

流域水资源安全风险评价问题的系统分析

金菊良^{1,2}, 常哲¹, 周亮广¹, 陈梦璐¹, 吴成国^{1,2}, 崔毅^{1,2}

(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)

摘要:从流域水资源安全风险传导过程角度,系统分析了水资源安全系统、水资源安全风险系统、水资源安全风险评价等基本概念,提出了水资源安全风险评价的概念体系。水资源安全风险系统具有亚里士多德三段论关系结构特征,涵盖水资源安全致险因子的危险性、承险体的脆弱性、孕险环境的孕险性、抗险措施的抗险性和水资源安全损失风险五要素关系,揭示了在流域特定孕险性和抗险性条件下,由致险因子危险性作为系统输入,经承险体脆弱性作为系统转换,到承险体水资源安全损失风险作为系统输出的水资源安全风险要素关系传导机理,阐述了由水资源安全风险评价对象集、评价指标、评价指标测度方法、定性指标定量化方法、单指标评价方法、指标权重确定方法、综合评价指标确定方法组成的水资源安全风险评价方法论。由水资源安全风险评价的概念体系、风险传导机理及风险评价方法论共同构成的理论框架,形成了水资源安全风险评价的初步理论基础,该理论框架在其他资源环境系统的风险评价中也具有应用价值。

关键词:水资源安全风险评价;风险传导;水资源安全风险系统;风险要素关系传导机理

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)05-0112-07

System analysis of water resources security risk assessment in river basins//JIN Juliang^{1,2}, CHANG Zhe¹, ZHOU Lianguang¹, CHEN Menglu¹, WU Chengguo^{1,2}, CUI Yi^{1,2}(1. College 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)

Abstract:From the perspective of risk transmission process of basin water resources security, this paper systematically analyzes fundamental concepts, including the water resources security system, water resources security risk system, and water resources security risk assessment. The conceptual framework for water resources security risk assessment is proposed, which is characterized by an Aristotelian syllogistic relational structure and encompasses five elements: the hazard of risk-inducing factors, the vulnerability of risk-bearing bodies, the risk-inducing potential of hazardous environment, the risk-resistance capacity of mitigation measures, and the water resources security loss risk. This paper reveals the transmission mechanism of water resources security risk elements, where under specific risk-incubating and risk-resisting conditions in a watershed, the hazard of risk-inducing factors serves as the system input, the vulnerability of risk-bearing bodies as the system transition, and the water resources security loss risk as the system output. This paper elaborates on methodology for water resources security risk assessment, consisting of water resources security risk assessment objects, evaluation indicators, evaluation indicator measurement methods, methods for quantifying qualitative indicators, single-indicator evaluation methods, methods for determining indicator weights, and methods for determining comprehensive evaluation indicators. The theoretical framework composed of the conceptual system, risk transmission mechanism, and risk assessment methodology forms a preliminary theoretical foundation for water resources security risk assessment. This theoretical framework also holds significant application value for risk assessment in other resources and environmental systems.

Key words: water resources security risk assessment; risk transmission; water resources security risk system; transmission mechanism of risk element relationships

对赖以生存和发展的自然资源、社会环境和生 产生活条件等基本要素的安全需求是人类满足生存

需求后的第一需要^[1-2]。水资源安全问题是研究流域(或一定区域)内给定水体水量、水质及其时空分布与人类经济社会发展的正常用水需求和生态环境健康保护正常用水需求之间不适应时所产生的现象,也称水安全问题,主要包括水资源、水生态、水环境、水灾害四类水资源安全问题^[3-5]。简言之,水资源安全就是区域供水体与用水体之间供需平衡关系的状态,当供水体不能满足用水体正常需求时就会发生水资源安全破坏事件^[6-8]。水资源安全破坏事件发生的可能性及对用水体产生的不利影响形成了水资源安全风险,估算这些可能性、不利影响及其关系的水资源安全风险评价是实现水利高质量发展的基本要求^[7-8]。水资源安全风险评价研究是连接水资源安全风险系统认识论和实践论的关键技术^[9-11]。

目前,水资源安全风险评价研究尚处于起步阶段,其理论研究比较薄弱、分散,主要反映在水资源安全风险概念比较模糊、学术界尚未统一;水资源安全风险传导路径复杂、尚未明晰,风险形成机理有待揭示;现有的风险评价方法较为零散,如采用基于改进的层次分析法和加速遗传算法的组合加权方法开展水资源风险评价^[12],基于粒子群优化投影追踪模型开展水资源安全评价^[13],基于城市雨水资源利用全过程开展风险识别后采用主成分分析法筛选指标体系,进而进行城市雨水资源利用风险评价^[14],基于驱动力-压力-状态-影响-响应模型开展水资源安全评价^[15]等,尚缺乏适用性强的方法^[8,16]。为此,本文基于水资源安全风险的形成过程,参照水旱灾害风险评价的现有理论研究成果^[11],从方法论角度分析水资源安全风险评价的基本概念、形成机制、评价方法,为构建水资源安全风险评价理论提供基础,为水资源安全风险防御理论和实践研究提供理论依据。

1 水资源安全风险评价概念分析

1.1 水资源安全系统

安全一般指人或物没有危险、没有损害的状态,包括人类生产、生活和生存等方面的安全,多用于国家安全、地区安全、环境安全等场景^[17]。水资源一般指有足够的数量和合适的质量,可供人类利用且能不断更新的天然淡水^[4,7,9],是保障实现包括经济社会安全、生态环境安全要素于一体的国家安全体系的基础性自然资源^[18]。流域水资源安全(也称水安全)系指流域水资源、洪水和水环境等水资源供水体满足经济社会、生态环境等水资源用水体正常发展需要的状态^[5,19],它是流域水资源安全致险因

素与承险因素之间相互作用的动态平衡结果。在流域特定的水资源禀赋条件和水资源管理措施条件下由这些水资源供水体、用水体组成的系统称为流域水资源安全系统。流域水资源安全系统的功能就是保障供水体满足各种用水体的正常需要,主要包括流域水资源的量质供给、生态支持、环境调节和灾害适应四大功能^[19-20]。按系统功能的不同内容,水资源安全系统可分为以下4个子系统:水资源供给安全是指在流域不同时空条件(包括来水和用水情况)下,水资源在水量上能够满足经济社会发展和生态环境健康的供需平衡需求,且不产生水资源短缺风险的状态^[21];水生态安全是指水资源既能满足人类生活的需要,又能支持自然生态得以妥善保护、不因缺水而受到侵害的一种状态^[22];水环境安全是指流域拥有一定水量和水质的水体从而可以保障和调节水中生物的有效生存并使水环境保持健康的一种状态^[8,18];水灾害安全是指在洪涝、干旱、暴雨等涉水灾害冲击下流域经济社会和生态环境能够正常有序发展、受冲击影响较小甚至免受损失的状态^[11,19,23]。

流域水资源安全系统受气候、下垫面、人类活动等诸多因素的影响,呈现显著的时空演变不确定性,系统功能受到破坏不能满足用水体的正常需求时,就会产生水资源短缺、水生态失衡、水环境破坏和水灾害频发等水资源安全问题,这些事件统称水资源安全破坏事件^[19,23-24]。显然,水灾害安全系统是水资源安全系统中的一个子系统,参考水灾害安全系统的组成结构特点^[10-11],可对水资源安全系统功能的破坏事件即水资源安全破坏事件进行可能性和不利后果的定量风险评价。从安全系统论和自然灾害风险系统的角度出发,笔者结合已有的水资源安全风险研究经验认为水资源安全系统是由水资源安全致险因子、承险体、孕险环境、抗险措施和水资源安全损失五要素构成的典型复杂系统^[10-11],流域水资源安全状态是在特定的孕险环境、抗险措施条件下流域水资源安全致险因子与承险体相互作用、相互平衡的结果。这五要素在水资源安全问题的形成过程中相互作用,缺一不可。

a. 水资源安全致险因子(也称风险源,例如水量短缺、水体污染、水生态破坏、水旱灾害爆发等)^[8,24]是指水资源安全系统特定功能失效的影响因素,失效功能的类型和失效的程度直接影响水资源安全破坏事件的发生概率及损失程度。水资源安全致险因子包括自然致险因子和人为致险因子。从水资源安全系统四大功能角度看,当水资源安全系统的供给功能不能满足需求而出现一定程度的供水

短缺即出现水资源供给安全问题时,其致险因子与水资源水量水质时空分布、水资源利用程度密切相关;对于依赖水资源安全系统支持和调节的水生态和水环境安全问题,其致险因子从现象层次看出现在主体即水资源系统的水量和水质中,但究其根本则是与人类经济社会侵占生态用水和突发性的水污染事故破坏自然水体密切相关;对于水灾害安全问题,人类社会发展初期对自然开发程度和对自然灾害的防御措施有限,此时致险因子与自然属性因素如暴雨、干旱等极端气候条件更为相关,随着人类社会的发展和灾害防御能力的提高,人类活动对自然环境的破坏行为对引发水灾害和扩大其损失程度的影响正在逐渐凸显。

b. 水资源安全承险体^[24-25]是指由水资源安全系统中经济社会和生态环境这类用水体要素组成的集合,水资源安全和水灾害安全的风险事件的承险体主要是人类经济社会,而水生态和水环境安全风险事件对生态系统产生的不利影响最终也会传导到经济社会中。从水资源安全系统的作用机理来看,只有当系统特定功能失效达到一定程度并作用于相应的承险体时,才会引发承险体的一系列安全损失,安全损失的程度与致险因子的强度以及承险体的易损性和暴露性密切相关。

c. 水资源安全孕险环境是指孕育水资源安全功能破坏事件发生的系统外界环境,以及水资源安全破坏事件产生的背景条件(例如流域水资源禀赋)^[10,24-25]。我国南北方、东西部,以及汛期和非汛期等不同时空条件下流域水资源安全的孕险环境有显著差异,不同的孕险环境也有可能孕育不同类型水资源安全破坏事件的发生,对流域水资源安全状况的影响程度差异明显。不同流域的水资源安全孕险环境一般不同。

d. 水资源安全抗险措施是指防御流域水资源安全破坏的各种措施。应对不同类型的水资源安全问题需要采取不同的针对性防御抗险措施,包括工程措施和非工程措施^[25]。流域水资源安全系统承险体的脆弱性是承险体易损性、暴露性、韧性和抗险能力的综合体现,其中韧性侧重于承险体吸收扰动并在干扰后有效恢复其结构和功能的能力。

e. 水资源安全损失^[8,11]是指在流域特定的孕险环境和抗险措施条件下水资源安全致险因子对经济社会、生态环境承险体造成的损失。

1.2 水资源安全风险系统

流域水资源安全风险是水资源安全致险因子、承险体、孕险环境、抗险措施等诸多要素变化引起的承险体安全损失的可能状态,反映了流域水资源安

全系统各要素间相互作用所形成的水资源安全风险信息传导过程。目前,不同行业不同学科领域中的风险概念一般都有不确定性和损失两大特征^[11,25-26],风险就是未来可能发生的不利事件导致的可能损失,其中不利事件发生的可能性反映了风险的不确定性特征^[11,27]。类似水灾害风险的概念^[10-11],各种不确定性对系统安全的不利影响(例如损失)称为安全风险^[2,17]。例如,流域水资源安全风险就是指流域水资源安全致险因子事件发生的可能性及其导致损失之间的关系,这种关系是由影响水资源安全系统功能正常发挥的致险因子未来发生强度及其可能性关系,与致险因子对承险体造成不利影响(安全损失)时的承载体脆弱性关系,经合成作用形成的。根据对水资源安全系统功能的不同影响,水资源安全风险可分为水资源供给安全风险、水生态安全风险、水环境安全风险和水灾害风险。

参考水灾害风险系统的概念和评价思路^[10-11]以及结构水资源学的研究思路^[28],水资源安全风险系统是由水资源安全致险因子的危险性、承险体的脆弱性、孕险环境的孕险性、抗险措施的抗险性和水资源安全损失风险这五要素相互作用组成的复杂系统,其中:①致险因子的危险性是暴雨、干旱、水污染事件等致险因子发生的强度及其可能性的分布函数,危险性反映致险因子对承险体的威胁程度。水资源安全风险系统的不同功能对应不同的致险因子,这些致险因子的危险性也存在差异。例如在水灾害风险中,若将干旱作为致险因子,其危险性包括干旱缺水程度、干旱影响范围及干旱事件发生的可能性。②承险体的脆弱性由承险体面对致险因子发生时的易损性^[10-11]和反映流域致险因子与承险体在时空维度上遭遇程度的暴露性共同构成,反映致险因子发生强度与安全损失程度之间的关系。其中,承险体的易损性由敏感性转化而来,而敏感性反映了自然条件下承险体受水资源安全破坏事件不利影响的敏感程度,在致险因子危险性和孕险环境孕险性的作用下,承险体的敏感性将转化为易损性。③孕险环境的孕险性是孕育水资源安全风险的自然与人文环境所具有的长期特征,例如流域的气候特征、下垫面地形地貌特征、物质文化环境特征。不同流域的孕险环境孕险性一般不同,对孕险环境孕险性的研究强调流域水资源安全风险区划规则的探讨,旨在从环境的长期演变趋势分析中找到孕险环境孕险性对水资源安全损失风险的时空分布影响,主要需考虑孕险性对危险性和脆弱性的影响^[10]。④抗险措施的抗险性是指采用抗险措施防御、降低水资源安全风险的水平,主要探讨其对危险性、脆弱

性和损失风险的影响^[10],例如研究水库、水网等流域水资源调配能力。⑤水资源安全损失风险包括因水资源安全不利事件发生导致承险体产生相关损失的可能性。上述风险系统五要素中:危险性是致险因子发生强度与致险因子发生可能性之间的关系,脆弱性是致险因子发生强度与安全损失程度之间的关系,损失风险是致险因子发生可能性与承险体损失之间的关系,致险因子发生可能性、致险因子发生强度、承险体损失分别对应亚里士多德三段论中的小项、中项和大项,危险性、脆弱性和损失风险分别对应三段论中的小前提关系、大前提关系和结论关系^[9];孕险性和抗险性均对危险性和脆弱性产生影响,从而间接影响损失风险。可见上述五要素都以关系形式而不是实数变量形式对水资源安全风险发生作用,水资源安全风险系统具有三段论关系结构特征^[28]。这说明水资源安全风险系统与水灾害风险系统一样,具有复杂的风险传导特征^[10-11]。

1.3 水资源安全风险评价

水资源安全风险评价是水资源安全管理与决策的核心环节,旨在系统识别、分析和量化流域水资源安全系统所面临的潜在威胁及其可能造成的负面后果,从而对风险的高低程度进行综合评判,为风险防范、调控与适应策略的制定提供科学依据。

水资源安全风险评价是根据评价目标对流域水资源安全风险的高低程度进行综合评判,风险评价的一般过程是将水资源安全致险因子的危险性关系经承险体的脆弱性关系作用,转换为水资源安全损失风险的判断过程,也可以是对水资源安全风险系统五要素子系统进行综合评价的过程^[11]。

2 水资源安全风险评价机理分析

2.1 水资源安全风险传导的系统结构

类似于旱灾风险系统^[11],从水资源安全风险的形成过程看,在水资源安全系统各要素间相互作用形成的安全风险传导过程中存在三类作用关系:一是水资源安全致险因子的危险性关系,可通过在流域特定孕险性和抗险性作用下的致险因子发生概率分布函数来表达。二是水资源安全承险体脆弱性关系,包括在流域特定孕险性和抗险性作用条件下承险体敏感性和暴露性关系。其中敏感性关系是指不考虑流域特定孕险性和抗险性作用条件下致险因子变化与承险体损失变化之间的关系。暴露性是指受致险因子时空影响的承险体规模特性,暴露性反映了承险体受致险因子影响的发生路径和时空规模,暴露性与流域致险因子和承险体的时空分布特性及其遭遇程度有关。三是水资源安全承险体安全损失

风险关系,系指致险因子不确定性与承险体安全损失之间的关系。可见,水资源安全风险系统是由水资源安全系统各要素间相互作用形成的安全风险传导复杂系统,包括系统输入(致险因子危险性)、系统转换(承险体脆弱性)和系统输出(水资源安全损失风险)。可见,水资源安全风险系统将危险性、脆弱性、损失风险要素,与孕险性、抗险性要素关联整合为一个有机整体。参考自然灾害风险系统结构特点^[10,27-28],水资源安全风险系统要素间的作用关系构成了水资源安全风险的系统结构,如图1所示。

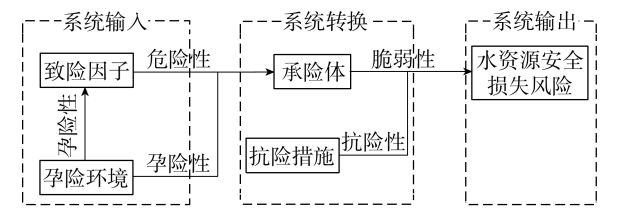


图1 水资源安全风险的系统结构

2.2 水资源安全风险的传导过程与传导机理

由图2可以看出,水资源安全风险的传导过程如下^[10]:抗险措施抗险性 B 作用于孕险环境孕险性 A ;在特定 A 和 B 作用下,研究区域水资源安全致险因子强度 H 及其发生频率 P 形成了水资源安全致险因子危险性曲线 $D(P,H,A,B)$;在特定 A 和 B 作用下,研究区域承险体暴露性 $E(A,B)$ 与承险体敏感性 $S(H,C,A,B)$ 形成了承险体脆弱性曲线 $V(H,C,A,B)$,其中 C 为承险体损失;承险体脆弱性曲线 $V(H,C,A,B)$ 与致险因子危险性曲线 $D(P,H,A,B)$ 经合成,形成了水资源安全损失风险曲线 $R(P,C,A,B)$ 。

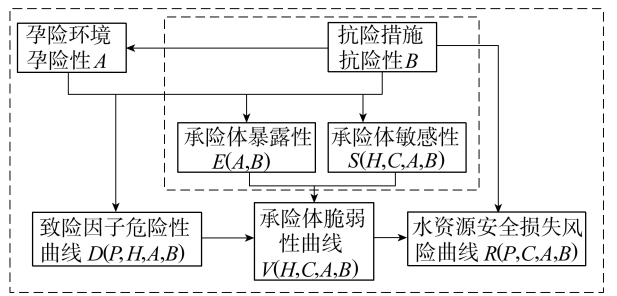


图2 水资源安全风险的传导机理

由图1、图2可知,水资源安全风险在系统结构中呈现链式传递的显著特点^[10],该风险链式传递的路径是从水资源安全致险因子危险性作为系统输入,经承险体脆弱性作为系统转换,到水资源安全损失风险系统输出的过程。风险传导的源头是致险因子的危险性,风险传导的强度取决于该传递链中的每个节点即危险性和脆弱性的大小,风险传导的结果是承险体的水资源安全损失风险。在风险传导过程中孕险性、抗险性通过作用于危险性和脆弱性,调

整危险性的高低和脆弱性的强弱,从而影响水资源安全损失风险的高低。简言之,经危险性与脆弱性的关系链式传递作用、孕险性和抗险性对链式传递强度的调整作用,承险体脆弱性将致险因子危险性转换为安全损失风险的风险信息传导过程就是水资源安全风险的传导机理,简称水资源安全风险要素关系传导机理,它是结构水资源学方法系统关系传导原理在水资源安全风险研究领域中的应用^[10,28],反映了水资源安全风险的实质是致险因子与承险体相互作用的结果。

3 水资源安全风险评价方法分析

目前,水资源安全风险评价的常用方法是水资源安全风险系统综合评价方法,它是应用亚里士多德三段论方法^[9]和基于指标体系^[11,19]的系统综合评价方法,将流域水资源安全风险多指标评价转换成单指标(风险综合指标)评价的过程。在水资源安全风险系统综合评价方法构建过程中,目前主要方法有以下7种^[9,29]:①评价对象集确定方法。一般根据评价目标、咨询专家、区域实际需求调研等确定评价对象,对已有的安全风险评价等级标准,利用均匀随机数随机模拟标准等级评价样本获得评价对象,以参与建立评价模型。②评价指标体系确定方法。可采用遗传算法改进的层次分析法^[12]识别风险评价指标的重要性。按照水资源安全系统的主要功能及其影响因素建立水资源安全风险评价初步指标体系,就指标间两两相对重要性咨询专家,得到判断矩阵,采用遗传层次分析法^[30]、联系数方法^[31]筛选该初步指标体系并确定其对应的权重关系,最终构建流域水资源安全风险评价指标体系。③评价指标测度方法。一般通过查阅有关统计年鉴、水资源公报、地面或天空实际观测等来测度评价指标值^[9]。④定性指标定量化方法。对照评价等级标准,可将定性指标以百分制赋值对应若干个标准等级,经咨询专家打分确定定性指标的百分制值^[32-33]。⑤单指标评价函数确定方法。可用集对分析联系数方法从同异反三方面定量刻画评价指标样本值与评价等级标准间的模糊关系,再进行模糊综合评价^[19],也可根据各指标对评价标准等级的影响特性,确定 $[0,1]$ 区间内的刻度赋值^[33],从而建立流域水资源安全风险单指标评价函数,以提高评价结果的准确度。⑥指标权重确定方法,如层次分析法^[12,34-35]。例如金菊良等^[36]用评价指标样本的信息熵构造模糊互补判断矩阵,再用加速遗传算法求得模糊层次分析法中各要素的客观权重,并基于最小相对熵原理将客观权重和主观权重综合组合

权重。⑦综合评价指标函数确定方法。根据流域水资源安全风险系统五要素子系统的信息传导关系确定流域水资源安全风险系统综合评价指标函数,各要素子系统的综合评价指标函数可通过相应指标集的单指标评价函数加权和确定,也可根据流域水资源安全风险的优化目标、约束条件等确定,例如韩宇平等^[37]基于水安全评价指标样本与样本集中的最佳、最劣值间的模糊关系,通过求解最小广义距离目标函数,来估计该样本的综合评价指标函数值。

4 结论与展望

a. 提出了流域水资源安全系统的概念,该系统涵盖五大要素:水资源安全致险因子、承险体、孕险环境、抗险措施和水资源安全损失。各要素间相互作用形成了风险传导过程中的五类关系,即致险因子的危险性、承险体的脆弱性、孕险环境的孕险性、抗险措施的抗险性和水资源安全损失风险。上述五大要素耦合作用共同构成水资源安全风险系统,该风险系统具有亚里士多德三段论关系结构特征。

b. 水资源安全风险传导机理在于:在流域特定孕险环境孕险性和抗险措施抗险性的作用下,致险因子危险性关系与承险体脆弱性关系通过链式传递合成作用,最终形成承险体完全损失风险。上述机理称为水资源安全风险要素关系传导机理。

c. 水资源安全风险评价是基于上述传导机理,运用系统综合评价方法,将流域水资源安全风险多指标评价转化成单指标评价的过程,阐述了实现该过程所需要的7类评价方法。

d. 由上述流域水资源安全风险系统的概念体系、风险传导机理、风险评价方法共同构成流域水资源安全风险评价的初步理论框架。

e. 未来研究重点是进一步深化理论框架中兼有物理成因解析和定量计算的流域水资源安全风险评价方法研究,开展不同自然和社会环境条件下流域水资源安全风险评价实践,以进一步深入研究流域水资源安全风险评价方法,推动流域水资源安全风险评价理论框架的发展和完善。

参考文献:

[1] 魏可. 风险社会视域下的“安全”概念再认识[J]. 国际公关, 2022(8): 19-22. (WEI Ke. Reconceptualizing of the concept of “security” from the perspective of risk society [J]. PR Magazine, 2022(8): 19-22. (in Chinese))

[2] 于汐. 重大岩土工程风险评估基础理论研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2018.

[3] GASTELUM J R, KRISHNAMURTHY G, OCHOA N, et

- al. The use of system dynamics model to enhance integrated resources planning implementation[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(7): 2247-2260.
- [4] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269. (XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269. (in Chinese))
- [5] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 880-885. (KANG Shaozhong. Towards water and food security in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 880-885. (in Chinese))
- [6] PARK S Y, KIM J S, LEE S, et al. Appraisal of water security in Asia: the pentagonal framework for efficient water resource management[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(16): 8307.
- [7] 李原园,李云玲,何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. *水利学报*, 2021, 52(11): 1340-1346. (LI Yuanyuan, LI Yunling, HE Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(11): 1340-1346. (in Chinese))
- [8] 梁缘毅,吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. *资源科学*, 2019, 41(4): 775-789. (LIANG Yuanyi, LYU Aifeng. Risk assessment of water resource security in China [J]. *Resources Science*, 2019, 41(4): 775-789. (in Chinese))
- [9] 金菊良,沈时兴,周亮广,等. 区域水资源承载力综合评价若干问题探讨[J]. *江淮水利科技*, 2025(1): 10-17. (JIN Juliang, SHEN Shixing, ZHOU Lianguang, et al. Discussion on several issues in the comprehensive evaluation of regional water resources carrying capacity [J]. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2025(1): 10-17. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 金菊良,周亮广,崔毅,等. 区域旱灾风险评估若干问题探讨[J]. *水利学报*, 2023, 54(11): 1267-1276. (JIN Juliang, ZHOU Lianguang, CUI Yi, et al. Discussion on some problems of regional drought risk assessment [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(11): 1267-1276. (in Chinese))
- [12] ZHAO Jun, JIN Juliang, ZHU Jiezhong, et al. Water resources risk assessment model based on the subjective and objective combination weighting methods[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(9): 3027-3042.
- [13] WANG Xuanxuan, CHEN Yaning, LI Zhi, et al. Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106297.
- [14] QIN Li, MA Chengxiang, MU Yunxiao. Whole-process risk identification of urban rainwater resource utilization and construction of evaluation index system in Loess Plateau region [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 687(1): 012198.
- [15] ZHAO Mengdie, WEI Jinhai, HAN Yuping, et al. Water resource security evaluation and barrier analysis in Henan Province utilizing the DPSIR framework [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1354175.
- [16] 杨丰顺. 城市水安全风险评价理论方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [17] 张景林,王桂吉. 安全的自然属性和社会属性[J]. *中国安全科学学报*, 2001, 11(5): 6-10. (ZHANG Jinglin, WANG Guiji. Natural property and social property of safety [J]. *China Safety Science Journal*, 2001, 11(5): 6-10. (in Chinese))
- [18] 赵钟楠,田英,李原园,等. 总体国家安全观视角下水资源安全保障策略与关键问题思考[J]. *中国水利*, 2020(9): 11-13. (ZHAO Zhongnan, TIAN Ying, LI Yuanyuan, et al. Thoughts on water resources security safeguard strategy and key issues from the perspective of overall national security concept [J]. *China Water Resources*, 2020(9): 11-13. (in Chinese))
- [19] 金菊良,吴开亚,魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [20] 唱彤,郦建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. *水资源保护*, 2020, 36(1): 44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1): 44-51. (in Chinese))
- [21] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. *水利学报*, 2019, 50(8): 980-989. (WANG Hongrui, QIAN Longxia, ZHAO Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese))
- [22] 高凡,蓝利,黄强. 变化环境下河流健康评价研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(6): 81-87. (GAO Fan, LAN Li, HUANG Qiang. Advances on evaluation of river health in changing environments [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37

- (6):81-87. (in Chinese))
- [23] 张伟光,王红瑞,范琳琳,等. 干旱风险与水资源短缺风险关系辨析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 418-422. (ZHANG Weiguang, WANG Hongrui, FAN Linlin, et al. Analysis of the relationship between the risk of water shortage and the risk of drought [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2015, 51(4): 418-422. (in Chinese))
- [24] 张士锋,陈俊旭,华东,等. 水资源系统风险构成及其评价:以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1855-1863. (ZHANG Shifeng, CHEN Junxu, HUA Dong, et al. Research on the assessment of water resource system risk: a case study of Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1855-1863. (in Chinese))
- [25] 赵钟楠,田英,张越,等. 水资源风险内涵辨析与中国水资源风险现状[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 46-50. (ZHAO Zhongnan, TIAN Ying, ZHANG Yue, et al. Analysis of connotation and current situation of water resources risks in China [J]. Yellow River, 2019, 41(1): 46-50. (in Chinese))
- [26] 唐彦东,于汐,李潇昂,等. 风险元理论研究[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 1-5. (TANG Yandong, YU Xi, LI Xiaoang, et al. Reach on risk metatheory [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 1-5. (in Chinese))
- [27] 金菊良,酆建强,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. Theoretical framework of drought risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 1-10. (in Chinese))
- [28] 金菊良,周戎星,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. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [29] 金菊良,魏一鸣,周玉良. 复杂系统综合评价的理论框架及其在水安全评价中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4): 391-397. (JIN Juliang, WEI Yiming, ZHOU Yuliang. Theoretics frame of comprehensive evaluation of complex system and its application to evaluating water security [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2008, 24(4): 391-397. (in Chinese))
- [30] 金菊良,沈时兴,陈梦璐,等. 遗传层次分析法在区域水资源承载力评价指标体系筛选中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 1-6. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CHEN Menglu, et al. Application of genetic analytic hierarchy process in screening the evaluation index system of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 1-6. (in Chinese))
- [31] 金菊良,周亮广,王平,等. 基于相对联系数的区域水利高质量发展评价指标体系筛选方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 43-51. (JIN Juliang, ZHOU Lianguang, WANG Ping, et al. Screening method of evaluation index system for high-quality development of regional water conservancy based on relative connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 43-51. (in Chinese))
- [32] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))
- [33] 耿雷华,刘恒,钟华平,等. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258. (GENG Leihua, LIU Heng, ZHONG Huaping, et al. Indicators and criteria for evaluation of healthy rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 253-258. (in Chinese))
- [34] 金菊良,魏一鸣,丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(3): 65-70. (in Chinese))
- [35] 熊伟,董增川,卢嘉琪,等. 基于组合赋权模糊物元可拓模型的渭河流域甘肃段河流健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 9-14. (XIONG Wei, DONG Zengchuan, LU Jiaqi, et al. River health evaluation in Gansu section of Weihe River Basin based on combined weighted fuzzy matter-element extension model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 9-14. (in Chinese))
- [36] 金菊良,吴开亚,李如忠,等. 信息熵与改进模糊层次分析法耦合的区域水安全评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 61-66. (JIN Juliang, WU Kaiya, LI Ruzhong, et al. Region water security evaluation method based on information entropy and improved fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 61-66. (in Chinese))
- [37] 韩宇平,阮本清,解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 37-42. (HAN Yuping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. Resources Science, 2003, 25(4): 37-42. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-17 编辑:骆超)