

# 基于水循环全过程的旱涝级联效应研究框架

郑 帅<sup>1,2</sup>, 翁白莎<sup>1</sup>, 严登华<sup>1</sup>, 任立良<sup>2</sup>, 王 浩<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 气候变化与人类活动影响加剧背景下, 亟须实现旱涝灾害风险精准防控。从孕育机理、传播机制、事件评价、风险评估、影响效应等方面回顾了旱涝事件研究现状, 明晰了当前在旱涝事件演变机理和评价指标构建方面存在的不足。从水循环全过程视角, 分析了干旱和洪涝事件在坡面、河道、流域和区域 4 个尺度与水量和效应 2 个层面的本质内涵、影响效应及评价方式。基于地表-土壤-地下、坡面-河道、支流-干流及水网工程间的水力联系, 分别从水量和效应层面分析了不同空间尺度上干旱和洪涝的内在联系, 明确了干旱、洪涝及旱涝级联过程本质上受流域调蓄作用的影响。从旱涝级联效应的内涵、类型、表现形式和关键技术等方面, 提出了旱涝级联效应的研究框架。未来应从流域调蓄作用的视角量化不同空间尺度各要素调蓄能力变化, 分层调蓄防范化解旱涝风险。

**关键词:** 干旱; 洪涝; 水循环; 旱涝级联; 级联效应

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-6933(2024)01-0060-11

**Research framework of drought-flood cascade effect based on water cycle processes**// ZHENG Shuai<sup>1,2</sup>, WENG Baisha<sup>1</sup>, YAN Denghua<sup>1</sup>, REN Liliang<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Under the background of climate change and the increasing impact of human activities, it is urgent to realize precise preventive control against drought and flood disaster risks. Research progress of drought and flood events was reviewed from the aspects of preparation mechanism, propagation mechanism, event evaluation, risk assessment, and impact effects. The current deficiencies in the evolution mechanism and the construction of evaluation indicators of drought and flood events were clarified. Essential connotation, impact effect, and evaluation methods of drought and flood events were analyzed from the perspective of the dualistic water cycle and its associated processes at four scales (slope, riverway, watershed, region) and two aspects (water volume and effects). Based on the hydraulic connections between surface-soil-underground, slope-river, tributary-main stream, and water network engineering, the internal relationship between drought and flood at different spatial scales is analyzed from the aspects of water volume and effects. It is clarified that drought, floods, and the cascading processes of drought and flood are essentially influenced by the regulation and storage effect of the watershed. From the aspects of connotation, type, form, and key technologies, the research framework of the drought-flood cascade effect is proposed. It is necessary to quantify the changes in regulation and storage capacity of various elements at different spatial scales from the perspective of basin regulation and storage effects to prevent and resolve drought and flood disaster risks.

**Key words:** drought; flood; water cycle; drought-flood cascade; cascade effect

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (AR6) 表明: 1900 年以来全球升温速率为近 2000 年前所未有, 2001—2020 年全球平均表面温度相比 1850—1900 年升高 0.99℃, 造成全球水循环过程加快, 极端气候事件广发频发。紧急灾害数据库 (EM-DAT) 记录的 2000—2019 年全球

范围内自然灾害事件有 7 348 起, 其中干旱和洪涝灾害事件占比达 75%。受气候变化影响, 我国干旱和洪涝极端事件频发的同时其时空格局也发生了改变, 降水在空间上呈现出“南旱北涝”、时间上“冬增夏减”的趋势<sup>[1]</sup>, 如 2021 年我国河南省特大暴雨事件及 2022 年长江流域罕见的“汛期反枯”特大干

**基金项目:** 国家重点研发计划青年科学家项目 (2022YFC3080300); 国家优秀青年科学基金项目 (52022110)

**作者简介:** 郑帅 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事极端水文及生态环境效应研究。E-mail: 220201010018@hhu.edu.cn

**通信作者:** 翁白莎 (1986—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事极端水文及生态环境效应研究。E-mail: wengbs@iwhr.com

旱事件<sup>[2-3]</sup>。如何实现干旱和洪涝灾害风险精准防控,提出合理的应对方略,成为我国防汛抗旱和保障人民生命财产安全的迫切需求。

干旱形成的驱动机制复杂且行业侧重点各异,综合不同学科可划分为气象、农业、水文及社会经济4种类型干旱。针对特定类型干旱目前已提出大量评估指标<sup>[4-5]</sup>,包括单一类型指标,如标准化降水指数,以及采用权重组合、多变量联合分布、机器学习及模型模拟等<sup>[6-7]</sup>方法获得的综合性指标,如地表供水指数。近年来,分析不同干旱类型间时空关系和同步性的研究逐渐增多,干旱研究从单一类型风险评价发展到不同类型间传播的时空二维特征<sup>[8-9]</sup>。时间维度包括采用相关性分析方法确定干旱传播滞后时间<sup>[10]</sup>,采用联合分布及贝叶斯网络等方法确定干旱传播概率<sup>[11]</sup>、传播阈值及传播强度;空间维度包括模型模拟<sup>[12]</sup>或在三维空间通过分析干旱的中心、位移和方向来确定干旱空间传播特征。

洪涝灾害的研究包括3个方面,一是关注洪涝事件发生演变过程的不确定性,确定灾害发生概率<sup>[13]</sup>;二是降雨的不确定性和下垫面不均匀性叠加导致洪涝灾害淹没范围和淹没历时等风险要素的空间异质性,综合多风险要素的不同组合特性绘制洪涝灾害风险区划图<sup>[14]</sup>;三是综合考虑洪涝事件发生的不确定性和下垫面的不均匀性,分析评估洪涝灾害的可能损失<sup>[15-16]</sup>。洪涝灾害风险评估的基本方法包括基于历史灾情数据的统计分析法、基于多源数据的指标评估法、基于气象和下垫面要素不同组合的模型模拟法以及不确定性分析法<sup>[17-18]</sup>。

干旱和洪涝本质上是水循环过程中的极值状态或过程,发生演变仍遵循水循环的基本原理。完整的流域水循环包括“自然-社会”二元水循环过程及伴生的水生态、水环境和水沙过程,且各要素过程间互馈演化<sup>[19-20]</sup>。级联效应采用由因推果及由果溯因的方式考虑水循环多过程中的互馈作用,能够从根本上阐释干旱和洪涝事件演变机制。随着国家水网工程的实施,跨流域调水工程连通了多个流域的水循环过程,影响了干旱和洪涝的演变。本文综合考虑自然和人类活动,将多个具有水力联系的流域看作为一个区域,从水量和效应2个层面,坡面、河道、流域和区域4个尺度构建旱涝级联效应研究框架,以期为实现旱涝灾害风险精准防控提供参考。

## 1 干旱和洪涝研究现状

### 1.1 干旱研究现状

Ault<sup>[21]</sup>认为干旱指一段时间范围内,水分条件大幅低于平均状态导致的水资源短缺,进而对较大

范围内的自然和社会经济系统造成负面影响的灾害。根据描述干旱特征的变量及受灾对象的不同可划分为不同类型,其发生演变受到动力学与热力学过程的综合作用,一定条件下可从一种类型传播至另一种类型。

当前干旱研究主要包括孕育机理、传播机制、事件评价、风险评估、影响效应等方面。

干旱形成受气候变化、人类活动及二者共同作用三方面的影响<sup>[22]</sup>。气候变化通过大气环流异常造成的降水量减少和气温升高造成的蒸散发增大引发干旱事件<sup>[23-24]</sup>;人类活动通过改变下垫面条件,特别是土地利用,影响地表能量分配进而改变陆-气作用加剧了干旱事件<sup>[25]</sup>;人类过度开发造成的植被退化和下垫面生态环境破坏与气候要素引发的干旱事件形成正反馈效应,导致干旱事件加重<sup>[26]</sup>。目前采取相似流域对比、干扰前后对比、水文时间序列分解和模型模拟等方法分离气候变化和人类活动的影响<sup>[27]</sup>。

干旱沿水循环过程随时间演变为不同类型称为干旱传播,受气候、下垫面及人类活动影响,干旱信号在传播过程中存在时空滞后及频率和强度等特征的改变<sup>[8]</sup>。目前干旱传播研究集中在时间滞后、传播速率、传播阈值、空间演变四方面,研究方法包括统计分析和水文模型模拟等方法<sup>[28-29]</sup>。

为了准确识别干旱事件发生频率、持续时间及严重程度等特征,根据空间尺度和研究对象的不同可采用单一型和综合型两类指标<sup>[30-31]</sup>,如标准化径流指数和广义干旱评价指标,分别适用于单一干旱类型评价和区域评价。随缺水程度的进一步加剧,干旱事件向干旱灾害转变,以致灾因子识别、风险评估模型构建和风险区划为研究内容的干旱灾害风险评估快速发展<sup>[32]</sup>。此外,干旱灾害研究还包括干旱对生态环境和社会经济系统造成的不利影响<sup>[33-34]</sup>。

### 1.2 洪涝研究现状

洪涝指由于极端强降水等自然因素造成的坡面低洼区长期积水或江河水体泛滥,导致人民生命财产损失的一种灾害<sup>[35]</sup>。洪涝灾害驱动因素复杂,受降水和下垫面等自然因素及水利工程和洪泛区等人工排水系统的综合影响。根据时空尺度及主要影响因素和产汇流过程可将洪水分为不同类型,如强降雨洪水及融雪洪水等。

当前洪涝研究主要包括成因分析、风险评价、影响效应及损失评估等方面。洪涝灾害的形成受自然因素和社会因素的双重作用,自然因素包括气象条件、下垫面条件、河网水系形态等,如降雨时空格局、前期土壤湿度、植被等<sup>[36]</sup>;社会因素包括土地利用、

水利工程及排水设施建设等<sup>[37]</sup>,如水库调蓄能力、城区排水管网容量等。在社会经济发展和气候变化的双重影响下,洪涝灾害产生演变的时空格局和灾损程度发生了较大改变,以灾害风险概率和空间区划为主要内容的洪涝灾害风险评价研究得到快速发展<sup>[38-39]</sup>。

受降水格局不确定性和下垫面异质性的影响,不同区域洪涝灾害效应呈现出多样性。山区洪涝事件在高程和坡度作用下产汇流过程迅速,往往伴随泥石流等地质灾害,造成更严重的基础设施破坏和人员伤亡<sup>[40]</sup>。平原区坡度较小,汇流时间长,洪涝事件受复杂河网结构约束,行洪过程受阻造成更大的淹没范围和淹没历时<sup>[41]</sup>。海岸洪水受极端降水和风暴潮及上游来水的综合影响,造成沿海地区海水倒灌及排水不畅,增大了洪灾风险。除造成的不利影响外,洪涝事件也包括补给湖泊湿地水量及促进生境连通性等积极影响<sup>[42]</sup>。洪涝灾害损失评估是明确防灾减灾薄弱区的重要环节,包含直接和间接经济损失以及无形损失三方面,由于无形损失不参与市场交易,难以衡量其价值,目前多为经济损失评估。评估方法主要包括统计分析和模型模拟,其中模型模拟又包含数值模型和基于遥感的模型两类<sup>[43-45]</sup>。

### 1.3 未来研究方向

在自然气候变化和社会经济发展的双重影响下,极端干旱和洪涝事件呈频发广发态势,对自然环境和社会经济系统产生了严重威胁。而人类活动对干旱、洪涝及早涝级联过程影响的随机性较强,且现状洪旱应对措施多集中于旱涝发生时的应急找水和应急调度,虽在一定程度上缓解了区域洪旱风险,但其本质为风险的时空转移。而坡面单元尤其是植被和土壤在降水再分配和洪旱孕育过程中发挥着主体作用,因此本文主要考虑自然因素特别是坡面植被措施影响下,流域调蓄能力改变对旱涝级联演变的影响。回顾干旱和洪涝研究历程,以下几方面有待进一步探索:

- a. 干旱和洪涝事件驱动因素复杂多样,但目前多数评价指标构建具有明显区域性特征,缺乏不同区域间的适用性分析和不同指标间对比的统一评价标准。
- b. 干旱研究往往为单一类型或不同类型的结合,忽略了水循环多要素多过程间的协同演化作用,缺乏从水循环全过程的视角揭示干旱发生演变的内在机制。
- c. 目前洪涝事件的研究集中在河道尺度且较多关注灾害风险和损失的评估,缺乏水循环全过程

视角的洪涝事件发生演变内在机理研究。

## 2 干旱与洪涝的本质及协同效应

### 2.1 干旱和洪涝的本质是极端水文事件

干旱和洪涝是指因极端降水等自然因素造成的流域水循环过程长期或极度偏离平均状态的异常现象。二者本质上是水循环过程的极值过程,干旱和洪涝演变从根本上受流域调蓄作用的影响。国家水网工程的实施,使水循环过程的“自然-社会”二元驱动特性更加明显,联系更加紧密。干旱表现为降水异常减少造成不同时空尺度上水循环各过程的水资源短缺。洪涝表现为降水异常增加和产汇流过程不均衡导致的地表水量大幅增加。

#### 2.1.1 从水循环全过程分析旱涝的表现形式

干旱和洪涝表现为水循环关键环节的水分异常,按照空间尺度可划分为坡面尺度、河道尺度、流域尺度和区域尺度4类。

干旱表现为降水异常减少造成不同时空尺度上水循环各过程的水资源短缺<sup>[46]</sup>。坡面尺度上为土壤水含量输入和输出的长期负累积,无法满足坡面生态系统的需水阈值<sup>[47]</sup>。河道尺度上为补给量减少造成的河道水位持续下降和流量持续减小,无法满足河道内外的需水阈值。流域尺度上为某一时期降水和蒸发不平衡造成的水循环各环节水资源短缺。区域尺度上为水资源系统可供水量减少,经水利工程的合理配置后,供给仍无法满足用水需求。

洪涝表现为降水异常增加和产汇流过程不均衡导致的地表水量大幅增加。根据形成机制及表现形式可将洪和涝划分为两类事件。洪指江河湖泊水位上涨泛滥的现象;涝指低洼区长期异常积水现象。坡面尺度上一般为涝水事件,当产汇流过程造成坡面植被和土壤高强度破坏时,可认为是“坡面洪水”事件。河道尺度上为坡面水流短时高强度汇入,并在支流汇合过程中造成的河道流量和水位猛增。流域尺度上为坡面洼地积水及河道水位水量猛增。区域尺度上为一个或多个流域的洪涝现象经水利工程合理调蓄后,仍超过自然和人工系统排水能力而产生的区域性洪涝。

通过各环节间的水力联系,不同空间尺度上干旱和洪涝的表现形式可相互转化(图1)。坡面尺度以土壤水为节点连通地表水和地下水,形成地表-土壤-地下的协同互馈关系,如干旱期地表蒸散发导致的地下水位持续下降。河道尺度包括以地下水位为媒介的坡面-河道互联和以河道为媒介的支流-干流的协同。流域尺度为坡面与河道尺度的综合,区域尺度上则是水利工程连通后流域尺度的综合。总体

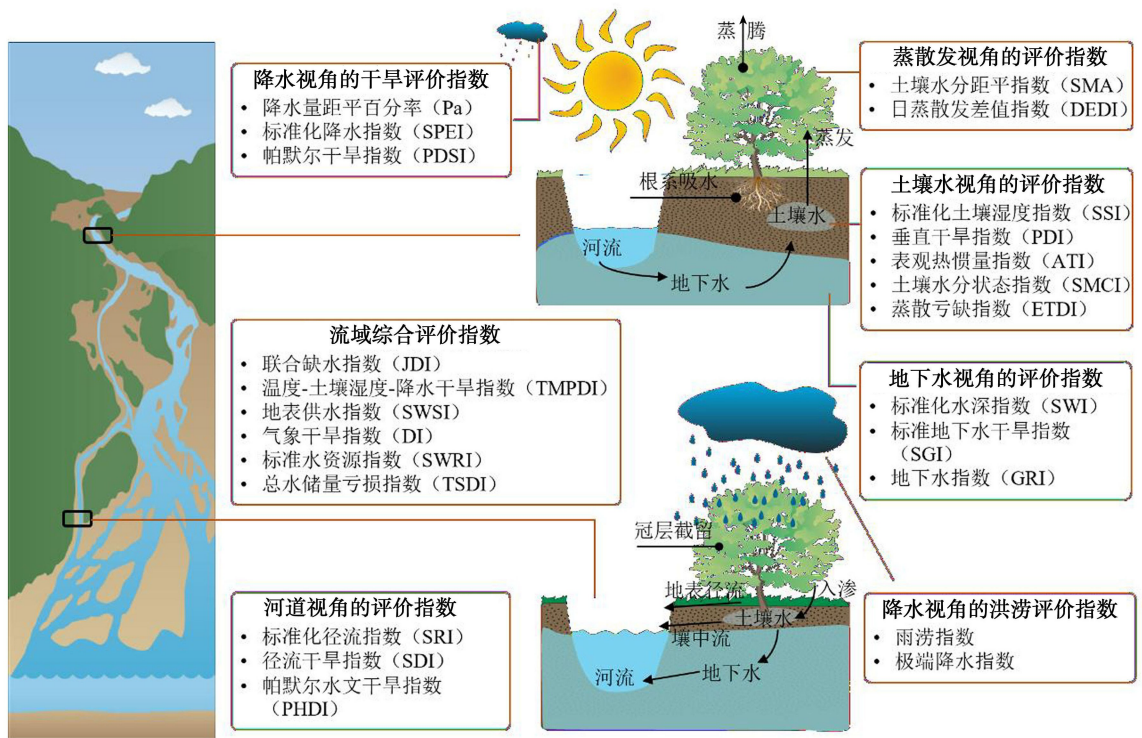


图1 基于水循环过程要素的旱涝评价指标

Fig.1 Assessment indicators for drought and flood based on elements in water cycle processes

上,干旱和洪涝都可从水资源系统供与需的视角理解,整体上表现为各环节供给与需求的不平衡。

### 2.1.2 从水循环全过程构建旱涝评价指标

完整流域水循环包含坡面产流和河道汇流过程,旱涝评价指标包含坡面尺度、河道尺度和区域尺度3类,坡面尺度可分为蒸散发、土壤水和地下水三方面。

干旱是一种缓慢发展的气候现象,主要由大尺度气候系统内部变率引起,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<sup>[48]</sup>。目前用于干旱评价的指标大多数为月以上时间尺度,仅少数为日尺度<sup>[49]</sup>。

坡面尺度上,蒸散发视角的干旱评价指标包括基于实际蒸散发与潜在蒸散发关系<sup>[49]</sup>、潜在蒸散发与土壤含水量关系、潜在蒸散发与降水量关系<sup>[50]</sup>等方面的指标,如日蒸散发差值指数和土壤水分距平指数;土壤水视角的评价指标包括土壤含水量经验频率曲线、基于光谱波段反射率和土壤热特性的遥感反演、基于土壤介电常数变化的微波反演及模型模拟等方面<sup>[51-52]</sup>的指标,如标准化土壤湿度指数和垂直干旱指数;地下水视角的指标包括基于地下水位<sup>[53]</sup>和地下水蓄变量<sup>[54]</sup>等方面的指标,如标准化水位指数和地下水指数。河道尺度多数从径流量的

视角构建评价指标,如标准化径流指数和径流干旱指数。由于单一型指标难以反映地区特征,区域尺度干旱评价一般采用多变量联合分布、多指标权重组合、模型模拟和陆地总水储量等方法构建的综合性指标<sup>[30]</sup>,如标准化降水蒸散发指数和标准水资源指数。按照成因,洪涝事件可分为暴雨洪水、融雪洪水、风暴潮洪水等,而我国历年大洪水多数由暴雨过程形成,其时间尺度大部分为小时、天<sup>[55]</sup>,而少部分超长时间暴雨可能持续数周。

洪涝评价通常采用降水和径流量数据构建指标,如采用逐日降水数据计算的雨涝指数和洪水指数<sup>[56-57]</sup>,基于流量数据的洪水危险性指数等<sup>[58]</sup>。

### 2.2 干旱和洪涝对生态环境和社会经济的影响效应应具有协同性

干旱和洪涝效应是指随旱涝事件的发展,对流域自然生态环境和社会经济系统产生的影响。基于水循环及其伴生过程和社会经济商品供给,影响效应表现为生态环境自协同、生态环境-社会经济协同及社会经济自协同三方面。

生态环境效应自协同是基于水循环水力联系和生物地球化学循环过程<sup>[59]</sup>,达到动态平衡的方式,前者如坡面土壤含水量减小产生水分胁迫影响植被和土壤的蒸散发过程,后者如植被物候变化调节叶

片凋落过程影响土壤养分输入。生态环境-社会经济协同为生态系统通过供给、调节、支持等服务功能维持社会经济的正常运转,社会经济系统通过工程与非工程方式反馈给生态环境<sup>[60]</sup>,前者如干旱造成农牧业减产降低供给能力引发粮食危机;后者如水利工程建设调节水循环过程改变生态环境态势。社会经济自协同是通过社会调节机制实现减缓和适应灾害影响的方式<sup>[61]</sup>,如调整生产和生活方式应对旱涝灾害事件。

2.2.1 从水循环伴生过程分析旱涝的影响形式

干旱和洪涝效应包括生态环境和社会经济系统两部分,生态环境效应包括水生态效应、水环境效应及水沙效应三方面。

干旱通过水循环关键环节的水资源短缺改变水生态和水环境过程。坡面尺度上水生态效应包含植被和微生物两类。对植被的影响包括个体和群落两个层面,其中个体分为根系、茎和冠层,对根系的影响为干旱导致根系形态及生物量变化<sup>[62]</sup>,如总侧根长度、根系直径和根系分泌物的变化;茎部的影响为干旱导致木质部栓塞和韧皮部水分运输受阻<sup>[63]</sup>,引发树木死亡;对冠层<sup>[64]</sup>的影响为干旱导致冠层叶面积减小、光合作用受阻及植被物候改变等;对群落的影响为干旱导致植株矮小化和群落结构同质化及引发火灾<sup>[65]</sup>。对微生物的影响包括直接和间接两个方面,直接影响为干旱产生水分胁迫造成微生物细胞水分流失损害细胞完整性;间接影响为干旱改变微生物生境及有机物质的生物可用性等影响微生物群落结构<sup>[66]</sup>。水环境效应包括土壤的物理和化学影响两方面,物理方面包括干旱破坏土壤团聚体稳定性、降低土壤总孔隙度和饱和导水率等;化学方面包括土壤酸碱度及营养元素生物有效性变化等。河道尺度上干旱的水生态影响包括生物栖息地范围减小、区域间有机物来源和交换减少、栖息地之间的连通性和多样性减少、栖息地质量降低4个方面,最终造成河道生物群落结构和功能特征的同质化。水环境影响包括减少了坡面向河道的有机物质和营养元素输入,同时减小了河道的水环境容量,通常综合表现为河道水环境质量的下降<sup>[67]</sup>。

除水生态和水环境效应外,洪涝效应还包括水沙效应。与干旱影响方向不同,坡面尺度上水生态和水环境效应为地表长期积水影响土壤和植被呼吸,改变生物地球化学循环过程;水沙效应为降雨对土壤的溅蚀、径流冲刷等造成的土壤和养分流失<sup>[68]</sup>。河道尺度上水生态效应包括积极和消极两方面,积极方面为提高了河流与河漫滩的动态连

性,补充湖泊和湿地水量的同时提供了丰富的营养物质,消极方面为生物生境物理破坏和疾病传播;水环境效应包括大量泥沙和营养物质入河造成的水环境质量恶化;水沙效应包括河道拓宽、河漫滩淤积及河岸脆弱区的垮塌等。

干旱是持续性的自然灾害,持续时间从数月到数年不等。干旱对社会经济的直接影响包括供水减少增加水源性疾病风险、水资源短缺造成工业减产和河道水位降低影响水上运输等;间接影响包括粮食减产引发粮食危机、低流量减少电力供给以及影响社会秩序等。洪涝灾害具有突发性强、范围集中和历时短的特点。洪涝对社会经济的直接影响包括冲毁房屋、破坏人工基础设施及造成人民生命财产损失等;间接作用包括毁坏农田、污染水源、传播病菌等。

2.2.2 从水循环伴生过程构建旱涝的效应指标

基于干旱和洪涝对水循环伴生过程的影响形式,从作用对象出发构建旱涝效应评价指标(图2)。

坡面尺度上干旱的影响效应指标包括土壤、植被和微生物3类。土壤包括物理和化学类指标,物理指标包括土壤温度、团聚体直径、孔隙度等单一类型指标,土壤饱和导水率与土壤持水能力等综合类型指标;化学指标包括土壤酸碱度、有机碳含量、全氮和全磷浓度等。植被包括根系、茎和冠层的单类型指标和综合型指标,根系指标包括根系形态和根系分泌物两方面,如根长、根生物量;茎部指标包括木质部和韧皮部及茎高等方面,如木质部压力值和木质部导水率损失百分比;冠层指标包括冠层温度、气孔导度、叶片形态;综合指标包括净初级生产力、光能利用率、水分利用效率等。微生物指标包括多样性指数、微生物代谢熵等。河道尺度包括水环境和水生态效应指标,水环境方面包括水温、溶解氧浓度、透明度等指标,水生态方面包括物种密度、食物网结构的多样性及复杂性、生境连通性等指标。

除上述指标外,洪涝的水生态效应指标还包括土壤导气率、土壤气体扩散系数及土壤氧气浓度等。水沙效应类坡面尺度指标包括土壤分离能力及土壤侵蚀阻力等,河道尺度指标包括河道宽度、弯曲度及河床起伏度等。

对社会经济的影响包括水资源供给、农牧业、经济发展及生命健康等方面,二者致灾机理不同。干旱是通过减少水资源供给,评价指标如水贫乏指数和社会经济干旱指数等。洪涝包含冲毁农田及毁坏基础设施的直接作用或水环境恶化及传播疾病的间接作用,评价方式包括作物受灾面积、受灾人数等。

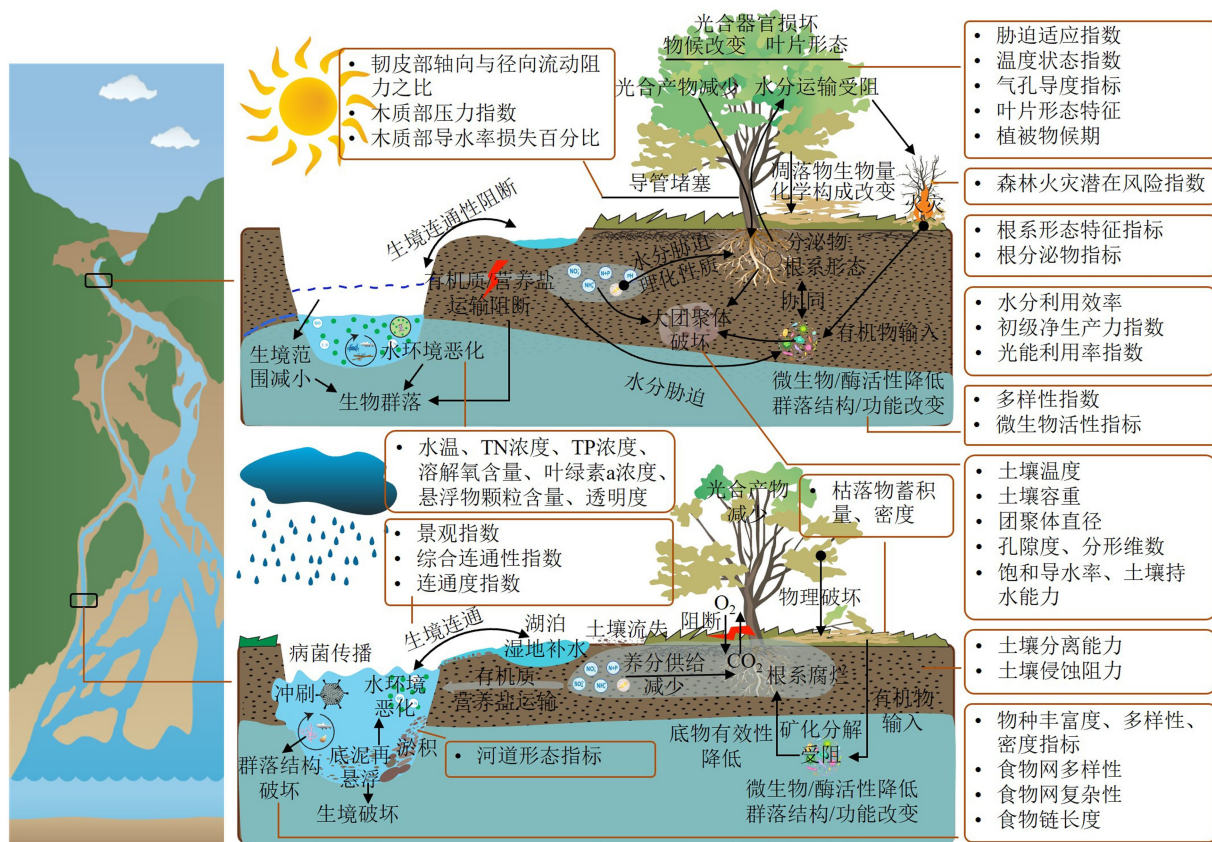


图2 基于水循环伴生过程要素的效应评价指标

Fig.2 Effect assessment indicators based on elements in associated processes of the water cycle

### 3 旱涝级联效应研究框架

#### 3.1 旱涝级联的内涵及类型

##### 3.1.1 内涵

级联是指一系列相互关联的事物或过程间的交互作用。旱涝级联是指以自然因素产生的极端降水事件为诱因,以流域水循环过程中不同空间尺度的水力联系和生物地球化学循环为纽带,干旱和洪涝灾害在流域关键水环节及伴生过程间的传递和演变<sup>[69]</sup>,并最终对自然环境和社会经济系统产生的一系列直接或间接影响。时间尺度上仍遵循干旱或洪涝事件的演变规律,即干旱事件多为月以上时间尺度,而洪涝的演变多为小时或天时间尺度。

##### 3.1.2 类型

旱涝级联包括干旱和洪涝的单灾种级联以及干旱和洪涝组合的多灾种级联,每个过程又包含水量和效应两个层面,如图3所示。单灾种级联以干旱为例,水量层面上由于降水减少和蒸散发增加,干旱事件通过地表-土壤-地下、坡面-河道及支流-干流之间的水力联系发展演变,干旱期为河道补给地下水,以土壤水为纽带用于地表蒸散发,以及支流补给干流用于水资源供给;效应层面为水循环各环节水量的缺乏对伴生过程的影响,并通过物质循环和能量

流动在不同过程间传递。多灾种级联以旱涝急转为例<sup>[70]</sup>,水量层面干旱期间蒸散发及水资源供给的消耗,使得水循环各环节可蓄水量增多,利于减轻洪灾风险;效应层面干旱导致坡面土壤结构破坏及植被退化,造成极端降水时期植被截留量与土壤蓄持量减少,可能加重洪灾风险。

#### 3.2 旱涝级联效应的表现形式

水循环过程是自然界物质循环和能量流动的媒介,是自然生态和社会经济系统协同互馈的关键纽带,从流域水循环及其伴生过程出发,干旱和洪涝级联过程包括水量和效应两个层面。

干旱事件减弱或阻断了“自然-社会”二元水循环系统各组分间的联系,抑制各组间的生物地球化学循环。水量层面级联基于水循环的水力联系,空间扩张一般为坡面干旱→河道干旱→流域干旱→区域干旱。地表在降水减少而蒸散发持续消耗的情况下,通过地表-土壤-地下的水力联系,造成地下水位下降至低于某一阈值,引发坡面干旱;地下水位下降破坏坡面-河道间水力平衡,导致河道水补给来源减少或河道水补给地下水,引发河道干旱;支流的干旱通过水系汇流逐级传递引发流域干旱;单一或多个流域的干旱导致地区可供水量不足引发区域干旱。效应层面级联基于生物地球化学循环过程,如土壤

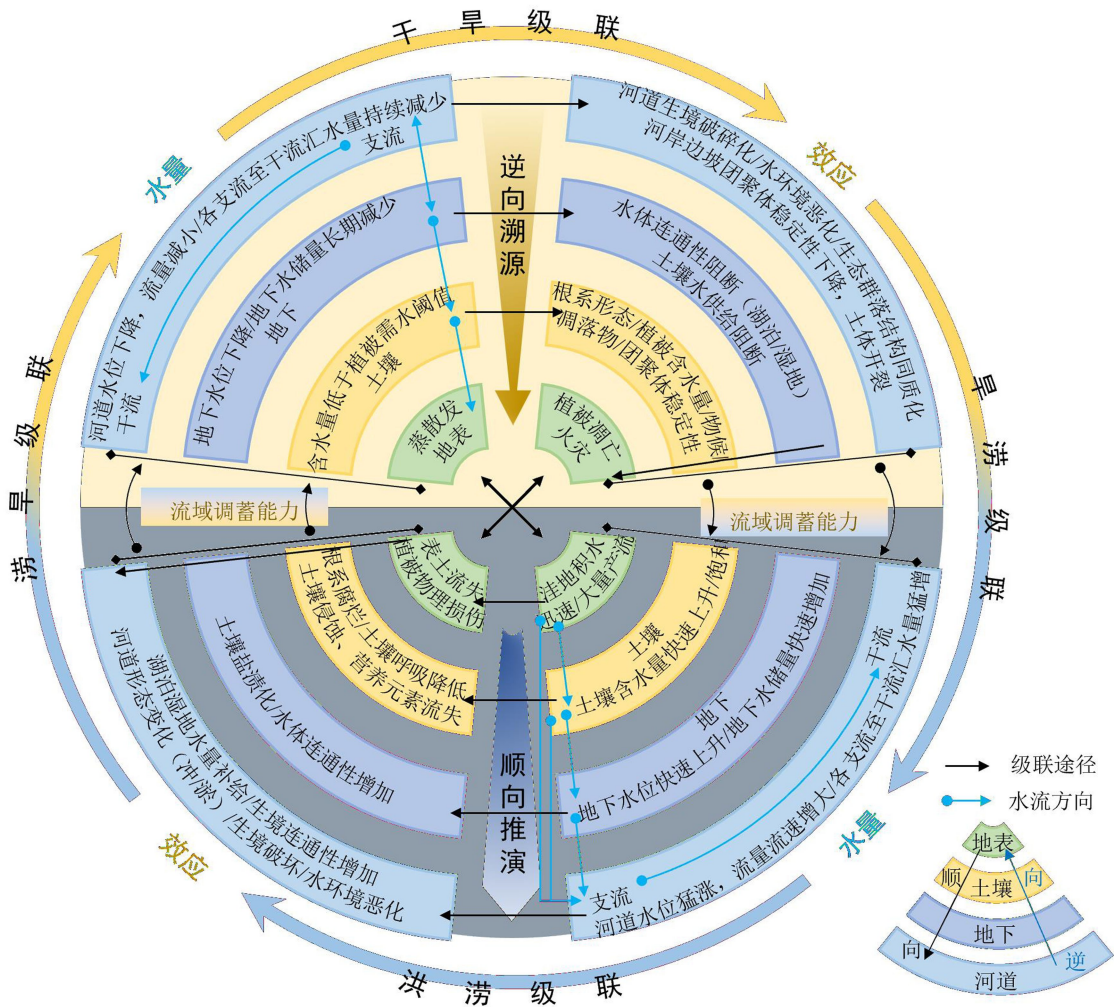


图3 旱涝级联效应逻辑框架

Fig.3 Logical framework of drought-flood cascade effect

含水量的减少产生水分胁迫的同时改变土壤理化性质,从直接和间接两方面影响植被生长和微生物群落结构,而植被生长改变根冠生物量、分泌物及植物物候,影响微生物群落结构,同时植被和微生物的综合作用也会改变土壤理化性质。

与干旱事件相比,洪涝事件通过降水促进各组分间的联系,水量层面为坡面产流和流域汇流过程,级联过程与干旱相似,方向相反;效应层面增加了泥沙方面的级联,如坡面产汇流过程携带土壤泥沙进入河道,改变河道冲淤特性和水环境质量。

相比于单灾种级联,多灾种级联表现出更强的复杂性。旱涝级联过程包含两个方面,一是干早期水量和效应的结果影响洪涝期流域产汇流过程,干早期流域各尺度水量的消耗相对增加了流域可蓄水量,而伴生过程的破坏改变了坡面调蓄能力,改变产汇流过程。二是干早期效应的结果直接影响洪涝期效应的级联,伴生过程的破坏增加了自然和社会的系统脆弱性,间接加重洪涝时期各组分的破坏程度并改变效应级联过程。洪涝事件突发性强,历时相

比干旱较短,且洪涝事件补充了流域水量,短期内不会形成干旱灾害。因此由洪涝转旱主要为效应级联过程,即洪涝事件发生造成的土体滑坡、河道淤积、植被破坏等,影响各尺度上可蓄水量的变化,从而影响干旱事件的形成演变过程。

### 3.3 关键技术

干旱和洪涝演变受流域调蓄作用的影响主要包括两个方面,一是特定气象条件下,流域调蓄作用通过渗透、储存、传输、调节等环节影响流域水循环过程,从而影响干旱和洪涝演变过程;二是干旱或洪涝事件的发生改变了流域调蓄阈值,进而影响后续事件的发生和演变过程。因此,干旱、洪涝及旱涝发生演变趋势可由变化环境下不同空间尺度上各组分的调蓄阈值来表征和调控。

坡面主要发挥垂向调蓄功能,表现为大气降水经植被、枯落物及土壤三部分的截留、渗透、储存、运输等环节的再分配过程。影响要素包括植被类型和盖度、土壤质地和结构、前期土壤湿度等,常用评价指标有冠层截留能力、枯落物有效拦蓄量、土壤持水

和导水能力。

河道的调蓄功能包括纵向、横向和垂向 3 个维度,纵向为河道水系逐级汇流调蓄、横向为河道与洪泛区间的横向连通调蓄、垂向为地表与地下及水体与大气的垂向水分交换调蓄。影响要素包括河道形态、河网密度和河流长度等,常用评价指标包括河道形态参数、数量特征参数及复杂性参数,如河流比降、河网密度、河网复杂度等。

流域调蓄功能受流域形状、流域结构特征、水利工程等影响。流域形状特征包括面积及形态因子;流域结构特征包括高程、坡度、水系特征;水利工程包括流域尺度上的水库和蓄滞洪区,区域尺度上的跨流域引调水工程,评价指标包括库容和蓄滞洪区面积等。

## 4 结 语

全球升温加速背景下,极端旱涝事件风险大幅增大,本文从孕育机理、事件评价、风险评估及影响效应等方面回顾了干旱和洪涝事件研究现状,指出当前缺乏从水循环多过程协同的视角分析旱涝演变内在机制的研究以及评价指标区域性特征明显且缺乏各指标间对比的统一评价标准。

国家水网工程建设实施连通流域水循环过程,“自然-社会”二元水循环联系更加紧密。从水循环全过程视角,考虑跨流域调水工程,将水循环及其伴生过程划分为坡面、河道、流域、区域 4 个尺度以及水量和效应 2 个层面。从 4 个尺度、2 个层面分析了干旱和洪涝的本质内涵、影响形式及评价方式,并基于地表-土壤-地下、坡面-河道、支流-干流、水网工程间的水力协同作用和生物地球化学循环过程分析了不同空间尺度干旱和洪涝发生演变的内在联系。从水量和效应层面分析了干旱级联、洪涝级联、旱涝级联,明确了级联过程的发生演变本质上受流域调蓄作用的影响,水量级联与效应级联相互协同,共同影响旱涝事件的演变过程。从旱涝级联的内涵、类型、表现形式和关键技术等方面提出旱涝级联效应的研究框架,可为变化环境下洪旱灾害风险防范与应对提供理论支撑。

干旱和洪涝的本质是极端水文事件,发生演变仍遵循水循环的基本原理,受到流域调蓄作用影响,为提升旱涝风险精准防控能力,未来可立足流域调蓄机理,从以下方面开展研究:①从流域调蓄作用的视角,评估不同地理环境下干旱和洪涝演变主要控制因素;②分析不同空间尺度上多要素调蓄阈值定量表示方法及其内在联系;③分层分类量化不同气象因素条件下水循环伴生过程要素及组合的调蓄阈

值变化;④分析多要素过程分层调蓄阈值(植被截留、枯落物截留和土壤蓄滞等)作用下,旱涝事件风险变化,实现风险精准防控。

## 参考文献:

[ 1 ] 祁添垚,张强,孙鹏,等. 气候暖化对中国洪旱极端事件演变趋势影响研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(3): 143-152. ( QI Tianyao, ZHANG Qiang, SUN Peng, et al. Influence of climate warming on evolution trend of extreme flood /drought events in China [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3): 143-152. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 梁旭东,夏茹娣,宝兴华,等. 2021 年 7 月河南极端暴雨过程概况及多尺度特征初探[J]. 科学通报,2022,67(10): 997-1011. ( LIANG Xudong, XIA Rudi, BAO Xinghua, et al. Preliminary investigation on the extreme rainfall event during July 2021 in Henan Province and its multi-scale processes [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(10): 997-1011. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 周军,任宏昌,王蒙,等. 2022 年夏季长江流域干旱特征及成因分析[J]. 人民长江,2023,54(2): 29-35. ( ZHOU Jun, REN Hongchang, WANG Meng, et al. Characteristics and causes of drought event over Yangtze River Basin in summer 2022 [ J ]. Yangtze River, 2023, 54(2): 29-35. ( in Chinese ) )

[ 4 ] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [ C ] // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim; American Meteorological Society, 1993: 179-184.

[ 5 ] NALBANTIS I. Evaluation of a hydrological drought index [ J ]. European Water, 2008, 23(24): 67-77.

[ 6 ] KAO S C, GOVINDARAJU R S. A copula-based joint deficit index for droughts [ J ]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1/2): 121-134.

[ 7 ] 翟家齐,蒋桂芹,裴源生,等. 基于标准水资源指数(SWRI)的流域水文干旱评估:以海河北系为例[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 687-698. ( ZHAI Jiaqi, JIANG Guiqin, PEI Yuansheng, et al. Hydrological drought assessment in the river basin based on standard water resources index ( SWRI ): a case study on the Northern Haihe River [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 687-698. ( in Chinese ) )

[ 8 ] ZHANG Xuan, HAO Zengchao, SINGH V P, et al. Drought propagation under global warming: characteristics, approaches, processes, and controlling factors [ J ]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156021.

[ 9 ] 冯凯,李彦彬,王飞,等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 63-72. ( FENG Kai, LI Yanbin, WANG Fei, et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved

- three-dimensional identification method [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):63-72. (in Chinese))
- [10] 薛联青,白青月,刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护, 2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):57-62. (in Chinese))
- [11] 高放,刘冀,陈威,等. 淮河流域上游分区气象-水文干旱传播特征及响应概率研究[J]. 水土保持研究,2023, 30(5):257-265. (GAO Fang, LIU Ji, CHEN Wei, et al. Study on propagation characteristics and response probabilities of meteorological and hydrological drought zones in the Upper Reaches of Huai River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5):257-265. (in Chinese))
- [12] LIN Qingxia, WU Zhiyong, ZHANG Yuliang, et al. Propagation from meteorological to hydrological drought and its application to drought prediction in the Xijiang River Basin, South China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:128889.
- [13] WANG Yongfang, LIU Guixiang, GUO Enliang, et al. Quantitative agricultural flood risk assessment using vulnerability surface and copula functions [J]. Water, 2018,10(9):1229-1245.
- [14] ZHU Xuehong, DAI Qiang, HAN Dawei, et al. Modeling the high-resolution dynamic exposure to flooding in a city region[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(8):3353-3372.
- [15] JIN Youjie, ZHANG Jianyun, LIU Na, et al. Geomatic-based flood loss assessment and its application in an eastern city of China[J]. Water, 2022,14(1):126-139.
- [16] 王艳艳,李娜,王杉,等. 洪灾损失评估系统的研究开发及应用[J]. 水利学报, 2019, 50(9):1103-1110. (WANG Yanyan, LI Na, WANG Shan, et al. Development and application of flood damage assessment system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9):1103-1110. (in Chinese))
- [17] 严登华,袁喆,王浩,等. 水文学确定性和不确定性方法及其集合研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(1):73-82. (YAN Denghua, YUAN Zhe, WANG Hao, et al. Progress of certainty and uncertainty methods of hydrologic and the framework of ensemble analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1):73-82. (in Chinese))
- [18] 李超超,田军仓,申若竹. 洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(3):131-136. (LI Chaochao, TIAN Juncang, SHEN Ruozhu. Review on assessment of flood and waterlogging risk [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3):131-136. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10):1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10):1219-1226. (in Chinese))
- [21] AULT T R. On the essentials of drought in a changing climate[J]. Science, 2020, 368(6488):256-260.
- [22] 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))
- [23] HABIBI M, BABAEIAN I, SCHÖNER W. Changing causes of drought in the Urmia Lake Basin: increasing influence of evaporation and disappearing snow cover [J]. Water, 2021, 13(22):3273.
- [24] 贾建伟,王栋,徐伟峰,等. 2022 年鄱阳湖流域干旱综合评估及成因分析[J]. 人民长江, 2023, 54(2):36-42. (JIA Jianwei, WANG Dong, XU Weifeng, et al. Comprehensive evaluation and cause analysis of drought in Poyang Lake Basin in 2022 [J]. Yangtze River, 2023, 54(2):36-42. (in Chinese))
- [25] CHIANG F, MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity [J]. Nature Communications, 2021, 12(1):2754.
- [26] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3):500-521. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3):500-521. (in Chinese))
- [27] 王文,王靖淑,陶奕源,等. 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展[J]. 水文, 2020, 40(3):1-8. (WANG Wen, WANG Jingshu, TAO Yiyuan, et al. Review of human impacts on formation and development of hydrologic drought [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(3):1-8. (in Chinese))
- [28] GUO Yi, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712:136502.
- [29] KONAPALA G, MONDAL S, MISHRA A. Quantifying spatial drought propagation potential in North America

- using complex network theory [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(3): e2021WR030914.
- [30] 邢贞相,李根,付强,等. 寒区农业流域综合干旱指数构建及其适用性分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 42-51. (XING Zhenxiang, LI Gen, FU Qiang, et al. Construction of an optimized comprehensive drought index for agricultural watersheds in cold regions and its applicability analysis [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 42-51. (in Chinese))
- [31] WENG Baisha, YAN Denghua, WANG Hao, et al. Drought assessment in the Dongliao River Basin: traditional approaches vs. generalized drought assessment index based on water resources systems[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(8): 1889-1906.
- [32] CUI Yi, TANG Huiyan, JIN Juliang, et al. System structure-based drought disaster risk assessment using remote sensing and field experiment data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5700.
- [33] GÓ MEZ-GENER L, LUPON A, LAUDON H, et al. Drought alters the biogeochemistry of boreal stream networks[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1795.
- [34] 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 & Water Engineering*, 2019, 30(2): 12-18. (in Chinese))
- [35] 张强,高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. *科技导报*, 2004(7): 21-24. (ZHANG Qiang, GAO Ge. The spatial and temporal features of drought and flood disasters in the past 50 years and monitoring and warning services in China [J]. *Science & Technology Review*, 2004(7): 21-24. (in Chinese))
- [36] 许丽玲,闫敏慧,王付华,等. 2021 年 6 月大兴安岭地区暴雨洪涝灾害成因分析[J]. *灾害学*, 2023, 38(1): 88-93. (XU Liling, YAN Minhui, WANG Fuhua, et al. Cause analysis of rainstorm and flood disaster in Daxinganling region in June 2021 [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(1): 88-93. (in Chinese))
- [37] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 153-165. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))
- [38] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 101-108. (in Chinese))
- [39] HUANG Jing, YANG Yabin, YANG Yang, et al. Risk assessment of urban rainstorm flood disaster based on land use/land cover simulation [J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(12): e14771.
- [40] SUN Xiaoyun, ZHANG Guotao, WANG Jiao, et al. Spatiotemporal variation of flash floods in the Hengduan Mountains region affected by rainfall properties and land use[J]. *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 465-488.
- [41] 赵华青,周璐,赵然杭,等. 基于 MIKE 耦合模型的平原区流域洪涝过程模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2022(7): 97-102. (ZHAO Huaqing, ZHOU Lu, ZHAO Ranhang, et al. Flood process modeling in the plain basin based on MIKE coupling model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(7): 97-102. (in Chinese))
- [42] KARIM F, MARVANEK S, MERRIN L, et al. Modelling flood-induced wetland connectivity and impacts of climate change and dam[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1278-1294.
- [43] 陈敏建,周飞,马静,等. 水害损失函数与洪涝损失评估[J]. *水利学报*, 2015, 46(8): 883-891. (CHEN Minjian, ZHOU Fei, MA Jing, et al. Water-induced disaster damage function and flood and water-logging damage assessment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 883-891. (in Chinese))
- [44] 苏鑫,邵薇薇,刘家宏,等. 基于情景模拟的洪涝灾害经济损失动态评估[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(10): 1606-1617. (SU Xin, SHAO Weiwei, LIU Jiahong, et al. Dynamic assessment of economic losses from flood disasters based on scenario simulations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2022, 62(10): 1606-1617. (in Chinese))
- [45] RAHMAN M S, DI Liping. A systematic review on case studies of remote-sensing-based flood crop loss assessment [J]. *Agriculture*, 2020, 10(4): 131-161.
- [46] 翁白莎. 流域广义干旱风险评价与风险应对研究: 以东辽河流域为例[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [47] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese))
- [48] YUAN Xing, WANG Yumiao, JI Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. *Science*, 2023, 380(6641): 187-191.
- [49] 张霞,段亚雯,段建平,等. 基于蒸散发构建的日干旱指数及其对区域干旱事件的表征分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(3): 540-558. (ZHANG Xia, DUAN Yawen, DUAN Jianping, et al. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analysis [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(3): 540-558. (in Chinese))

- [50] 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, 59(6): 737-746. ( MA Zhuguo, FU Congbin. Trend of surface humid index in the arid area of northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(6): 737-746. (in Chinese))
- [51] AGHAKOUCHAK A. A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index; application to the 2012 United States drought[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(7): 2485-2492.
- [52] GHULAM A, QIN Qiming, ZHAN Zhiming. Designing of the perpendicular drought index [J]. Environmental Geology, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [53] BHUIYAN C. Various drought indices for monitoring drought condition in aravalli terrain of India [C]// Proceedings of the XXth ISPRS Conference. Istanbul: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004: 1283-1288.
- [54] MENDICINO G, SENATORE A, VERSACE P. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357(3/4): 282-302.
- [55] 余锡平,单楷越. 华北平原极端暴雨洪水事件共性机制探讨及对策建议[J]. 中国水利, 2023(18): 24-28. ( YU Xiping, SHAN Kaiyue. Common mechanisms and disaster prevention strategies for catastrophic rainfall and flooding events in the North China Plain [J]. China Water Resources, 2023(18): 24-28. (in Chinese))
- [56] 陈鲜艳,李威,张强,等. 长江中下游地区雨涝指数构建及其应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 834-842. ( CHEN Xianyan, LI Wei, ZHANG Qiang, et al. Construction and application of a flood-waterlogging index in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 834-842. (in Chinese))
- [57] NOSRATI K, SARAVI M M, SHAHBAZI A. Investigation of flood event possibility over Iran using flood index [M]//GÖKÇEKUS H, TÜRKER U, LAMOREAUX J W. Survival and Sustainability: Environmental Concerns in the 21st Century. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 1355-1361.
- [58] 侯静雯,叶爱中,甘衍军,等. 洪水灾害危险性评价方法的研究与改进[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 57-62. ( HOU Jingwen, YE Aizhong, GAN Yanjun, et al. Research and improvement on assessment method of flood hazard [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 57-62. (in Chinese))
- [59] SHAFFIQUE S, KHAN M A, IMRAN M, et al. Research progress in the field of microbial mitigation of drought stress in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 870626.
- [60] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640. ( OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, ZHAO Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635-640. (in Chinese))
- [61] 蒋云钟,严子奇,贾绍凤,等. 全球变化背景下特大干旱综合应对研究框架[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 347-357. ( JIANG Yunzhong, YAN Ziqi, JIA Shaofeng, et al. Initiatives on comprehensive response to severe drought in the context of global changes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3): 347-357. (in Chinese))
- [62] DINNENY J R. Developmental responses to water and salinity in root systems[J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 2019, 35(1): 239-257.
- [63] SEVANTO S. Drought impacts on phloem transport[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2018, 43: 76-81.
- [64] JIANG Weixia, WANG Lunche, ZHANG Ming, et al. Analysis of drought events and their impacts on vegetation productivity based on the integrated surface drought index in the Hanjiang River Basin, China [J]. Atmospheric Research, 2021, 254: 105536.
- [65] AGUIRRE-GUTIÉRREZ J, MALHI Y, LEWIS S L, et al. Long-term droughts may drive drier tropical forests towards increased functional, taxonomic and phylogenetic homogeneity[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3346.
- [66] BU Xuelei, GU Xinyun, ZHOU Xiaoqi, et al. Extreme drought slightly decreased soil labile organic C and N contents and altered microbial community structure in a subtropical evergreen forest [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 429: 18-27.
- [67] WALTER J M, LOPES F A C, LOPES-FERREIRA M, et al. Occurrence of harmful cyanobacteria in drinking water from a severely drought-impacted semi-arid region [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 176.
- [68] SHEN Ruichang, LAN Zhichun, RINKLEBE J, et al. Flooding variations affect soil bacterial communities at the spatial and inter-annual scales [J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143471.
- [69] 翁白莎,严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. 中国水利, 2010(7): 4-7. ( WENG Baisha, YAN Denghua. Reflections on integrated coping strategies for drought in China in changing environment [J]. China Water Resources, 2010(7): 4-7. (in Chinese))
- [70] BI Wuxia, LI Meng, WENG Baisha, et al. Drought-flood abrupt alteration events over China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 875: 162529.

( 收稿日期:2023 -05 -04 编辑:熊水斌)