

# 引汉济渭工程初期调水风险特征研究

韩雨薇<sup>1</sup>, 薛小杰<sup>1</sup>, 白涛<sup>2</sup>, 刘刚<sup>3</sup>, 刘茜<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为解决引汉济渭工程运行中调水风险因素与特征规律识别不全面的问题,以工程运行初期为研究对象,采用专家调查法识别工程主要调水风险因素并确定风险组合类型,再建立危险度模型,分析单一风险因素的稳定性和风险组合危险度的特征规律。研究表明:变异系数越大则风险因素稳定性越差,其中管理失误风险因素最不稳定,其值高达0.998;水源不足、需水量增加两类风险因素叠加后风险组合的危险度更高;风险组合的危险度与风险因素数量之间没有明显的正向关系。研究成果补充了引汉济渭工程调水风险特征研究的不足,为制定针对性风险减控和管理策略提供技术支撑。

**关键词:** 跨流域调水工程; 危险度模型; 风险量化; 风险组合特征; 引汉济渭工程

中图分类号:TV68

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2024)01-0057-08

## Characteristics of initial water diversion risk in Hanjiang-to-Weihe Project

HAN Yuwei<sup>1</sup>, XUE Xiaojie<sup>1</sup>, BAI Tao<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>3</sup>, LIU Qian<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Currently, the Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project is facing the dilemma of incomplete identification of risk factors and characteristic rules in the water diversion process. Here, the expert investigation method was adopted to identify the main risk factors of the project and determine the risk portfolio types, and then the risk degree model was established to analyze the stability of single risk factors and the characteristic rules of risk portfolios. The results show that the greater the coefficient of variation, the worse the stability of the risk factors, and the risk of management failure is the most unstable, reaching 0.998. The risk portfolio of insufficient water source and increasing water demand is more hazardous than other portfolios. There is no obvious positive correlation between the risk degree and the risk factor quantity of risk portfolios. The research results complement the deficiency of the study on the risk characteristics of the water diversion project, and provide technical support for the formulation of targeted risk mitigation, control and management strategies.

**Key words:** inter-basin water diversion project; risk degree model; risk quantification; risk portfolio characteristics; Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project

## 1 研究背景

引汉济渭工程是国家172项重大节水供水工程和150项重大水利工程中的标志性工程之一<sup>[1]</sup>,拥有“小南水北调”之称。该工程不仅是实现渭河流域乃至陕西省水资源优化配置的重点基础性工

程<sup>[2-3]</sup>,同时也是国务院报批的《关中-天水经济区发展规划》《渭河流域重点治理规划》《渭河流域重点治理规划陕西水利项目实施方案》《全国水资源综合规划》等文件中明确的国家级大型跨流域、长距离调水项目。引汉济渭工程的实施能缓解陕西省关中地区的缺水局面,有效遏制渭河流域水生态与水

收稿日期:2023-04-07; 修回日期:2023-09-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);陕西省科技厅联合基金项目(2019JLM-52、2021JLM-44)

作者简介:韩雨薇(1999—),女,陕西周至人,硕士研究生,研究方向为工程风险管理。

通讯作者:白涛(1983—),男,陕西扶风人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水资源系统工程。

环境恶化,防止城市环境地质灾害。

引汉济渭工程具有点多、面广、供水管线长、工程复杂等特点<sup>[4]</sup>。由于该工程较复杂,在项目前期决策、设计、建设以及运行等阶段都会存在诸多的风险因素<sup>[5-7]</sup>,自筹建以来工程相关的风险研究一直是专家学者关注的热点;国内学者们对于引汉济渭工程调水风险的研究主要集中在风险因子识别<sup>[8]</sup>、风险评价<sup>[9-11]</sup>、调度风险分析<sup>[12-14]</sup>等方面,研究成果单一且对于风险源及其特征规律识别不全面。目前在对引汉济渭工程的风险研究中,大多数是根据调度结果直接进行风险分析,缺乏与实际运行工况相结合的风险分析,研究成果与实际工程的贴合度不高;另外,鲜有关于引汉济渭工程运行期风险组合的研究,而调水工程中风险的发生并非互斥事件,可能存在多个风险因素共同作用的情况<sup>[15]</sup>,需要针对风险组合开展调水工程运行期风险特征的研究。

鉴于上述原因,本研究以引汉济渭工程运行初期为例,开展对这一跨流域长距离调水工程运行初期主要风险因子的识别和确定,并对单一风险因子

的稳定性和多源风险组合的特征进行研究。研究成果是未来针对性防范风险的重要前提,对保证工程运行的安全性、可靠性和提高调水效率有非常重要的意义。

## 2 研究区域概况与研究方法

### 2.1 研究区域概况

陕西省引汉济渭工程是由汉江向渭河关中地区调水的省内南水北调骨干工程,由黄金峡、三河口水利枢纽和秦岭输水隧洞3部分组成,全长约435 km,工程总体布置如图1所示。

引汉济渭工程具有规模宏大、调水距离长、受水区无调蓄场所、沿线地质环境复杂等特点。根据设计要求,引汉济渭工程运行初期,由三河口枢纽单一调水,经连接洞自流至秦岭输水隧洞,后通过黄池沟配水枢纽为西安市主城区、咸阳市主城区、兴平市、周至县、长安县、沣东新城、秦汉新城、渭北工业园区等21个地区输送生活用水和工业用水,年均调水量为 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

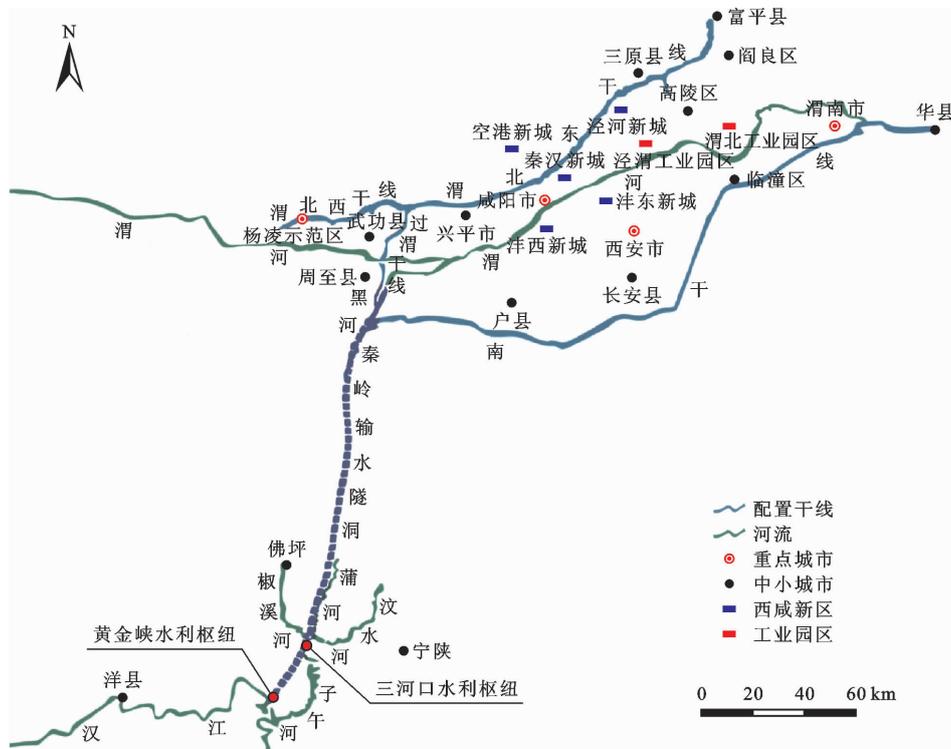


图1 引汉济渭工程总体布置图

### 2.2 研究方法

针对引汉济渭工程运行初期调水风险特征的研究,确定研究方案为:(1)在对一般性跨流域、长距离调水工程调水风险因素进行实证分析的基础上,通过专家调查法识别并确定调水风险因素与风险组

合类型;(2)建立危险度模型,采用变异系数-专家打分法计算风险因素值与权重,并对单一风险因素的稳定性进行分析;(3)通过构建功效函数建立并求解危险度模型,对风险组合方案的危险性特征进行分析。引汉济渭工程运行初期调水风险特征研究技

术路线如图 2 所示。

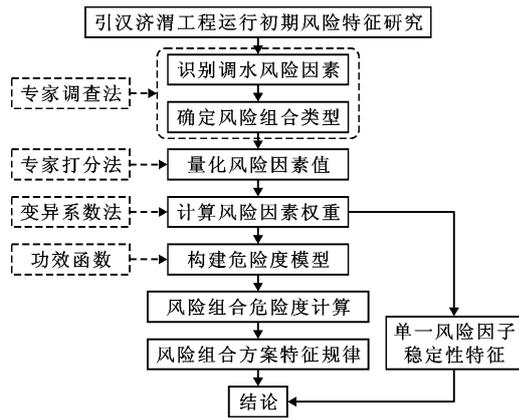


图 2 引汉济渭工程运行初期调水风险特征研究技术路线图

2.2.1 调水风险因素识别 风险识别属于定性的分析方法,其常用方法包括:专家调查法、事故树法

及 WBS - RBS (work breakdown structure - risk breakdown structure)法等。本文主要采用专家调查法,结合引汉济渭工程内、外部影响因素,将调水风险按性质不同分为水源不足、工程调配能力不足、需水量增加等 3 类风险,共包含了 12 个典型性风险因素,详见表 1。

2.2.2 调水风险组合分析 风险组合是将不同数量或不同来源的风险因素形成一个组合体。本文研究的风险组合按照因素类别不同主要分为 2 类,即单源风险组合和多源风险组合。单源风险组合是指同一类风险内部因素的组合;多源风险组合在本文中又可细分为 2 类,即多源双因素风险组合和多源多因素风险组合。不同类风险的 2 个因素随机组合形成多源双因素风险组合;不同类风险的 3 个及以上因素的组合则为多源多因素风险组合。具体组合方案见表 2。

表 1 引汉济渭工程运行初期调水风险因素一览表

风险类别	风险因素	注释
水源不足	降雨量不足 $u_{11}$	水库控制流域面积区域的年降水量不足
	蒸发损失过大 $u_{12}$	水库回水流域及水库蒸发量过大
	预测误差 $u_{13}$	水文预报误差,如预报丰水实际枯水等
工程调配能力不足	管理失误 $u_{21}$	人为操作经验不足导致工程系统蓄调不合理
	水库坝体失能 $u_{22}$	工程质量或者外力因素导致溃坝问题
	水电站运行能力不足 $u_{23}$	供水闸门、阀门、坝后机电组不能正常运行导致运行能力不足
需水量增加	输水能力不足 $u_{24}$	工程质量或者外力因素导致输水管、隧洞出现破裂、渗漏变形等破坏,或连接洞系统结构破坏,导致输水能力不足
	水资源利用率不高 $u_{31}$	受水区生活、工业用水浪费严重,导致实际需水量增加
	工程延期 $u_{32}$	工程延期,较规划年的实际需水量增加
	人口增加 $u_{33}$	受水区人口增加,城镇居民用水量增加
	产业结构调整 $u_{34}$	不同产业万元产值需水量不同,产业结构发生调整时,总产值需水量发生变化
	工业快速发展 $u_{35}$	工业快速发展引起需水量增加

表 2 引汉济渭工程运行初期调水风险组合方案

单源风险组合方案	多源风险组合方案
水源不足 - 水源不足	水源不足 - 工程调配能力不足
工程调配能力不足 - 工程调配能力不足	水源不足 - 需水量增加
需水量增加 - 需水量增加	工程调配能力不足 - 需水量增加
	水源不足 - 工程调配能力不足 - 需水量增加

2.2.3 危险度模型的建立与求解

(1)单一风险风险值及权重计算。风险具有客观性、普遍性、随机性等<sup>[16-17]</sup>特征,目前对风险的研

究主要分为定性和定量 2 种<sup>[18-20]</sup>。本文的研究对象引汉济渭工程仍处于在建状态,无法获取实时监测的数据,故采用定性定量相结合的方法进行研究。

结合工程建设情况,运用专家打分法、变异系数法对无法通过历史数据确定的风险因素及风险因素权重进行量化。风险因素值的原始数据主要是通过专家打分获得。针对工程的实际情况,按照风险因素对系统产生的影响及出现的概率划分为5个等级,制定相应的等级标准,并邀请专家合理地打分评价,单一风险因素影响及概率分值见表3。

表3 单一风险因素影响及概率分值

影响分值		概率分值	
无影响:	0分	概率小	(0,0.1]
影响小:	1分	概率一般	(0.1,0.2]
影响较大:	2分	概率较大	(0.2,0.3]
影响大:	3分	概率大	(0.3,0.5]
影响特大:	4分	概率特大	(0.5,1]

将每一份专家评分表的结果作为一个序列,对应指标的分值为相应的值,列出所有的序列。假设由 $m$ 个专家打分数据构成有效风险输入值,每个专家负责对 $n$ 个风险因素评价,构建 $m \times n$ 阶的指标评价矩阵, $\mathbf{X} = x_{ij}$ ,得到每一个专家打分初始序列:

$$X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $X_i$ 为第 $i$ 个风险因素输入风险值序列; $x_{ij}$ 为第 $j$ 个专家对第 $i$ 个因素的评分。

计算所得风险值为下一步计算风险因子权重的输入数据。采用变异系数法<sup>[18,21-22]</sup>计算各因素的权重值,采用的公式如下:

$$D_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

$$\delta_i = D_i / \bar{X}_i \quad (3)$$

$$W_i = \delta_i / \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (4)$$

式中: $\delta_i$ 为第 $i$ 个风险因素的变异系数; $D_i$ 为第 $i$ 个风险因素的标准差; $E(x)$ 为第 $i$ 项指标的期望值; $\bar{X}_i$ 为第 $i$ 个风险因素的输入风险值(为输入风险值序列的均值); $W_i$ 为第 $i$ 个风险因素的影响权重。

(2) 风险组合危险度计算。变量集 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是风险系统的序参量,其值是 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 系统稳定临界点上序参量; $a_i, b_i$ 分别为风险系统的上、下限; $u_i$ 具有正有效。用功效函数可表示各风险因素对风险系统的影响程度:

$$u_i = \frac{X_i - b_i}{a_i - b_i} \quad (5)$$

众多学者采用集成的方法计算子系统中风险因素序参量对整个系统的总体影响程度(即贡献度),则有:

$$U_n(u_i) = \left( \prod u_i \right)^{\frac{1}{n}} = \sum w_i u_i, \quad w_i \geq 0 \quad (6)$$

式中: $w_i$ 为第 $i$ 个风险因素的权重;其它符号同前。

本文主要以各子系统内部因素间的风险组合为研究对象,故各因素对系统的贡献函数直接取为:

$$U_i = W_i \cdot \bar{X}_i \quad (7)$$

式中: $U_i$ 为第 $i$ 个风险因素在风险系统中的有效贡献度。

根据以上对功效函数及有效贡献度的分析,危险度函数 $C_n$ 为:

$$C_n = \left\{ \frac{U_1 \cdot U_2 \cdots U_n}{\left[ \prod_{i < j} (U_i + U_j) \right]} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

当 $n$ 大于3时:

$$C_n = 2 \times \left\{ \frac{U_1 \cdot U_2 \cdots U_n}{\left[ \prod_{i < j} (U_i + U_j) \right]^{\frac{2}{n-1}}} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n \ \& \ n > 3) \quad (9)$$

式中: $U_j$ 为第 $j$ 个风险因素在风险系统中的有效贡献度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 风险因素风险值的获取、变异系数及权重的确定

为了保障专家打分评价的有效性,尽可能降低个人主观性,从水利水电、工程管理、水文与水资源等多个专业,从高校、科研、业主、施工方、监理方等多个机构,从不同职称、年龄段等多个方面遴选专家,针对3类12种风险因素影响程度的调查发放问卷,共发放问卷25份,收回有效问卷25份。经计算整理得到12种调水风险因素风险值(表4)、变异系数以及影响程度权重(表5)。

风险值的大小,描述的是该因素的发生对调水系统的影响程度<sup>[23]</sup>,通过引汉济渭工程初期的调水风险因素风险值(表4)可以看出:

(1) 对调水目标影响最大的风险因素是工程调配能力不足子系统下的水库坝体失能( $u_{22}$ )因素,其风险值为4.00。

(2) 其次是水源不足子系统下的降雨量不足( $u_{11}$ )因素带来的影响风险值为3.11,工程调配能力不足系统下的输水能力不足( $u_{24}$ )因素的影响风险值为2.89。

(3) 需水量增加子系统的风险因素对调水目标

的影响风险值均在 2.00 以下。

仅由单一风险因素风险值分析得出,工程结构

的安全问题是对引汉济渭工程运行目标保证率影响最大的因素。

表 4 单一风险因素风险值(专家打分法)

风险因素	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$u_{31}$	$u_{32}$	$u_{33}$	$u_{34}$	$u_{35}$
$\bar{X}$	3.11	1.56	2.00	2.00	4.00	2.11	2.89	1.67	1.33	1.89	1.33	1.56

表 5 单一风险因素变异系数及权重(变异系数法)

风险因素	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$	$u_{24}$	$u_{31}$	$u_{32}$	$u_{33}$	$u_{34}$	$u_{35}$
变异系数 $\delta_i$	0.381	0.361	0.623	0.998	0.388	0.525	0.559	0.461	0.505	0.521	0.441	0.697
影响权重 $W_i$	0.059	0.056	0.096	0.155	0.060	0.081	0.086	0.071	0.078	0.080	0.068	0.108

变异系数是指风险因素随着时间的延续,在引汉济渭工程运行初期风险系统中发生变化的程度。从计算得出的调水风险因素变异系数(表 5)可以明显看出:

(1) 在工程调配能力不足子系统下,管理失误( $u_{21}$ )因素的变异系数远高于其它因素的变异系数,其值高达 0.998。

(2) 工业快速发展( $u_{35}$ )和预测误差( $u_{13}$ )因素的变异系数分别为 0.697、0.623;其它风险因素的变异系数均在 0.350 ~ 0.600 之间。

(3) 在引汉济渭工程运行初期对调水目标影响最大的是水库坝体失能( $u_{22}$ )因素,其变异系数较小,仅为 0.388。

引汉济渭工程是国家重点水利工程,在建设前期国家投入了大量的人才和资金以支持其设计研究<sup>[24]</sup>,建设期间对其工程技术、施工质量更是严格把控<sup>[25]</sup>,故在其运行初期与工程结构相关的风险变化程度很小,而管理、社会、经济等相关因素风险发

生变化较大,符合实际情况,且结论与专家讨论结果一致,研究结果可靠。

由以上分析得出,单一风险因素的风险大小与变异系数之间是独立的,不存在逻辑关系;在分析引汉济渭工程运行初期调水风险稳定性的问题上,变异系数法具有很好的适用性。

### 3.2 调水风险组合方案危险度分析

在引汉济渭工程运行初期,调水系统内部风险因素随机组合形成不同的风险组合方案。为更好地分析各风险因素间的作用关系,本文采用系统动力学梳理并绘制引汉济渭工程运行初期的调水风险因素作用关系图,详见图 3。图 3 中“+”表示箭线尾部的因素会对箭头部的因素产生放大效应,“-”表示箭线尾部的因素会对箭头部的因素产生阻碍效应。在对调水风险系统作用关系图梳理分析的基础上,结合随机理论对方案进行随机组合,得出,在整个系统中,理论风险组合有 3 471 个,89.63% 的风险组合表现为放大效应。

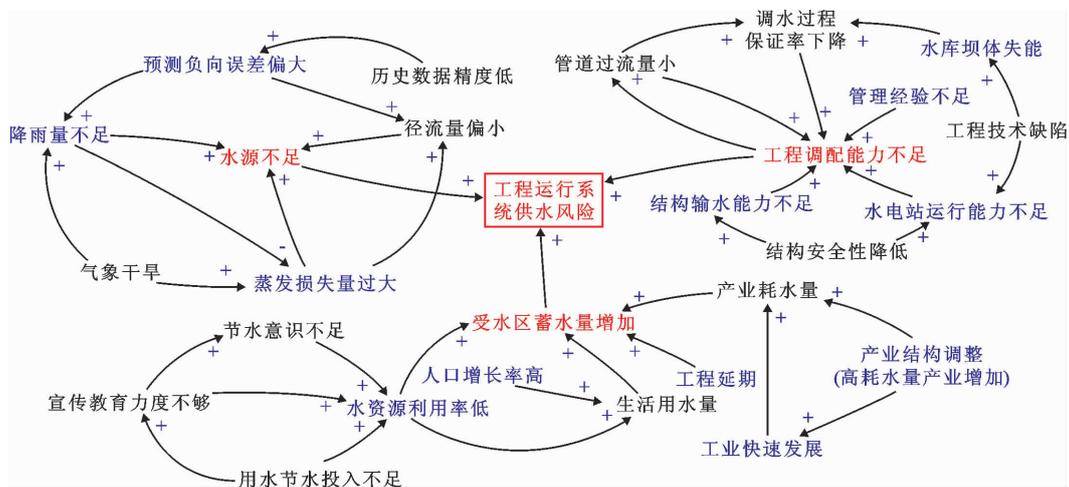


图 3 引汉济渭工程运行初期调水风险因素作用关系图

结合各风险因素的变异系数,根据分层抽样的方法选取整个调水风险系统中变异系数为中间值以及各子系统中变异系数为最大、最小值的8个因素进行风险组合的危险特征研究,具体因素有降雨量不足( $u_{11}$ )、蒸发损失过大( $u_{12}$ )、预测误差( $u_{13}$ )、管理失误( $u_{21}$ )、输水能力不足( $u_{24}$ )、人口增加( $u_{33}$ )、产业结构调整( $u_{34}$ )、工业快速发展( $u_{35}$ ),再将各风险因素的风险值和权重代入危险度函数求出各风险组合方案的危险度值,计算结果详见表6、7、8。

**3.2.1 单源风险组合方案危险度分析** 表6为7组单源双因素风险组合方案的危险度值,从表6中可以看出,危险度最大的是“降雨量不足-预测误差”( $u_{11}-u_{13}$ )风险因素组合,其值为0.500;其次是“人口增加-工业快速发展”( $u_{33}-u_{35}$ )因素组合,危险度值为0.499。

在引汉济渭工程运行初期,三河口库区作为唯一的调水水源,若其实际可调水量小于需水量,该库区将成为工程发挥实际效用的一大掣肘。因此,在单源风险因素组合中“水源不足”类风险首先应该受到重视。据前文研究,“降雨量不足-预测误差”风险因素组合危险度最大且不稳定;当降雨量不足,同时伴随预测丰水实际枯水情况,缺水情况相互叠加,可调水量不能满足受水区需水要求,调水风险剧增;若

两者组合发生,对工程的危险度较高。

此外,在“需水量增加”类风险中的“人口增加-工业快速发展”双因素组合后,对工程的危险度也很高。究其原因,在引汉济渭工程运行初期,计划调水量为 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,受水区人口增长且工业快速发展导致生活与生产需水量同时增加,工程的缺水风险随之上升。

**3.2.2 多源风险组合方案危险度分析** 表7是21组多源双因素风险组合方案的危险度值,从表7中可以看出:

(1) 危险度最大的是“降雨量不足-工业快速发展”( $u_{11}-u_{35}$ )风险因素的组合,其值为0.500;其次是“蒸发损失过大-产业结构调整”( $u_{12}-u_{34}$ )、“预测误差-工业快速发展”( $u_{13}-u_{35}$ )、“降雨量不足-人口增加”( $u_{11}-u_{33}$ )、“预测误差-人口增加”( $u_{13}-u_{33}$ )等4种风险因素组合,危险度值分别为0.499、0.497、0.496、0.495。

(2) 危险度最小的风险因素组合是“蒸发损失过大-管理失误”( $u_{12}-u_{21}$ ),其危险度值为0.413;再者是“管理失误-产业结构调整”( $u_{21}-u_{34}$ )的组合,其值为0.418。

表8为23组3个风险因素形成的多源多因素风险组合的危险度值。

表6 引汉济渭工程运行初期单源双因素风险组合危险度

风险组合	$u_{11}-u_{13}$	$u_{11}-u_{12}$	$u_{12}-u_{13}$	$u_{21}-u_{24}$	$u_{33}-u_{35}$	$u_{33}-u_{34}$	$u_{34}-u_{35}$
危险度值	0.500	0.467	0.463	0.497	0.499	0.484	0.477

表7 引汉济渭工程运行初期多源双因素风险组合危险度

风险组合	$u_{11}-u_{21}$	$u_{11}-u_{24}$	$u_{11}-u_{33}$	$u_{11}-u_{34}$	$u_{11}-u_{35}$	$u_{21}-u_{33}$	$u_{24}-u_{33}$	$u_{12}-u_{21}$	$u_{12}-u_{24}$	$u_{12}-u_{33}$	$u_{12}-u_{34}$
危险度	0.483	0.484	0.496	0.491	0.500	0.470	0.485	0.413	0.438	0.481	0.499
风险组合	$u_{12}-u_{35}$	$u_{21}-u_{34}$	$u_{24}-u_{34}$	$u_{13}-u_{21}$	$u_{13}-u_{24}$	$u_{13}-u_{33}$	$u_{13}-u_{34}$	$u_{13}-u_{35}$	$u_{21}-u_{35}$	$u_{24}-u_{35}$	
危险度	0.474	0.418	0.442	0.486	0.494	0.495	0.466	0.497	0.477	0.490	

表8 引汉济渭工程运行初期多源多因素风险组合危险度

风险组合	$u_{11}-u_{21}-u_{33}$	$u_{11}-u_{24}-u_{33}$	$u_{11}-u_{21}-u_{35}$	$u_{11}-u_{24}-u_{35}$	$u_{11}-u_{13}-u_{21}$	$u_{11}-u_{13}-u_{24}$	$u_{11}-u_{13}-u_{33}$	$u_{11}-u_{13}-u_{35}$
危险度	0.483	0.492	0.487	0.495	0.490	0.493	0.497	0.499
风险组合	$u_{12}-u_{13}-u_{34}$	$u_{12}-u_{21}-u_{34}$	$u_{12}-u_{21}-u_{35}$	$u_{12}-u_{13}-u_{35}$	$u_{12}-u_{13}-u_{21}$	$u_{21}-u_{24}-u_{33}$	$u_{21}-u_{24}-u_{35}$	$u_{21}-u_{33}-u_{35}$
危险度	0.477	0.442	0.454	0.496	0.453	0.483	0.488	0.482
风险组合	$u_{13}-u_{21}-u_{24}$	$u_{13}-u_{21}-u_{33}$	$u_{13}-u_{21}-u_{35}$	$u_{13}-u_{24}-u_{33}$	$u_{13}-u_{24}-u_{35}$	$u_{13}-u_{33}-u_{35}$	$u_{24}-u_{33}-u_{35}$	
危险度	0.493	0.484	0.487	0.492	0.495	0.498	0.491	

从表8中可以看出:

(1) 危险度最大的风险组合是“降雨量不足-预

测误差-工业快速发展”( $u_{11}-u_{13}-u_{35}$ ),危险度值为0.499;其次是“预测误差-人口增加-工业快速发展”( $u_{13}-u_{33}-u_{35}$ )和“降雨量不足-预测误差-人口增加”( $u_{11}-u_{13}-u_{33}$ )组合,二者危险度值分别为0.498、0.497。

(2)危险度最小的组合是“蒸发损失过大-管理失误-产业结构调整”( $u_{12}-u_{21}-u_{34}$ ),其危险度值为0.442;再有“蒸发损失过大-预测误差-管理失误”( $u_{12}-u_{13}-u_{21}$ )组合也很小,危险度值为0.453。

多源双因素组合和多源多因素组合方案模拟结果均表明:危险度高的组合均为“水源不足-需水量增加”两类风险因素的相互叠加。在调水工程中,调水风险一般是指调水水量小于需水水量的风险。当三河口水库水源不足造成可调水量减少,同时,由于客观因素的增加,受水区需水量与供水量极不平衡,严重影响了调水工程的预期运行,将带来极大的调水风险。相比之下,风险组合中包含工程调配能力不足风险时,组合的危险度较小;因为引汉济渭作为国家重点型水利工程,其技术与质量要求严格,工程结构的安全度较高,不易发生结构性破坏。

对于引汉济渭工程运行初期多源风险组合方案,降雨量不足( $u_{11}$ )和预测误差( $u_{13}$ )风险多次出现在危险度较高的风险组合中;作为调水工程中频繁发生的风险,该类风险具有较高的不确定性<sup>[26]</sup>,对实际可调水量的影响较大。其次,工业快速发展( $u_{35}$ )风险也较多出现在危险度较大的多源风险组合中;在进行引汉济渭工程受水区水量配置时,工业生产需水量较大<sup>[27]</sup>,难以达到要求的供水保证率,工业快速发展造成生产需水量剧增,缺水风险随之增加。

## 4 讨论

由上文分析可知,危险度研究选取的是风险的影响值作为初始输入数据,在引汉济渭工程运行初期风险系统中,风险组合的危险度越高,该风险方案给调水系统安全带来的影响越大。

(1)本研究结果显示,对于单源与多源风险组合,危险度高的组合方案中大多都涉及到降雨量不足或预测误差风险因素。已有研究发现,当受降雨或径流预测影响导致来水量不足时,调水工程将产生一系列风险事故,对工程有重大的影响<sup>[28]</sup>;降水保证率降低和径流不确定将增加调水工程系统的失效概率<sup>[29]</sup>,增加工程风险;当调水工程中存在降雨及预报误差事件时,其危害强度骤增<sup>[30]</sup>,与本文研

究结果相似。由此可以看出,降雨量不足和预测误差这两个风险因素的出现对调水工程的危害程度高且不容小觑,在未来对引汉济渭调水风险研究中要着重加强包含这两个因素的风险组合的模拟研究。

(2)工业快速发展风险因素也较多出现在危险度高的风险组合方案中。有研究发现,工业快速发展产生的需水量较大,不同来水方案下的调水量都难以满足受水区工业快速发展的要求,工程缺水风险事件频发<sup>[31]</sup>,与本研究结果相似。说明当存在工业快速发展风险时,受水区的缺水风险应当受到重视。

(3)从表6、7、8中可以发现,在危险度较高的风险组合中,3个(包含3个)以下因子形成的风险组合方案,最大危险度不超过0.5,表明不同风险因素组合模式下,风险的危险度不会发生较大的变化;说明在一定的风险数量之内,引汉济渭工程初期调水风险组合的危险度与数量之间没有很明显的正向关系。

本研究引入的风险组合丰富了引汉济渭工程中风险识别的研究成果,改善了风险因素识别不全面的问题;通过上述与其他学者的研究成果对比可知,本研究提出的危险度模型能够有效地分析引汉济渭工程的调水风险特征,为长距离跨流域调水工程风险研究提供参考。由于引汉济渭跨流域调水工程在运行与管理中较为复杂,本文仅分析了工程的风险特征,之后应结合工程的实际调水过程,进一步研究调水风险的传递规律。

## 5 结论

本文以引汉济渭工程运行初期为研究对象,构建了跨流域调水工程调水风险因素与不同来源下的风险组合方案,建立了风险的危险度模型,对单一风险因子稳定性和多源风险组合危险度进行量化研究。研究得到结论如下:

(1)单一风险因子的变异系数越大说明风险因素稳定性越差,其中管理失误风险因素最不稳定,变异系数值高达0.998。

(2)水源不足、需水量增加两类风险因素叠加后风险组合的危险度更高;降雨量不足和预测误差风险因素的出现使得引汉济渭工程运行初期调水风险系统的危险度增加。

(3)在不同风险组合方案中,风险的危险度没有较大的差异;3个(包含3个)以下因素形成的风险组合方案的危险度与风险因素数量之间没有正向关系,不存在明显的风险叠加放大效应。

## 参考文献:

- [1] 任童. 引汉济渭工程 建世纪工程 润三秦大地[J]. 中国水利, 2022(19): 98-99.
- [2] 杜小洲, 董磊华, 康文健. 引汉济渭工程调水区生态产品价值实现机制研究[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(5): 6-11 + 5.
- [3] 陕西省水利电力勘测设计研究院. 陕西省引汉济渭工程三河口水利枢纽初步设计报告[Z]. 2021-11-12.
- [4] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 49-56 + 212.
- [5] 蒋建军, 刘家宏, 严伏朝, 等. 浅议引汉济渭几个关键技术问题[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 133-136.
- [6] 薛永庆, 吕二超, 王峰, 等. 引水隧洞斜井洞口段雾气分布规律及影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 190-195 + 203.
- [7] 肖尧, 钟登华, 任炳昱, 等. 基于CSRAM的引水隧洞施工进度风险分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 90-100.
- [8] 韩艳丽. 引汉济渭工程受水区供水对象西安市供水安全保障研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 211-215.
- [9] 李宛谕, 黄显峰, 阎玮, 等. 基于组合权重云模型的调水工程洪水资源利用风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 57-65.
- [10] ZHAO Ranhang, QI Zhen, WANG Xingju, et al. Risk identification and assessment of the accidents for distance water transfer project[J]//DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences, 2019. DOI: 10.12783/dteees/gmee 2018/27465.
- [11] 慕鹏飞. 未来气候情景对跨流域调水工程的影响与风险评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [12] 华鑫, 白涛, 李磊, 等. 来水不确定对跨流域工程供水调度风险的影响[J]. 水力发电学报, 2023, 42(8): 21-31.
- [13] 马盼盼, 白涛, 武连洲, 等. 汉江干支流径流丰枯遭遇对跨流域调水的影响[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 13-17 + 106.
- [14] 白涛, 喻佳, 魏健, 等. 考虑不同需水过程的三河口水库调度风险研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 12-22.
- [15] ZHOU Ying, LI Chenshuang, DING Lieyun, et al. Combining association rules mining with complex networks to monitor coupled risks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 186: 194-208.
- [16] KASSER J E. Systemic and systematic risk management [M]. Boca Raton: CRC Press: 2020.
- [17] RELKAR A S. Risk analysis of equipment failure through failure mode and effect analysis and fault tree analysis [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21: 793-805.
- [18] 曹久华, 席永涛, 胡基平, 等. 基于系统动力学的港口船舶通航风险成因耦合模型[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 65-71.
- [19] 张秀菊, 郝梦茹, 罗柏明. 河流型水源地安全评价及供水风险研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 55-59.
- [20] 赵晓涛. 泾惠渠灌区水资源供需预测及供水风险评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 54-57 + 197.
- [21] SUN Ying, LIANG Xiujuan, XIAO Changlai. Assessing the influence of land use on groundwater pollution based on coefficient of variation weight method: a case study of Shuangliao City[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 34964-34976.
- [22] 王慰. 空中交通管制安全风险耦合模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [23] ODJEGBA E E, OLUWASANYA G, IDOWU O A, et al. Failure mode effects and criticality analysis of water supply systems' risks: path to water resources planning and policy [J]. Water and Environment Journal, 2022, 37(1): 114-125.
- [24] “引汉济渭”秦岭输水隧洞计划 2019 年贯通[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 173.
- [25] 李晓峰, 杨诚. 引汉济渭工程安全质量管理体系建设[J]. 中国水利, 2015(14): 67-68 + 75.
- [26] MOMIYAMA S, SAGEHASHI M, AKIBA M, et al. Assessment of the climate change risks for inflow into sagami dam reservoir using a hydrological model[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(2): 367-379.
- [27] 黄强. 陕西省南水北调受水区水资源优化配置研究[J]. 中国水利, 2013(22): 21-22.
- [28] 卫星辰. 跨流域调水工程的水文风险评估与调控-以引汉济渭工程为例[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [29] 陈进, 黄薇. 跨流域长距离引调水工程系统的风险及对策[J]. 水利水电技术, 2004, 35(5): 95-97 + 103.
- [30] 宋培兵. 枯水情景考虑预报不确定性的原水供水系统调度风险研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [31] 李杨. 宁东地区煤基能源产业发展水资源约束分析[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(1): 22-29.