,全年共计 180 元,每逢单月 20 日出版。邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路 1 号 电话:(025)83786642

电子信箱:bh1985@vip.163.com;bh@hhu.edu.cn