

汤洪洁, 赵亚威. 跨流域长距离调水工程风险综合评价研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 29-38. TANG H J, ZHAO Y W. Study of comprehensive risk evaluation for inter-basin and long-distance water transfer project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 29-38. (in Chinese)

跨流域长距离调水工程风险综合评价研究与应用

汤洪洁^{1,2}, 赵亚威^{3,4}

(1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 2. 江河水利水电咨询中心有限公司, 北京 100120;
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003; 4. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 郑州 450003)

摘要: 针对跨流域长距离调水工程风险综合评价困难问题, 进行风险因子辨识, 建立风险指标体系和风险等级标准, 并设计一种风险集成方法。将工程进行单元划分, 确定风险指标权重, 计算各单元综合风险量值, 将各单元风险进行集成计算得到工程总体风险等级。针对不同单元包含风险因素不同的问题, 提出风险指标权重修正方法。基于所提风险集成方法, 设计并开发跨流域长距离调水工程风险集成软件。某跨流域长距离调水工程某管理处实例计算结果表明, 该管理处管辖范围总体风险等级为 II 级, 灰色聚类分析法等 7 种方法的计算结果一致, 说明所提方法有效可靠。

关键词: 跨流域长距离调水工程; 综合评价; 风险; 集成方法; 软件开发

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0004

跨流域长距离调水工程通常地跨多个省市和流域, 地理环境复杂, 包含渠、隧和管等各类建筑物以及机电和金属结构设备成百上千处, 且工程与当地社会、经济和生态等方面的发展有着密切联系, 潜在着大量工程管理风险、各种类型建筑物工程风险、洪水风险和调度运行风险以及突发公共安全事件风险^[1-3]。开展跨流域长距离调水工程风险综合评价, 将不同类型风险进行有机集成, 有利于决策者准确把握工程总体风险水平, 从而为制定相应的风险防控措施提供技术支撑。

目前, 跨流域长距离调水工程风险综合评价相关研究成果较少。李慧敏等^[4]、韩迅等^[5]、张启义等^[6-7]、晏成^[8]分别对输水渠道、跨(穿)河工程、输水渡槽、左岸排水、下穿渠铁路等调水工程中的建筑物开展了风险评估研究, 计算得到单个建筑物的风险, 但均未进行单个建筑物风险对调水工程总体风险的影响分析, 对于制定工程总体风险防控措施作用有限; 汪伦焰等^[9]对南水北调中线辉县段的运行管理风险进行评估, 但没有考虑工程风险、社会

风险等其他类型风险; 徐志超等^[10]提出了南水北调中线干线工程安全风险分级管控理论, 但仅能评估各管理处分单元的风险等级, 无法评估各管理处、中线工程总体风险等级; 刘恒等^[11-12]对南水北调工程风险、水文风险、生态与环境风险、经济风险和社会风险进行了分析, 提出将上述五大风险进行有机整合的设想, 但未给出具体的解决方案。跨流域长距离调水工程各类风险因素存在于不同层面、不同层级和不同层次上, 且不同的风险因素既有独立性, 又有关联性^[13-14]。因此, 跨流域长距离调水工程风险综合评价研究主要存在以下 3 个难点: 风险因子数量巨大, 且相互之间关系复杂, 风险综合评价时要在全面考虑各种风险因子集合给工程带来的综合风险的基础上, 梳理风险因子之间的关系, 既要“穷尽”, 又要避免重复考虑; 将小空间尺度(下级单元)风险评估成果集成至更大空间尺度(上级单元), 需构建风险集成层次结构模型; 在已经构建的风险层次结构模型的基础上, 采用适合的方法进行各层面、层级、层次的风险集成计算。

收稿日期: 2022-07-22 修回日期: 2022-11-29 网络出版时间: 2022-12-02

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221201.1520.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243224)

作者简介: 汤洪洁(1972—), 女, 新疆焉耆人, 正高级工程师, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: tanghongjie@giwp.org.cn

通信作者: 赵亚威(1992—), 男, 河北邢台人, 工程师, 博士, 主要从事水资源系统规划与管理研究。E-mail: yaweizhao2017@126.com

风险集成计算的方法主要有灰色聚类分析法^[15]、模糊综合评价法^[16]、雷达图法^[17]、物元理论^[18]、贝叶斯公式法^[19]、内梅罗指数法^[20]和综合指数法^[21]。上述方法均能够以风险指标体系、风险指标风险量值、风险指标权重和风险等级标准等为输入信息,经过计算,输出评价对象的风险等级。灰色聚类分析法、模糊综合评价法、物元理论和贝叶斯公式法 4 种方法原理类似,都是计算评价对象与不同风险等级的关联程度,根据关联度最大原则确定评价对象的风险等级。雷达图法、内梅罗指数法和综合指数法 3 种方法原理类似,都是计算评价对象综合风险指数,根据综合风险指数大小确定评价对象的风险等级。理论上这些方法均可用于风险集成计算,但目前还没有研究成果同时对上述方法进行过对比分析,不同方法的应用效果有待进一步验证。

本文针对跨流域长距离调水工程风险综合评价困难的问题,建立风险指标体系和风险等级标准,设计一种风险集成方法,为跨流域长距离调水工程风险综合评价提供一定理论与技术参考。

1 风险综合评价研究

1.1 风险综合评价技术路线

风险综合评价技术路线见图 1。首先,辨识风险因子,构建风险指标体系,建立风险等级标准,统计各末级研究单元风险评估的风险量值、等级划分标准;然后,根据集成对象建立风险集成层次结构模型,确定层次结构中上下级关系;最后,运用主客观相结合的方法计算每层内各指标权重,并选择合适的风险集成方法将下层风险评估成果集成至上层,以此类推,直到得到集成对象综合风险等级。

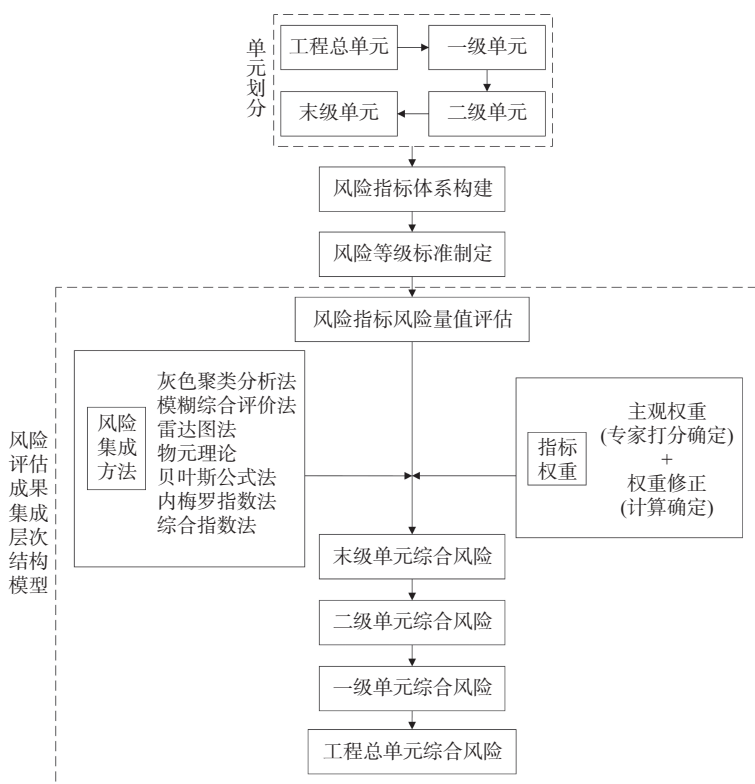


图 1 风险综合评价技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of comprehensive risk evaluation

1.2 风险指标体系构建

风险因子辨识是开展风险综合评价的基础^[22]。跨流域长距离调水工程沿线涉及的工程、环境和社会等众多风险因素,依据风险成因将其分为工程风险和调度风险两大类。工程风险是指工程自身结构、所处环境等问题导致不正常运行进而影响工程正常供水的风险。调度风险是指不正常调度影响

工程正常供水的风险。依据风险因子辨识结果,按照逐层分解的原则,可构建跨流域长距离调水工程风险指标层次体系,具体为:第一层,按照风险成因划分为工程风险和调度风险 2 大类;第二层,工程风险按照功能系统划分为输水系统风险、排水系统风险和交叉系统风险 3 类,调度风险按照调度情景划分为供水调度风险、冰期调度风险^[23]和水质调度风

险^[24]3类;第三层,功能系统风险可进一步按照建筑物类型划分,输水系统风险可分为渠道风险和输水建筑物风险和控制建筑物风险,排水建筑物风险可分为上排水建筑物风险和下排水建筑物风险,交叉系统风险可分为跨渠桥梁风险、渠渠交叉建筑物风

险和其他穿越建筑物风险。依据上述思路构建的风险指标体系全面考虑了跨流域长距离调水工程潜在的各种风险因素,层次结构清晰,做到了无遗漏、无重复。跨流域长距离调水工程风险指标体系见图2,风险指标内涵见表1。

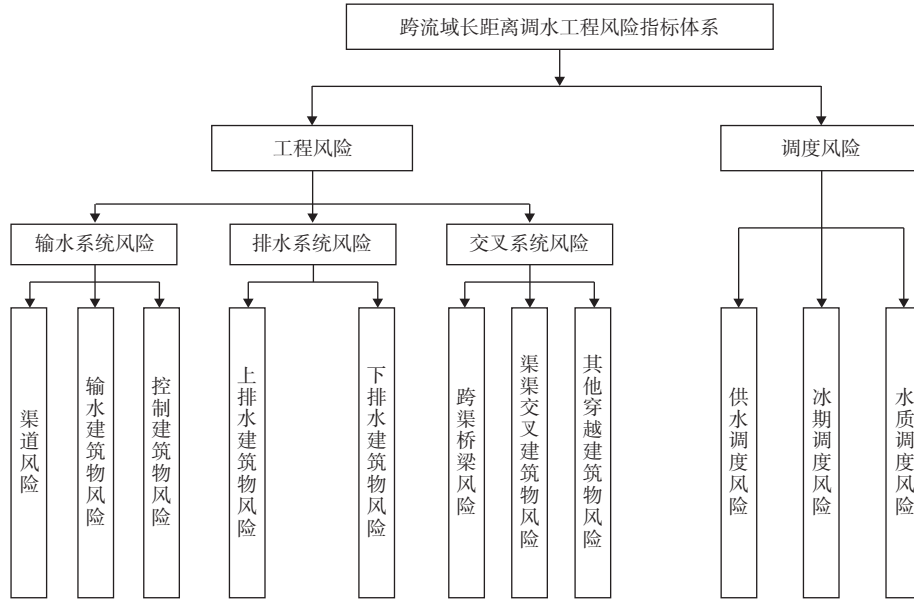


图2 跨流域长距离调水工程风险指标体系

Fig. 2 Risk indicator system of inter-basin and long-distance water transfer project

表1 风险指标内涵

Tab. 1 The meaning of risk indicators

第一层	指标内涵	第二层	指标内涵	第三层	指标内涵
工程风险	工程自身结构、所处环境等问题导致不正常运行进而影响工程正常供水的风	输水系统风险	输水建筑物因结构失稳、材料老化等问题无法正常输水的风险	渠道风险 输水建筑物风险 控制建筑物风险	对应建筑物因结构失稳、材料老化等问题无法发挥正常功能的风险
		排水系统风险	排水建筑物因结构失稳、材料老化等问题无法正常排水的风险	上排水建筑物风险 下排水建筑物风险	
		交叉系统风险	交叉建筑物因结构失稳、材料老化等无法正常发挥正常功能的风险	跨渠桥梁风险 渠渠交叉建筑物风险 其他穿越建筑物风险	
		供水调度风险	调水工程因通信系统、控制系统、数据采集系统、运行管理系统故障无法正常进行供水调度的风险	供水调度风险 冰期调度风险 水质调度风险	
调度风险	不正常调度影响工程正常供水的风	冰期调度风险	发生冰塞、冰坝、异常冰情的风险		
		水质调度风险	地表水污染、地下水污染、大气污染等导致调水工程水质污染的风险		

1.3 风险等级标准建立

一般可采用风险矩阵法^[25]确定风险事件的风

险等级。风险事件等级根据风险事件的风险量值大小确定,而风险量值指风险事件发生的可能性与

产生后果的严重性的乘积,用于表征风险的“大小”。
风险量值计算公式为

$$R = PL \quad (1)$$

式中: R 为风险事件的风险量值; P 为风险事件发生的可能性; L 为风险事件后果的严重性。

通常,风险事件发生的可能性用概率的形式来表示^[26],不同风险发生概率对应的等级标准见表 2。跨流域长距离调水工程风险事件后果的严重性可从人员伤亡(受影响)程度、经济损失、供水影响、生态与环境和社会影响 5 个方面进行评估^[27-28]。人员伤亡(受影响)程度主要通过工程发生风险后导致的人员伤亡人数来反映,经济损失主要是指工程发生风险后导致的折合为货币的损失,供水影响主要通过工程发生风险后导致的供水中断历时和范围来反映,生态与环境和社会影响主要通过工程发生风险后导致的沿线生态、环境破坏程度来反映,社会影

响主要通过工程发生风险后导致的负面社会舆论来反映。上述 5 个方面充分考虑了工程发生风险后产生的各种不良后果,能够全面评估风险后果的严重程度。不同后果等级及对应的阈值参考《水利水电工程施工危险源辨识与风险评价导则(试行)》(办监督函[2018]1693 号),具体见表 3。

表 2 风险事件可能性等级描述
Tab. 2 Description of probability level of risk event

等级	可能性指数	定性判断标准	定量判断标准
		定性描述	概率区间
1	(0, 1]	极低、几乎不可能发生	$\geq 0.000\ 001 \sim < 0.0001$
2	(1, 2]	低、难以发生	$\geq 0.0001 \sim < 0.01$
3	(2, 3]	中、偶然发生	$\geq 0.01 \sim < 0.1$
4	(3, 4]	高、可能发生	$\geq 0.1 \sim < 0.5$
5	(4, 5]	极高、频繁发生	$\geq 0.5 \sim < 1.0$

表 3 跨流域长距离调水工程风险事件后果严重性等级描述

Tab. 3 Description of consequence severity level of risk events of inter-basin and long-distance water transfer project

等级	严重性指数	人员伤亡(受影响)程度	经济损失	供水影响	生态与环境和社会影响
1	(0, 1]	①引人注目需要救护; ②淹没区人口小于 5 000 人,或淹没水深超 2 m,区域人口小于 500 人	30 万元以下	①供水流量减小; ②局部短时影响总干渠正常输水	周边生态与环境受到极小影响或者没有影响 几乎没有公众受到影响
2	(1, 2]	①3 人以下死亡,或 10 人以下重伤; ②淹没区人口在 5 000 ~ 1 万人,或淹没水深超 2 m 以上,区域人口在 500 ~ 1 000 人	30 万 ~ 1 000 万元	①造成主要分水口门供水中断或严重影响总干渠正常输水 24 h 以上; ②总干渠减小输水流量或低水位运行	周边生态与环境受到一定影响 受影响公众限定在特定的组织或区域
3	(2, 3]	①3~10 人死亡,或 10~50 人重伤; ②淹没区人口在 1 万 ~ 5 万人,或淹没水深超 2 m 以上,区域人口在 1 000 ~ 5 000 人	1 000 万 ~ 5 000 万元	①造成 3 个以上地级城市供水中断或严重影响总干渠正常输水 48 h 以上; ②总干渠 1 周以内中断输水	周边生态与环境受到较大影响 对较大规模的社会公众造成影响
4	(3, 4]	①10~30 人死亡,或 50~100 人重伤; ②淹没区人口在 5 万 ~ 10 万人,或淹没水深超 2 m 以上,区域人口在 5 000 ~ 1 万人	5 000 万 ~ 1 亿元	①造成 1 省(直辖市)或 5 个以上地级城市供水中断 ②总干渠 1 个月以内输水中断	周边生态与环境受到重大影响,生态功能部分丧失 对社会中大部分成员的心理造成严重影响
5	(4, 5]	①30 人以上死亡,或 100 人以上重伤; ②淹没区人口大于 10 万人,或者淹没水深超 2 m 以上,区域人口大于 1 万人	1 亿元以上	①造成 2 省(直辖市)或 7 个以上地级城市供水中断 ②总干渠 1 个月以上输水中断	周边生态与环境受到巨大影响,生态功能丧失 对整个社会的价值观念构成冲击

《水库大坝风险评估导则》(水总科[2013]324 号)将大坝风险根据严重程度分为可接受风险、可

容忍风险、不可接受风险和极高风险,分别对应 I 级风险、II 级风险、III 级风险和 IV 级风险,本文依据

此导则,并根据风险事件可能性和后果严重的描述,定义跨流域长距离调水工程风险等级标准见表4。其中,蓝色表示Ⅰ级风险,黄色表示Ⅱ级风险,橙色表示Ⅲ级风险,红色表示Ⅳ级风险。Ⅰ~Ⅳ风险等级对应的风险量值取值区间分别为[0, 5)、[5, 10)、[10, 15)、[15, 25]。

表4 跨流域长距离调水工程风险等级标准
Tab. 4 Risk level standard of inter-basin and long-distance water transfer project

项目	严重性L				
	1	2	3	4	5
可能性P	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

1.4 风险集成方法

跨流域长距离调水工程涉及复杂多样的风险因素,进行总体风险等级评估难度较大。一种可行的综合风险等级评估思路为:先对调水工程进行单元

划分,然后对每个单元风险进行评估,最后将所有单元风险进行集成后得到调水工程总体风险等级。本文基于风险管理相关理论,设计了一种跨流域长距离调水工程风险集成方法。

1.4.1 单元划分

单元划分原则是:按照渠道或河段进行划分,长度要适中,太长效果不明显,太短则计算过于复杂。在单元划分的基础上,按照已建立的风险指标体系,对每个单元的工程风险指标和调度风险指标的可能性和后果严重性进行评估,进而确定风险指标的风险量值。

1.4.2 权重确定

采用专家打分法确定权重分配结果。邀请了水利行业设计、管理和运行调度领域的相关专家进行打分,每名专家的专家权重相同,每个风险指标的权重等于每位专家对该风险指标打分权重与专家权重的加权求和。经过专家打分,获得风险指标体系中分层风险指标权重分配结果见表5。

将表5分配结果进行简化后,得到风险指标权重分配结果见表6。

表5 分层风险指标权重
Tab. 5 Layered risk indicator weight

第一层	第一层相对权重	第二层	第二层相对权重	第三层	第三层相对权重	第四层	第四层相对权重				
工程风险	0.6	输水系统	0.60	渠道	0.55	渡槽	0.6				
				输水建筑物	0.35			河穿渠	0.4		
				控制建筑物	0.10	排水系统	0.25	上排水建筑物	0.30		
				下排水建筑物	0.70			跨渠桥梁	0.50		
				其他交叉	0.15			渠渠交叉	0.20		
		调度风险	0.4	其他交叉	0.15	其他穿越建筑物	0.30	供水调度	0.40		
						冰期调度	0.30			水质调度	0.30

特别地,不同的单元可能不包含上述所有的风险因素,因此,需要根据单元包含风险因素的实际情况,对上述风险指标权重进行修正,公式为

$$u_{i,j} = \frac{w_{i,j}}{\sum_{j=1}^{J_i} w_{i,j}} \quad (2)$$

式中: i 为单元序号; j 、 J_i 为单元 i 包含的风险指标序号和数量; $w_{i,j}$ 、 $u_{i,j}$ 为单元 i 包含的风险指标 j 的修

正前、修正后的权重。

1.4.3 单元综合风险量值计算

采用加权求和方法计算各单元的综合风险量值,公式为

$$P_i = \sum_{j=1}^{J_i} u_{i,j} p_{i,j} \quad (3)$$

式中: $p_{i,j}$ 为单元 i 包含的风险指标 j 的风险量值; P_i

为单元 i 综合风险量值。

表 6 风险指标权重
Tab. 6 Risk indicator weight

风险指标	权重	风险指标	权重
渠道风险	0.198	跨渠桥梁风险	0.045
渡槽风险	0.076	渠渠交叉风险	0.018
河穿渠风险	0.050	其他穿越建筑物风险	0.027
控制建筑物风险	0.036	供水调度风险	0.160
上排水建筑物风险	0.045	冰期调度风险	0.120
下排水建筑物风险	0.105	水质调度风险	0.120

1.4.4 风险集成计算

依据建立的风险等级标准以及各单元综合风险量值,采用灰色聚类分析法、模糊综合评价法、雷达图法、物元理论、贝叶斯公式法、内梅罗指数法和综合指数法等方法计算跨流域长距离调水工程的总体风险等级。上述 7 种方法需要的输入数据均为风险指标体系、风险指标风险量值、风险指标权重和风险等级标准,输出均为评估对象的风险等级,理论上均可使用。灰色聚类分析法、模糊综合评价法、物元理论、贝叶斯公式法、内梅罗指数法和综合指数法属于数值计算方法,对于指标数量没有明确限制;雷达图法则是一种数形结合的计算方法,当指标数量较多情况下图形不够直观,适用于指标数量相对较少的情况。限于篇幅,上述方法的数学原理不再进行具体介绍。

2 软件开发及工程应用

2.1 软件开发

跨流域长距离调水工程风险集成涉及风险类型以及风险指标繁多,集成计算工作量大,且较为复杂。为了实现理论研究的实际应用价值,以简单实用为原则,借助 C#编程环境开发“跨流域长距离调水工程风险集成软件”,实现对数据的处理以及风险集成计算,从而提高工作效率。

软件主要包括“单元划分”“权重确定”“集成计算”和“结果显示”4 个模块,4 个模块为逐层递进的关系,软件结构框架见图 3。

单元划分模块功能:首先将调水工程按照桩号将其划分为若干个单元,接着导入建筑物桩号位置信息,最后按照建筑物桩号将其自动分配至对应的单元中。

权重确定模块功能:输入各风险指标的专家打

分权重结果,软件根据每个单元包含的风险指标情况,自动修正各单元内风险指标权重。

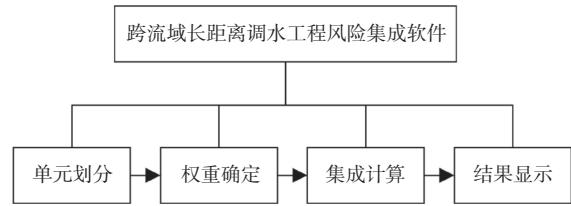


图 3 跨流域长距离调水工程风险集成软件结构框架

Fig. 3 Risk integration software framework of inter-basin and long-distance water transfer project

集成计算模块功能:软件内置了灰色聚类分析法、模糊综合评价法、雷达图法、物元理论、贝叶斯公式法、内梅罗指数法和综合指数法 7 种方法,便于对比分析和辅助决策。经过分析,上述 7 种方法流程类似,均可分为输入、计算和输出 3 部分,输入包括:风险指标体系、风险指标风险量值、风险指标权重和风险等级标准,输出为评价对象风险等级。据此将上述 7 种方法分别进行了封装处理,输入和输出代码共用,计算代码相互独立。输入各单元风险指标的风险量值、修正后的权重分配结果和风险等级标准,调用上述方法进行风险集成计算。

结果显示模块功能:显示不同方法计算得到调水工程总体风险等级。

2.2 工程应用

某跨流域长距离调水工程的某管理处管辖范围全长 51.8 km,桩号范围为(0+300)—(52+100)。按渠道桩号将其划分为 32 个单元,见表 7。该管理处管辖范围包含 3 座输水渡槽(输水建筑物)、3 座分水口(控制建筑物)、5 座排水渡槽(上排水建筑物)、7 座排水涵洞、8 座排水倒虹吸(下排水建筑物)、53 座跨渠桥梁、2 座渠渠交叉建筑物以及 2 座其他交叉建筑物。经过初步的风险评估得出每个单元风险指标的风险量值见图 4,计算可得每个单元综合风险量值见表 8。由表 8 可知,单元 5、6、8 和 25 的风险量值超过了 6.5,相较于其他单元来说风险较大,需要重点关注。将上述结果代入“跨流域长距离调水工程风险集成软件”进行计算,得到该跨流域调水工程管理处的总体风险等级为 II 级,软件计算结果见图 5。

2.3 结果合理性分析

由风险集成计算结果可知,灰色聚类分析、模糊综合评价法、雷达图法、物元理论、贝叶斯公式法、内梅罗指数法和综合指数法 7 种方法计算得出

的该调水工程管理处管辖范围的总体风险等级均为Ⅱ级,计算结果呈现一致性。为了进一步验证结果的合理性,按照本文定义的风险等级标准,对输入的各单元风险指标的风险等级和数量进行统计,结果见表9。

表7 单元划分结果
Tab.7 Unit division result

单元序号	起点桩号	终点桩号	单元序号	起点桩号	终点桩号
1	0+300	1+748	17	21+700	22+990
2	1+748	1+993	18	22+990	23+327
3	1+993	3+970	19	23+327	26+290
4	3+970	8+023	20	26+290	26+730
5	8+023	13+450	21	26+730	27+400
6	13+450	13+765	22	27+400	28+530
7	13+765	14+465	23	28+530	29+650
8	14+465	15+125	24	29+650	36+289
9	15+125	16+140	25	36+289	37+319
10	16+140	16+350	26	37+319	39+800
11	16+350	17+414	27	39+800	40+993
12	17+414	19+300	28	40+993	47+050
13	19+300	20+450	29	47+050	48+631
14	20+450	21+140	30	48+631	49+171
15	21+140	21+320	31	49+171	50+370
16	21+320	21+700	32	50+370	52+100

表8 各单元综合风险量值及风险等级

Tab.8 Comprehensive indicator value and risk level of each unit

单元序号	综合风险量值	风险等级	单元序号	综合风险量值	风险等级
1	5.79	Ⅱ	17	5.79	Ⅱ
2	5.47	Ⅱ	18	5.80	Ⅱ
3	5.41	Ⅱ	19	5.90	Ⅱ
4	6.03	Ⅱ	20	6.21	Ⅱ
5	7.87	Ⅱ	21	5.86	Ⅱ
6	6.55	Ⅱ	22	5.92	Ⅱ
7	6.15	Ⅱ	23	5.96	Ⅱ
8	6.71	Ⅱ	24	6.33	Ⅱ
9	6.04	Ⅱ	25	6.52	Ⅱ
10	5.81	Ⅱ	26	5.79	Ⅱ
11	5.80	Ⅱ	27	5.79	Ⅱ
12	5.52	Ⅱ	28	5.57	Ⅱ
13	5.86	Ⅱ	29	5.56	Ⅱ
14	5.81	Ⅱ	30	5.85	Ⅱ
15	6.06	Ⅱ	31	5.21	Ⅱ
16	5.73	Ⅱ	32	5.12	Ⅱ

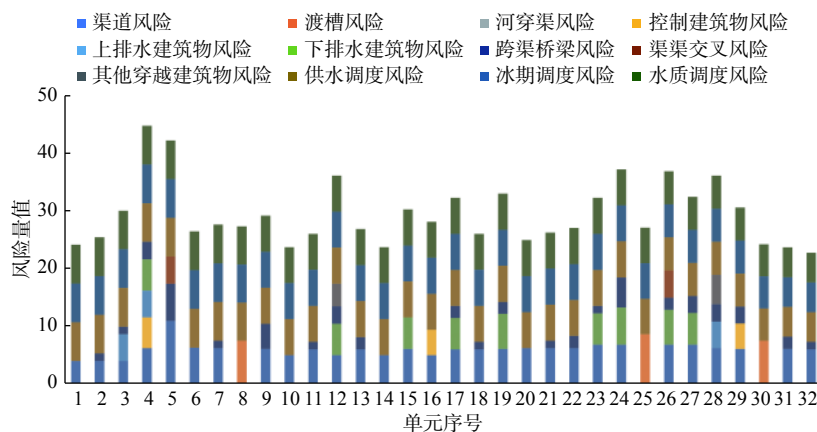


图4 各单元风险指标风险量值
Fig.4 Risk indicator value of each unit

从表8统计得到的各等级风险指标数量来看:属于Ⅱ级的风险指标数量最多,共137个,占总指标数量的81%;属于Ⅰ级的风险指标数量次之,共

31个,占总指标数量的18%;属于Ⅲ级的风险指标数量更少,仅有1个,占总指标数量的1%;没有Ⅳ级的风险指标。由此可知,绝大多数风险指标所属风

险等级为Ⅱ级。因此,上述 7 种方法计算得出该调水工程管理处管辖范围的总体风险等级均为Ⅱ级这一结论较为合理。



图 5 风险集成软件计算结果显示界面

Fig. 5 Calculation result display interface of risk integration software

表 9 I~IV 风险指标数量统计结果

Tab. 9 Statistical result of I~IV risk indicators number

项目	风险等级			
	I	II	III	IV
指标数量	31	137	1	0
百分比/%	18	81	1	0

3 结论

本文基于风险管理相关理论,设计了一种风险集成计算方法,用于评估跨流域长距离调水工程总体风险等级,主要结论如下:

依据风险成因,将跨流域长距离调水工程涉及的风险划分为工程风险和调度风险,并对上述两类风险进行了分层细化,构建了风险指标层次结构体系,充分考虑了跨流域长距离调水工程风险因素的复杂性和多样性。

综合考虑风险发生的可能性和后果的严重性,制定了跨流域长距离调水工程 I~IV 级风险等级标准,明确了不同风险等级的风险量值取值范围,为跨流域长距离调水工程风险等级评估提供了依据。

基于专家打分法提出了风险指标权重修正方法,基于灰色聚类分析法、模糊综合评价法等 7 种方法提出了风险集成计算方法,并基于此开发了风险集成计算软件,解决了跨流域长距离调水工程总体风险等级评估困难的问题。

实例分析表明,某管理处采用灰色聚类分析法、模糊综合评价法等 7 种方法计算得到的风险等级均为Ⅱ级,结果一致,结论合理,验证了所提风险集成方法的有效性。

本文风险指标风险量值均为固定值,而某些情况下风险量值赋为区间值可能更符合实际情况,如何进行含区间值风险指标的风险集成计算是下一步重点研究的内容。

参考文献:

- [1] 贺海挺, 吴剑国, 张爱晖. 跨流域调水工程的失效模式及影响分析[J]. 水利水电技术, 2004, 35(8): 100-104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2004.08.028.
- [2] 聂相田, 范天雨, 董浩, 等. 基于IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 151-160. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.02.022.
- [3] 熊雁晖, 漆文刚, 王忠静. 南水北调中线运行风险研究(一): 南水北调中线工程风险识别[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 1-5. DOI: 10.3969/SP.J.1201.2010.03001.
- [4] 李慧敏, 吉莉, 李锋, 等. 基于FMEA的调水工程输水渠道运行安全风险评估[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 24-31. DOI: 10.11988/ckyyb.20200138.
- [5] 韩迅, 安雪晖, 柳春娜. 南水北调中线大型跨(穿)河建筑物综合风险评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(7): 639-649. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.030.
- [6] 张启义, 丁留谦, 解家毕, 等. 采砂坑对南水北调中线工程渡槽安全运行的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(11): 212-218. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.11.035.
- [7] 张启义, 姚秋玲, 丁留谦, 等. 南水北调中线工程左排渡槽防洪风险识别[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 112-121. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.013.
- [8] 晏成. 城际铁路下穿南水北调干渠设计方案研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(5): 98-104. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201808060004.
- [9] 汪伦焰, 马莹, 李慧敏, 等. 基于模糊VIKOR-FMEA的南水北调运行管理安全风险评估[J]. 中国农村水利水电, 2020, 45(10): 194-202. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2020.10.035.
- [10] 徐志超, 刘杰, 杨文涛, 等. 安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制研究: 以南水北调中线干线工程为例[J]. 中国水利, 2021, 56(8): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2021.08.018.
- [11] 刘恒, 耿雷华. 南水北调运行风险管理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 1-6. DOI: 10.3969/SP.J.1201.2010.04001.

- [12] 刘恒, 耿雷华, 裴源生, 等. 南水北调运行风险管理关键技术问题研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(5): 4-7. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2007.05.004.
- [13] 汤洪洁. 长距离调水工程风险评估工作思路[J]. *水利规划与设计*, 2020, 26(5): 86-91. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2020.05.020.
- [14] 王芳, 何勇军, 李宏恩. 基于系统动力学的引调水工程风险分析: 以倒虹吸工程为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(3): 184-191. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0063.
- [15] 秦晋, 刘树峰. 吉林省水资源短缺风险等级评价及预测[J]. *人民长江*, 2016, 47(21): 39-42, 76. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.21.009.
- [16] 蔚青, 李巧玲, 段亮, 等. 辽河保护区铁岭段河流健康综合评价研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(1): 134-141. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.01.018.
- [17] 邱颖, 王丽萍, 阎晓冉, 等. 基于区间数组合赋权的水库调度方案评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019, 44(4): 19-25, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.04.004.
- [18] 王子悦, 徐慧, 黄丹姿, 等. 基于熵权物元模型的长三角幸福河层次评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 69-74. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.010.
- [19] 唐金平, 朱志强, 刘世翔, 等. 基于贝叶斯理论的地下水水质评价模型及应用[J]. *节水灌溉*, 2018, 43(4): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2018.04.019.
- [20] 王程程, 孟凡丽, 杨梅, 等. 花溪-松柏山水库主要入库河流毒性污染状况及健康风险评价[J]. *中国科技论文*, 2020, 15(9): 1077-1084. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2020.09.017.
- [21] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 14-19. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.03.003.
- [22] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0125.
- [23] 周梦, 练继建, 程曦, 等. 南水北调中线总干渠冰期运行调度措施研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(21): 106-109. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.21.024.
- [24] 张翔, 李良, 吴绍飞. 淮河水量水质联合调度风险分析[J]. *中国科技论文*, 2014, 9(11): 1237-1242. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2014.11.006.
- [25] 金菊良, 陈磊, 陈梦璐, 等. 基于集对分析和风险矩阵的水资源承载力评价方法[J]. *人民长江*, 2018, 49(7): 35-41. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.07.008.
- [26] 阮本清, 韩宇平, 王浩, 等. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. *水利学报*, 2005, 36(8): 906-912. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.08.003.
- [27] 李雷, 王仁钟, 盛金保. 溃坝后果严重程度评价模型研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2006.01.001.
- [28] 赵然杭, 陈超, 李莹芹, 等. 南水北调东线工程山东段突发事故风险评估[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 180-186. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.029.

Study of comprehensive risk evaluation for inter-basin and long-distance water transfer project

TANG Hongjie^{1,2}, ZHAO Yawei^{3,4}

(1. General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China; 2. Jianghe Water Resources & Hydropower Consulting Center Co., Ltd., Beijing 100120, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

4. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin of Ministry of Water Resources (Financing), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Inter-basin and long-distance water transfer project is generally across multiple provinces and river basins, and normally has a lot of crossing terrain and river-channel-cross, and its hydrogeological environment is complex. Meanwhile, the water transfer project has a larger relationship with the development of local society, economy, ecology, and so on, which relates to lots of risk factors such as the risk of project operation, various types of buildings, flood, dispatching operation, and public safety emergencies. Every type of risk indicator exists at different levels, ranks, and arrangements, and there are both independence and correlation between different risk factors. Therefore, it is hard to evaluate the comprehensive risk of this kind of water transfer project.

Multiple-level structure models of risk integration and technology roadmap of risk comprehensive evaluation were proposed. A risk indicator system and risk level standard were built based on risk identification, and a risk integration method was designed. The steps of the method were as follows: The project was divided into several units. The weights of all risk indicators were confirmed. The comprehensive risk value of each unit was calculated. The risk level of the whole project was calculated based on the risk of all units. Considering the difficulty that different units have different risk factors, a risk indicator weight-correcting method was proposed. And the inter-basin and long-distance water transfer project risk integration software was developed based on the risk integration method that was proposed above.

A management area of an inter-basin and long-distance water transfer project was taken as an example to calculate and analyze. The management area was divided into 32 units. All risk indicator weights of every unit were corrected based on the initial weights. The comprehensive risk value of every unit was calculated. The overall risk level of the management area was II calculated by the developed risk integration software, and the calculation results of the grey clustering analysis method, fuzzy comprehensive evaluation method, radar chart method, matter-element theory, Bayesian formula method, Nemerow indicator method, and comprehensive indicator method shown high consistency. The number of risk indicators of all units was counted by different risk levels, and the result showed that the quantity relationship of different risk indicators is: II > I > III > IV, and the number of II risk indicators is larger than those of I, III, IV. This also verified the rationality of the calculation result.

The risk indicator system that was built considered the complexity and diversity of the inter-basin and long-distance water transfer project. The risk level standard that was formulated considered the risk possibility and seriousness. The risk integration method that was proposed firstly divided the project into several units, secondly calculated the comprehensive risk value of each unit, and finally got the overall risk of the project, and it handled the problem that it is difficult to evaluate the overall risk level of the inter-basin and long-distance water transfer project. The actual case analysis showed that the risk levels of a management area calculated by the 7 methods were all II which was reasonable after the analysis.

Key words: inter-basin and long-distance water transfer project; comprehensive evaluation; risk; integration method; software development

(上接第 28 页)

Studies had shown that water and carbon cycles were closely linked in nature through plant photosynthesis and evapotranspiration, and were closely related to the supply-use-consumption-discharge process of water resources and energy in the economy and society. The implementation of the "double carbon" strategy had a certain impact on both supply and demand of water resources. The supply side was mainly reflected in the spatial and temporal distribution of precipitation and runoff, and the demand side was mainly reflected in the adjustment of industrial structure and layout and the associated water demand changes. In view of the natural cycle change of water-carbon and its impact under the "double carbon" strategy, it should be to further strengthen the research and formulate adaptive measures, and at the same time strengthen the active regulation of water resources and energy supply-use-consumption-discharge process in the economic and social field, so as to realize the harmonious unity of water resources-economic society-ecological environment, and provide support for the realization of the "double carbon" goal and the high-quality development of economy and society.

Key words: "double carbon" strategy; water-carbon coupling; water circulation; water demand situation