

金菊良, 周亮广, 蒋尚明, 等. 基于链式传递结构的旱灾实际风险定量评估方法与应用模式[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 1-6. [JIN Juliang, ZHOU Lianguang, JIANG Shangming, et al. Quantitative Assessment Method and Its Application Modes of Drought Actual Risk Based on Chain Transfer Structure[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 1-6. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.001.]

## 基于链式传递结构的旱灾实际风险定量 评估方法与应用模式\*

金菊良<sup>1,2</sup>, 周亮广<sup>1,2</sup>, 蒋尚明<sup>3</sup>, 周 婷<sup>4</sup>, 崔 毅<sup>1,2</sup>, 白 夏<sup>1,2</sup>, 张宇亮<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088; 4. 安徽农业大学 工学院, 安徽 合肥 230036)

**摘 要:** 面向防灾减灾能力、孕灾环境孕险性实际条件下区域旱灾风险定量评估与区划等自然灾害风险防灾减灾关键问题, 应用计算思维、系统科学多学科交叉的研究途径, 从风险传导角度探讨了区域旱灾风险物理成因机制, 阐述了面向致灾机理的区域旱灾五要素系统结构、基于链式传导的旱灾风险六要素系统结构, 探讨了区域旱灾实际风险的概念、由旱灾脆弱性连接干旱与损失变量间关系的因旱致灾机理、连接干旱危险性关系与损失风险关系的旱灾风险传导机理、定量评估方法及其主要应用模式, 在自然灾害风险评估中具有推广应用前景。

**关键词:** 旱灾实际风险系统; 定量评估; 应用模式; 三元链式传递结构; 计算思维

**中图分类号:** X915.5; X43; S203 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0001-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.001

处于多学科交叉和巴斯德象限<sup>[1]</sup>的自然灾害风险评估研究是认识灾害风险系统的终点, 是防控灾害风险的起点, 是灾害风险认识论与实践论之间的桥梁<sup>[2-4]</sup>, 在灾害风险防控中具有重要意义。干旱灾害(简称旱灾)是由地球表层水圈中地表水、地下水、土壤水和大气水组成的研究区域天然水资源量持续明显低于长期平均水平的自然现象(称为干旱)对由人类圈、生物圈、岩土圈组成的区域承灾体产生不利影响<sup>[5-6]</sup>。换言之, 干旱灾害是地球表层五个圈层相互作用的结果, 非常复杂, 长期以来一直是自然灾害学物理成因分析和定量计算研究的难点和前沿领域<sup>[7-8]</sup>。干旱灾害风险是干旱灾害系统要素间特别是致灾因子与承灾体要素之间复杂作用下的重要功能特征, 基于历史旱灾损失样本系列的概率分布估计方法、基于指标体系的旱灾风险综合评估方法等灾害风险评估常用方法尚无法反映灾害要素间这些作用特征<sup>[3-6]</sup>。此外, 干旱、干旱灾害、干旱灾害系统、干旱灾害风险、干旱灾害风险过程、干旱灾害风险系统等复杂概念目前尚未在不同学科、不同行业中得到相对统一的认识<sup>[4,9]</sup>, 干旱指标、灾害风险传导函数、灾害损失风险曲线等灾害定量评估问题目前仍是研究难点<sup>[10-12]</sup>, 这无疑限制了旱灾风险评估研究的深入发展。为此, 本文以干旱灾害为例, 围绕基于旱灾系统和旱灾风险系统物理

成因(系统结构及其联系是什么)的旱灾风险定量评估如何实现的问题, 应用基于系统结构的物理成因分析与定量计算相结合的计算思维途径<sup>[13-15]</sup>, 在系统分析区域干旱灾害形成的物理过程、旱灾风险的形成过程及其关系的基础上, 从技术科学层次<sup>[14]</sup>和计算思维方法论<sup>[15]</sup>角度进一步探讨、归纳区域旱灾实际风险定量评估方法及其应用模式, 在自然灾害风险定量评估、区划等自然灾害风险防控理论和实践<sup>[16]</sup>中具有推广应用前景。

### 1 区域旱灾形成的物理过程

自然灾害形成是自然致灾因素与人文社会因素之间相互作用的复杂过程。从司托克斯的布尔象限(基础科学象限)角度<sup>[17]</sup>看, 迄今为止, 由自然因素和社会因素相作用形成的自然灾害系统的认识过程经历了由承灾体、致灾因子两要素灾害系统<sup>[18]</sup>, 经承灾体、孕灾环境、致灾因子三要素灾害系统<sup>[19-20]</sup>, 到承灾体、防灾减灾措施、孕灾环境、致灾因子四要素灾害系统的过程<sup>[3,7-9]</sup>。其中: 两要素灾害系统反映自然灾害系统中致灾因子自然因素和承灾体社会因素相作用的因灾致损单向作用机理, 揭示致灾因子和承灾体两者之间的作用关系。三要素灾害系统在两

\* 收稿日期: 2022-06-27

修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2240223; 52109009); 安徽省自然科学基金项目(2208085US03; 2008085ME158; 2108085QE254)

第一作者简介: 金菊良(1966-), 男, 汉族, 江苏吴江人, 博士, 教授, 主要从事结构水资研究。E-mail: JINJL66@126.com

通信作者: 蒋尚明(1983-), 男, 汉族, 广西桂林人, 高级工程师, 主要从事农业水资源系统工程研究。E-mail: jiangshangming@163.com

要素灾害系统的基础上进一步反映自然灾害系统中自然因素和社会因素长期平均值(统称为孕灾环境)的空间不均匀性对致灾因子、承灾体的影响,反映自然灾害因灾致损作用机理在空间分布方面的不均匀性作用机理,揭示上述系统三要素之间的作用关系。四要素灾害系统在三要素灾害系统的基础上进一步反映自然灾害系统中人为积极活动对致灾因子、承灾体和孕灾环境因素的改善作用(统称为防灾减灾措施),综合反映自然灾害系统中致灾因子、承灾体、孕灾环境和防灾减灾措施各自然因素和社会因素相作用的因灾致损作用机理、防灾减灾作用机理的反馈机理,揭示自然致灾现象与人文社会现象之间相互作用的复杂闭环过程特征。

四要素灾害系统是目前对自然灾害系统认识相对完善的观点。干旱是连接地球表层五大圈层的水循环过程中研究区域天然水资源量与其长期平均水平相比发生明显水分亏缺、或持续少于某个临界值的自然现象。作为自然现象的干旱主要发生在地球表层的大气圈(气象干旱)、水圈(水文干旱)或生物圈和岩土圈(农业干旱)<sup>[19-21]</sup>中。从灾害系统四要素结构角度看<sup>[3, 13]</sup>:区域干旱作为干旱灾害过程的前端输入也称干旱致灾因子,是研究区域上空、地面、土壤、地下水水体水循环过程中天然水资源量明显低于长期平均值而发生水分亏缺的自然现象,干旱事件的特征变量通常采用干旱强度(这些天然水资源量距其长期平均值的累积缺水量)、历时(持续缺水时间)、面积(缺水影响的生态环境和经济社会空间范围)等来描述<sup>[22-23]</sup>;干旱承灾体作为干旱灾害过程的末端输出是指研究区域受干旱事件影响的各种经济社会(人类圈)、生态环境(生物圈、岩土圈)要素;防灾减灾措施是指降低干旱事件可能产生不利影响的各种人类活动,例如各种非工程、工程措施;长期影响防灾减灾措施、承灾体、致灾因子和灾害损失的各种社会要素集和自然要素集统称为孕灾环境,孕灾环境是由影响干旱致灾因子、承灾体和防灾减灾措施的水库、灌区、塘坝、机井等社会因素,以及岩土、水文、生物、大气等自然因素的长期平均值组成的子系统<sup>[24]</sup>。由上述四类要素相作用导致旱灾损失(也称灾情<sup>[11]</sup>)所形成的旱灾系统<sup>[5, 25]</sup>也称旱灾系统的结构体系<sup>[22, 24]</sup>,涉及地球表层五大圈层。研究旱灾系统的目的就是减轻或规避旱灾损失,许多旱灾系统的分析研究对象就是旱灾损失<sup>[26]</sup>,基于灾害损失的自然灾害风险评估方法目前也是与基于风险成因机制、指标体系综合评估法相并列的三种重要评估方法之一<sup>[4, 7, 10, 16]</sup>。因此完整的旱灾系统无疑是由旱灾损失、致灾因子、承灾体、孕灾环境和防灾减灾措施五要素组成的,其中旱灾损失是旱灾系统的核心要素、反映旱灾系统的关系结构特征而不反映旱灾系统的客观组成结构特征,后四要素反映旱灾系统的客观组成结构<sup>[4, 25-27]</sup>。可见五要素旱灾系统是具有客观组成结构特征的要素与具有关系结构特征的要素发生关系作用形成的复杂系统。如果旱灾系统中忽略旱灾损失要素,旱灾系统研究就会失去研究意义。实际上,旱灾损失是旱灾风险系统的研究目标,是旱灾脆弱性关系(曲线)和旱灾损失风险关系(曲线)中的重要变量,是连接旱灾系统与旱灾风险系统的关键要素。其中,致灾因子是旱灾形成过程中的作用主体,承灾体是

作用客体,这种主客体作用关系一般是用承灾体特征因素随致灾因子特征因素变化而变化的旱灾脆弱性关系来表征,旱灾脆弱性关系反映旱灾系统的主要结构特征、揭示因灾致损的内在机理,孕灾环境因素、防灾减灾措施是作为参数来调整致灾因子特征因素、承灾体特征因素和旱灾脆弱性关系的,有的孕灾环境因素也会随防灾减灾措施而发生变化。总之,干旱是自然因素引起的物理过程,旱灾的形成是自然、社会因素综合作用所发生的复杂过程。五要素旱灾系统是典型复杂系统,其复杂性主要体现在如下三层关系作用:第一层关系是旱灾脆弱性关系;第二层关系是孕灾环境孕险性对旱灾脆弱性关系的调整作用,孕险性反映影响旱灾风险的社会、自然两类环境因素时空分布的长期平均稳定性条件<sup>[5-6, 25]</sup>;第三层关系是防灾减灾措施对第二层关系的调整作用,这种调整作用称为防灾减灾能力,也称抗旱能力<sup>[5-6, 25]</sup>。显然,五要素旱灾系统具有可观测、可识别、可评估、可防范等随时空尺度变化而变化的丰富特性。

## 2 区域旱灾风险的形成过程

区域旱灾风险与区域旱灾具有密切联系。风险的本义系指如风等不确定性事件(简称不利事件)对作用客体可能产生的不利影响,旱灾风险一般用特定条件下承灾体因旱损失随干旱发生可能性而变化的关系曲线(简称灾害风险损失曲线)表示<sup>[5-6, 12, 25]</sup>,其中干旱发生可能性(也称干旱频率、干旱重现期)为反映致灾因子作用主体的自变量,承灾体因旱损失为反映承灾体作用客体的因变量,特定条件一般是指研究区域孕灾环境背景和防灾减灾措施条件,这是因旱致灾的两大重要条件。正如区域旱灾的实质是灾害(例如灾情、不利影响)随干旱变化的关系即旱灾脆弱性关系,区域旱灾风险是灾害(例如损失)风险随不同干旱变化的关系。

从司托克斯的布尔象限角度<sup>[17]</sup>看,由旱灾到旱灾风险,经历了一个由灾害系统各要素作用关系形成的复杂信息传递过程。这些关系中最重要的是有三类关系:①干旱危险性关系(曲线),系指干旱致灾因子随机变量的概率分布函数。②旱灾脆弱性关系,包括干旱灾损敏感性和暴露性关系。其中干旱灾损敏感性关系系指非人为条件下干旱灾损之间的关系;暴露性关系指承灾体与致灾因子的时空重叠程度,反映承灾体受致灾因子时空影响的程度,是灾害损失信息由致灾因子传导到承灾体的必经环节,反映承灾体受致灾因子影响的发生路径、致灾因子影响承灾体的时空规模,暴露性与区域致灾因子时空分布特性、承灾体时空分布特性有关。③旱灾损失风险关系,系指干旱不确定性与旱灾损失之间的关系,显然其关系结构不同于随机变量分布曲线<sup>[13]</sup>,前者反映旱灾系统中承灾体、致灾因子不同子系统之间的作用关系。主要不同于旱灾损失本身不确定性这类单要素内部属性,旱灾损失的不确定性主要是由承灾体脆弱性对干旱致灾因子发生的不确定性进行传递、转换作用而形成的<sup>[6]</sup>。旱灾损失风险关系由干旱危险性关系转换而来的机理,正是反映干旱灾害因旱致损作用机理的旱灾脆弱性关系,这实际上是亚里士多德三段论中小前提关系把大前提关系转换为结论关系<sup>[28]</sup>的一种典型应用。文献

[6]中称由旱灾风险形成过程中危险性-脆弱性-损失风险三元关系串联而成链式传递系统, 损失风险、脆弱性、危险性分别为该传递系统的输出、转换和输入。上述旱灾风险链式传递过程是发生在旱灾风险系统内部、是由干旱致灾因子发生的不确定性传递到旱灾损失发生的不确定性, 这明显不同于发生在灾害之间的灾害链传递过程。显然, 串联中的危险性、脆弱性关系强度只要削弱其一, 损失风险关系程度就会削弱、风险等级就会降低。

在研究区域特定的防灾减灾能力、孕灾环境孕险性条件(简称旱灾风险曲线参数条件)作用下, 干旱危险性关系成为干旱实际危险性关系(曲线), 旱灾脆弱性关系成为旱灾实际脆弱性关系(曲线), 旱灾实际脆弱性关系作用于干旱实际危险性关系、形成区域旱灾实际损失风险曲线, 简称区域旱灾实际风险, 反映了真实风险。换言之, 区域旱灾实际风险是在特定研究区域防灾减灾能力<sup>[31]</sup>、孕灾环境孕险性<sup>[29-30]</sup>条件作用下旱灾实际脆弱性关系对干旱实际危险性关系进行合成作用形成的, 可见灾害实际风险包含灾害剩余风险这类风险典型<sup>[16, 32]</sup>。从系统角度看, 研究区域在特定孕灾环境孕险性 $A$ 、防灾减灾能力(抗旱能力) $B$ 作用下承灾体暴露性 $E$ 、承灾体干旱灾损敏感性 $S$ 把干旱致灾因子危险性 $D$ 转换为旱灾损失风险 $R$ , 这六要素相联系、相作用下形成旱灾实际风险系统<sup>[6]</sup>。其中: 旱灾损失风险是旱灾实际风险系统的重要要素, 否则灾害保险会失去理论基础<sup>[7]</sup>; 旱灾脆弱性关系既是旱灾系统中干旱致灾因子对承灾体的作用机理, 反映旱灾系统中干旱缺水程度与旱灾损失程度之间的因旱致损确定性关系, 也是旱灾风险系统中把干旱危险性转换成旱灾损失风险的作用机理, 反映旱灾风险系统中干旱发生可能性与相应的旱灾损失程度之间的因旱致损不确定性关系, 也就是后者反映了在干旱致灾因子一系列不同情景作用下承灾体所可能产生的一系列不同损失情景, 干旱致灾因子在时间、空间、强度上发生的不确定性通过旱灾脆弱性关系, 传导到承灾体损失上的不确定性。换言之, 旱灾脆弱性关系在旱灾系统中连接的是干旱缺水程度与旱灾损失程度两实数变量之间的关系, 在旱灾风险系统中连接的是干旱发生可能性关系与相应的旱灾损失程度可能性关系之间的关系, 前者是两实数变量之间的关系, 后者是两关系之间的关系、故显得相对有些复杂。可见, 作为五要素旱灾系统的子系统, 旱灾实际风险系统实质上是旱灾系统中各要素具体关系作用形成的灾害风险信息传导系统(图1)<sup>[6]</sup>, 是旱灾系统功能特征的反映。在图1

中, 在防灾减灾能力 $B$ 作用下可降低孕灾环境孕险性 $A$ , 在特定防灾减灾能力 $B$ 和孕灾环境孕险性 $A$ 作用下研究区域干旱致灾因子 $H$ (例如干旱强度、干旱历时、干旱面积)及其干旱频率 $P$ 形成干旱实际危险性曲线 $D(P, H, A, B)$ , 在特定 $A$ 和 $B$ 作用下研究区域承灾体实际暴露性 $E(A, B)$ 与干旱实际灾损敏感性 $S(H, C, A, B)$ 作用形成旱灾实际脆弱性曲线 $V(H, C, A, B)$ , 其中 $C$ 为旱灾损失<sup>[6]</sup>; 干旱实际危险性曲线 $D(P, H, A, B)$ 与旱灾实际脆弱性曲线 $V(H, C, A, B)$ 进行合成作用, 形成作为剩余风险<sup>[16]</sup>概念的推广的旱灾实际损失风险曲线 $R(P, C, A, B)$ ; 干旱实际危险性曲线 $D(P, H, A, B)$ 、旱灾实际脆弱性曲线 $V(H, C, A, B)$ 、旱灾实际损失风险曲线 $R(P, C, A, B)$ 这三元关系曲线均是旱灾风险系统中的核心关系, 这三元关系组成旱灾风险系统的三元链式传递结构, 而防灾减灾能力、孕灾环境孕险性都是旱灾风险系统中的条件要素、都可对这三元关系进行再作用来影响旱灾实际损失风险大小。换言之, 在给定 $A$ 和 $B$ 作用下, 由中间的共同变量干旱致灾因子 $H$ 串联链接、合成实际危险性曲线 $P \sim H$ 和实际脆弱性曲线 $H \sim C$ 而得实际损失风险曲线 $P \sim C$ , 链式传递作用函数实际脆弱性曲线 $V(H, C, A, B)$ 将实际危险性曲线转换为实际损失风险曲线, 在防范旱灾风险过程中十分重要<sup>[6]</sup>。

相应于三层关系作用下的五要素旱灾系统, 图1的旱灾实际风险系统也具有三层关系作用的系统结构<sup>[13]</sup>: 由研究区域干旱危险性、旱灾脆弱性、旱灾损失风险三元关系串联作用形成的旱灾风险三元链式传递关系是旱灾实际风险系统第一层关系, 其中揭示干旱因灾致损作用机理的旱灾脆弱性关系是该链式传递关系中的转换环节, 反映干旱致灾因子危险性关系传递转换至旱灾损失风险关系的灾害风险信息传导机制, 这是旱灾系统中反映干旱因灾致损作用机理的旱灾脆弱性关系的直接应用, 故旱灾风险三元链式传递关系可作为灾害系统的功能体系<sup>[29]</sup>的一种具体刻画; 孕灾环境因素对干旱危险性关系和旱灾脆弱性关系的调整作用是旱灾实际风险系统第二层关系, 这种调整作用反映旱灾风险自然和社会影响因素时空分布的长期平均条件, 反映孕灾环境孕险机理作用下的旱灾风险三元链式传递关系; 防灾减灾措施对第二层关系的调整作用是旱灾实际风险系统第三层关系, 这种调整作用称为防灾减灾能力, 也称抗旱能力, 反映防灾减灾机理作用下的旱灾风险三元链式传递关系。

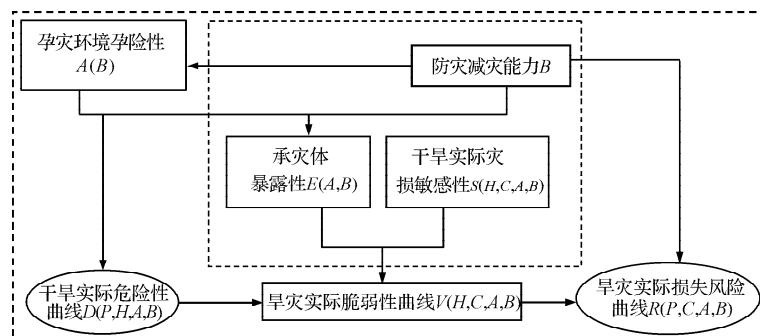


图1 旱灾损失风险三元链式传递形成机理示意图<sup>[6]</sup>

上述五要素旱灾系统、六要素旱灾风险系统分别反映了旱灾、旱灾风险的形成过程和系统结构,区域旱灾是灾害损失随干旱变化的关系,区域旱灾风险是灾害损失风险随干旱变化的关系,它们是灾害系统的结构体系、功能体系向物理成因解析和定量化分析相结合的计算思维方向的发展,有助于研究、建立旱灾实际风险定量评估方法及其应用模式。显然,灾害风险系统是灾害系统中的一类子系统。

### 3 区域旱灾实际风险的定量评估方法

从司托克斯的巴斯德象限(技术科学象限)角度<sup>[17]</sup>看,区域旱灾实际风险定量评估就是在旱灾实际风险物理成因解析的基础上,对旱灾实际风险系统要素间作用关系进行定量计算,也就是按照图1依次建立的实际危险性关系 $D(P, H, A, B)$ 和实际脆弱性关系 $V(H, C, A, B)$ 并进行链式关系合成作用,可得实际损失风险曲线 $R(P, C, A, B)$ ,构成基于链式传递结构的区域旱灾实际风险定量评估方法<sup>[12]</sup>。

(1)建立区域干旱实际危险性关系 $D(P, H, A, B)$ 。根据研究区域防灾减灾能力 $B$ 和孕灾环境孕险性 $A$ 作用下的实际总来水量来确定干旱指标变量,例如对安徽淮北市平原小麦承灾体,实际总来水量由作物有效降雨量、作物地下水利用量、灌溉水量构成,可采用时间序列分析中的游程方法识别实际总来水量历史样本序列中的干旱过程及其特征变量(即干旱致灾因子)干旱历时 $H_d$ 、干旱烈度 $H_s$ (表征发生干旱下的缺水严重程度)、干旱面积 $H_a$ 和干旱频率 $P$ <sup>[33]</sup>,这些干旱过程及其特征变量的干旱频率可用水文频率曲线适线法和Copula函数相结合进行计算,由此确定区域干旱实际危险性关系 $D(P, H, A, B)$ ,其中 $H$ 表示干旱致灾因子强度,例如干旱历时、干旱烈度<sup>[12]</sup>。

由于干旱烈度保证率的物理意义与来水频率接近,故区域来水频率可用干旱烈度保证率估计,因此由研究区域历史干旱过程的干旱频率、干旱烈度保证率、来水频率中的两两关系,可建立历次干旱过程的区域来水频率与干旱频率之间的关系<sup>[12]</sup>。综合表征区域防灾减灾能力的抗旱能力指数一般可用表示干旱期间可供水量(区域现状条件下各种水源可提供的总水量)与需水量(区域现状条件下各行业总用水量)之比表征<sup>[31, 34]</sup>,利用灾害普查和统计等资料可计算不同来水频率下抗旱能力指数值,根据(来水频率、抗旱能力指数)散点图的分布特征可拟合、建立“区域来水频率~抗旱能力指数”曲线,再与上述“区域干旱频率~来水频率”曲线结合、可得“区域干旱频率~抗旱能力指数”曲线<sup>[12, 34]</sup>。区域来水频率越大表示来水一般越枯、干旱频率越低,相应的抗旱能力指数越低。

(2)建立区域旱灾实际脆弱性关系 $V(H, C, A, B)$ 。由上述(1)获得区域历史干旱过程集,应用指数分布、正态分布、P-III型分布等计算各次干旱过程的各特征变量(干旱历时 $H_d$ 、干旱烈度 $H_s$ 、干旱面积 $H_a$ )边缘分布概率及应用Copula函数计算各次干旱过程的多变量联合频率(干旱频率)作为干旱致灾因子强度的定量表征,再应用作物生长模型计算各次历史干旱过程(对应各次历史干旱频率)在不同灌溉(抗旱能力)情景(例如灌溉100%、75%和50%需水量)下的旱灾损失率,

把各次历史干旱过程的旱灾损失率~干旱频率拟合关系曲线作为以灌溉条件为参数的区域旱灾实际脆弱性曲线<sup>[12, 34-37]</sup>,参见文献[12]中图2株洲市夏季水稻旱灾实际脆弱性关系曲线、文献[34]中图3陆良县农业实际脆弱性关系曲线、文献[35]中图8元谋县春季农业实际脆弱性关系曲线,这些曲线严格而言不是假定灌溉水平下的旱灾损失风险曲线。

(3)建立区域旱灾实际(损失)风险曲线 $R(P, C, A, B)$ 。采用自然灾害损失风险评估的风险物理成因模式<sup>[5, 12, 34-35, 38]</sup>,对于旱灾实际危险性曲线 $D(P, H, A, B)$ 和旱灾实际脆弱性曲线 $V(H, C, A, B)$ 作合成运算,即得区域旱灾实际损失风险曲线 $R(P, C, A, B)$ :

$$R(P, C, A, B) = D(P, H, A, B) @ V(H, C, A, B). \quad (1)$$

式中: $D(P, H, A, B)$ 与 $V(H, C, A, B)$ 通过中间的共同变量干旱致灾因子 $H$ 串联合成作用,得到区域旱灾实际损失风险曲线 $R(P, C, A, B)$ ;@为合成运算算子。例如在南方农业旱灾实际损失风险曲线计算过程中<sup>[12]</sup>:灌溉水平反映作物需水的满足程度,根据灌溉水平、抗旱能力指数含义的接近性,可用灌溉水平表征区域抗旱能力指数。故可把区域历次干旱过程的干旱频率通过“区域干旱频率~抗旱能力指数的关系曲线”得出历次干旱过程的抗旱能力指数,利用区域旱灾实际脆弱性关系曲线内插得历次干旱过程的旱灾损失率,于是建立了水稻旱灾实际损失风险曲线,参见文献[12]中图6实际损失风险曲线。利用湖南省抗旱规划和1990—2007年株洲市作物实际减产率调查资料进行频率分析,得出不同干旱频率对应的减产率实际调查值,与根据实际损失风险曲线得到的减产率理论计算值较为接近,说明所建区域旱灾实际损失风险曲线具有合理性、可靠性<sup>[12]</sup>。

显然式(1)区域旱灾实际风险曲线构建方法属于面向旱灾风险物理成因的演绎推理方法,用该评估方法可从不同孕灾环境孕险性水平和防灾减灾能力、不同干旱重现期、不同承灾体发展水平、研究区域不同时空尺度等角度,模拟、分析旱灾实际风险演变过程,适用于区域旱灾风险预报预警等动态风险防控<sup>[5-6, 12]</sup>。

### 4 区域旱灾实际风险定量评估的应用模式

基于三元链式传递的区域旱灾实际风险定量评估方法,也是当前自然灾害风险评估的主要发展方向<sup>[6, 10, 27]</sup>,其评估结果 $R(P, C, A, B)$ 是在给定 $A$ 和 $B$ 旱灾风险曲线参数条件下所有暴露承灾体因旱损失 $C$ 与反映区域干旱程度的干旱频率 $P$ 之间的定量关系、也即旱灾实际风险。区域不同 $B$ 或不同 $A$ 条件下,形成不同的损失风险曲线 $C-P$ ,这类曲线简称 $R$ 曲线,每条 $R$ 曲线代表研究区域相应的孕灾环境孕险性水平或防灾减灾能力(灌溉)水平<sup>[6, 12]</sup>。例如,根据安徽省淮北市平原、长江流域小麦、玉米、水稻主要农作物等的受旱试验研究, $R$ 曲线可用于干旱过程发生的粮食因旱减产率 $C$ 与干旱频率 $P$ 之间的半对数函数关系表示<sup>[12, 16, 34]</sup>:

$$C = -a \ln P + b. \quad (2)$$

式中: $0 \leq P \leq 1$ ;  $0 \leq C \leq 100$ ;  $a, b$ 为模型参数,

$a > 0, b \geq 0$ 。

从司托克斯的爱迪生象限(工程技术象限)角度<sup>[17]</sup>看,通过旱灾实际风险定量评估得到的 $R$ 曲线即 $R(P, C, A, B)$ 曲线,是区域旱灾实际风险定量评估的主要应用模式(application schema),可反映区域旱灾实际风险系统各要素时空分布的主要特征,直观反映这些特征的图谱形式称为旱灾风险图<sup>[5, 16]</sup>。这些图反映区域旱灾实际风险系统的不同风险特征、服务于旱灾风险防控的不同需求,统称为旱灾风险图谱,风险图谱全面地反映了区域旱灾实际风险的主要特征。

旱灾风险图是表征旱灾风险评估结果、旱灾风险自然或社会要素空间分布特征的各种图件,是自然灾害普查、风险防控的重要基础性工作,也是防灾减灾管理中的重要非工程措施。旱灾风险图的主要应用有:①可辅助制定区域抗旱规划、防旱工程设计标准、经济社会发展规划;②可为区域抗旱预案、预警、应急调度管理、恢复重建提供简便直观的应用技术;③可为受灾区域测算旱灾保险费率、合理分摊旱灾风险提供参考依据;④可用以快速评估旱灾损失。目前旱灾风险图主要有如下5类<sup>[5, 16]</sup>:

(1) $R$ 区域实际风险曲线图,它包含了研究区域旱灾实际损失风险曲线的全部信息。在旱灾实际风险防控中 $R$ 图的主要应用有:①可准确及时预估研究区域旱灾实际风险动态过程,为旱灾风险预警、防范提供重要基础;②可评估研究区域在不同孕灾环境孕险性水平或不同防灾减灾能力条件下同一频率干旱发生所可能产生的旱灾损失值,为比较水源工程、灌溉工程、抗旱应急备用水源工程等不同抗旱方案提供决策分析依据;③可为及时、准确绘制研究区域在特定孕灾环境孕险性水平和防灾减灾能力条件下的重现期空间分布图、损失空间分布图、旱灾风险区划图提供主要信息。

(2) $P$ 区域重现期(干旱频率)空间分布图,它反映研究区域旱灾实际风险情景下,相应于某给定旱灾损失值水平的干旱重现期空间分布图。在旱灾实际风险防控中 $P$ 图的主要应用有:①可绘制在特定孕灾环境孕险性水平和不同防灾减灾能力(灌溉水平,例如灌溉100%、75%、50%和0%需水量)条件下,干旱重现期相应于70%、50%、20%、10%、5%等特定旱灾损失率的空间分布图,为空间规划、防灾减灾物资分配方案提供重要信息;②可绘制研究区域历史干旱的最大重现期空间分布图,揭示某研究历史时期内极端干旱的发生机理,研判历史最严重干旱的空间分布特征,为制定极端干旱备灾战略和抗旱规划提供重要参照。

(3) $C$ 区域损失空间分布图,是指研究区域旱灾损失率空间分布图,它反映研究区域在特定孕灾环境孕险性水平和不同防灾减灾能力(灌溉水平,例如灌溉100%、75%、50%和0%需水量)条件下,旱灾损失率相应于不同干旱重现期(如100年、50年、20年、10年、5年一遇)的空间分布图。在旱灾实际风险防控中 $C$ 图的主要应用有:①可确定研究区域中对应于设防重现期的高中低旱灾损失率的空间分布区域,为旱灾风险防治提供决策依据;②可绘制研究区域历史最大损失率的空间分布图,揭示某研究历史时期内极端干旱损失的发生机理,研判历史最严重灾情的空间分布特征,辅助制订重大旱灾应对策略。③可用于

灾前、灾中、灾后旱灾实际风险的定量评估。

(4)区域旱灾风险区划图,是根据区域旱灾实际风险在空间上的分布特征,确定研究区域旱灾实际风险等级长期平均评估值及其在研究区域中的区域划分,揭示旱灾实际风险等级长期平均评估值在研究区域中的空间分布格局<sup>[39-40]</sup>。风险区划图可视化表达研究区域旱灾实际风险等级长期平均评估值的空间分布情况,一般以流域、格网或行政区为区划空间单元,可为旱灾风险防治与区划提供重要的科学依据。

(5) $X$ 区域旱灾风险变量空间分布图,是指与区域旱灾实际风险有关的,除上述 $R$ 、 $P$ 、 $C$ 图、风险区划图以外的旱灾风险变量空间分布图,例如支撑旱灾实际风险防控、针对风险各种专题的研究区域致灾因子危险性、承灾体暴露性、承灾体干旱灾损敏感性、承灾体脆弱性、孕灾环境孕险性、防灾减灾能力、最长干旱历时等分布图<sup>[16]</sup>。

## 5 结论

(1)应用计算思维、结构水资源学和自然灾害学多学科交叉的研究途径,剖析了形成区域旱灾和旱灾风险的物理成因过程,阐述了基于五要素作用关系的旱灾系统、基于六要素作用关系的旱灾风险系统,揭示了旱灾风险链式传导机制,反映了旱灾脆弱性关系既反映旱灾系统因灾致损的内在机理,也反映旱灾风险系统的“危险性-脆弱性-损失风险”链式传递机理。

(2)从技术科学层次和计算思维方法论角度,分析、归纳了区域旱灾实际风险三元链式传递定量评估方法,包括区域干旱实际危险性曲线、实际脆弱性曲线、实际损失风险曲线构建,以及由灾害风险区划图、 $R$ 图、 $P$ 图、 $C$ 图、 $X$ 风险变量空间分布图构成的灾害风险评估主要应用模式,可为横贯基础科学、技术科学、工程技术层次的自然灾害风险定量评估与区划复杂性研究提供应用参考。

## 参考文献:

- [1] 武天欣. 企业科研模式研究:从“爱迪生象限”到“巴斯德象限”[D]. 南京:南京大学, 2020.
- [2] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 基于知识图谱的自然灾害风险防控研究进展的文献计量分析[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 145-152.
- [3] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2007.
- [4] 杨帅英, 郝芳华, 宁大同. 干旱灾害风险评估的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(2): 79-82.
- [5] 金菊良, 郦建强, 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.
- [6] 金菊良, 马强, 崔毅, 等. 基于三元链式传递结构的区域旱灾实际风险综合防范机制分析[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 6-12.
- [7] 赵好, 赵元凤. 农业大灾风险的科学管理:基于文献研究的风险评估原理、方法与研究展望[J]. 农村金融研究, 2021(7): 26-34.
- [8] HAN L Y, ZHANG Q, MA P L, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3-4): 517-528.
- [9] 李娜, 霍治国, 钱锦霞, 等. 山西省干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(5): 100-107.
- [10] 周姝天, 翟国方, 施益军, 等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 180-186.
- [11] 魏一鸣, 范英, 金菊良. 洪水灾害风险分析的系统理论[J].



- 管理科学学报, 2001, 4(2): 7-11, 44.
- [12] 孙可可, 陈进, 金菊良, 等. 实际抗旱能力下的南方农业旱灾损失风险曲线计算方法[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 809-814.
- [13] 金菊良, 周成星, 崔毅, 等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19.
- [14] 钱学森. 论技术科学[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 511-519.
- [15] WING J M. Computational thinking[J]. Communications of the ACM, 2006, 49(3): 33-35.
- [16] 李原园, 梅锦山, 郦建强. 干旱灾害风险评估与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [17] D E 司托克斯. 基础科学与技术: 巴斯德象限[M]. 周春彦, 谷春立译. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives[R]. Geneva: UNISDR, 2004.
- [19] 周成虎. 洪水灾害系统分析[J]. 中国减灾, 1992, 2(3): 19-21.
- [20] 史培军. 环境风险管理及其应用[J]. 管理世界, 1993(4): 12-15.
- [21] American Meteorological Society. Statement on meteorological drought[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 2004, 85: 771-773.
- [22] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9.
- [23] 秦越, 徐翔宇, 许凯, 等. 农业干旱灾害风险模糊评价体系及其应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 83-91.
- [24] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [25] 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.
- [26] 金菊良, 杨齐祺, 周玉良, 等. 干旱分析技术的研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 1-15.
- [27] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [28] 吴宝祥. 亚里士多德的三段论及其扩展[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- [29] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.
- [30] 袁敬强, 陈卫忠, 黄世武, 等. 全强风化花岗岩隧道突水灾害机制与协同治理技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4164-4171.
- [31] 金菊良, 费振宇, 郦建强, 等. 基于不同来水频率水量供需平衡分析的区域抗旱能力评价方法[J]. 水利学报, 2013, 50(5): 534-541.
- [32] 杨海维, 李克军. 基于风险矩阵模型和剩余风险评估理论的基层人民银行风险评估研究[J]. 金融经济, 2017(22): 125-126.
- [33] 张宇亮, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于区域农业用水量的干旱重现期计算方法[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 691-701.
- [34] 常文娟, 郦建强, 梁忠民, 等. 云南南盘江上游旱灾风险定量评估研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 25-29.
- [35] 孙可可, 陈进, 许继军, 等. 基于 EPIC 模型的云南元谋水稻春季旱灾风险评估方法[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1326-1332.
- [36] CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Quantitative assessment of soybean drought loss sensitivity at different growth stages based on S-shaped damage curve[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 821-832.
- [37] WEI Y Q, JIN J L, JIANG S M, et al. Simulated assessment of summer maize drought loss sensitivity in Huaibei plain, China[J]. Agronomy, 2019, 9(2): 78.
- [38] WEI Y Q, JIN J L, CUI Y, et al. Quantitative assessment of soybean drought risk in Bengbu City based on disaster loss risk curve and DSSAT[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 56: 102126.
- [39] 刘航, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于 GIS 的区域干旱灾害风险区划研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 198-203.
- [40] 刘小艳. 陕西省干旱灾害风险评估及区划[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.

## Quantitative Assessment Method and Its Application Modes of Drought Actual Risk Based on Chain Transfer Structure

JIN Juliang<sup>1, 2</sup>, ZHOU Liangguang<sup>1, 2</sup>, JIANG Shangming<sup>3</sup>, ZHOU Ting<sup>4</sup>, CUI Yi<sup>1, 2</sup>,  
BAI Xia<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yuliang<sup>1, 2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China; 4. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Facing the problems of natural disaster risk prevention and mitigation such as regional drought risk quantitative assessment and zoning under the actual conditions of the disaster environment and disaster prevention and reduction capability, we discuss the physical process of regional drought risk transmission, expound the structure of the five element system of regional drought oriented to the disaster causing mechanism and the six element system of drought risk based on chain transmission, and probe into the concept, quantitative evaluation method and main application modes of the actual risk of regional drought expounds the five element structure of drought system and the three element chain transmission structure of regional drought risk based on the six element drought risk system, and discuss the concept, the drought-induced disaster mechanism connecting the relationship between drought and loss variables, and the drought risk transmission mechanism connecting the relationships between hazard and loss risk by drought vulnerability, quantitative evaluation method and main application modes of regional drought risk with the prospect of popularization and application by using the interdisciplinary research approach of computational thinking and system science.

**Keywords:** actual risk system of drought; quantitative assessment; application mode; chain transmission structure of ternary relation; computational thinking