

何山,王辉,程卫帅,等.调水工程建设期安全-进度-投资系统风险分析:以引江济淮工程(河南段)为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(2):348-358. HE S, WANG H, CHENG W S, et al. Risk analysis of safety-progress-investment system during the construction of water diversion project: Taking Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section) as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 348-358. (in Chinese)

调水工程建设期安全-进度-投资系统风险分析

——以引江济淮工程(河南段)为例

何山¹,王辉²,程卫帅¹,刘渊²,范嘉懿²,王永强¹,桑连海¹

(1. 长江科学院水资源综合利用研究所, 武汉 430010; 2. 河南省引江济淮工程有限公司, 郑州 450000)

摘要:以引江济淮工程(河南段)为例,在确定安全-进度-投资系统风险评价指标体系的基础上,基于层次分析-模糊综合评价方法分析安全、进度、投资的单项风险;在考虑工程建设期安全、进度、投资的相互影响后,基于改进的综合风险评价方法分析安全-进度-投资系统风险。结果表明:当分析单项风险时,安全、进度和投资风险的评价结果均为一般风险;当分析系统风险时,得到安全风险>进度风险>投资风险;进一步分析指标体系中的准则层和指标层,安全风险的现场风险中施工技术方案风险排序第一,是后续风险管控的重点。本研究为提高工程建设期安全-进度-投资系统风险的可靠性、降低风险事件的发生提出了理论和技术参考。

关键词:施工风险;改进综合风险评价法;安全-进度-投资系统风险;调水工程;引江济淮工程(河南段)

中图分类号: TV51 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0036

调水工程是解决地区水资源分配不均、缓解水资源短缺矛盾的重要手段,可以有效提高区域水资源配置和水安全保障能力,很大程度上改善了受水区供水状况,是区域协调发展的金纽带^[1-2];同时骨干调水工程也是国家水网的重要通道,对加快构建国家水网提供了有力支撑^[3]。调水工程通常跨越多个行政区和流域,是典型的复杂系统工程,与区域社会经济气候环境等方面存在着密切联系,其施工期潜在着各种风险^[4-5]。开展调水工程施工阶段风险分析和评价是整个工程建设期的重要内容,将有利于项目管理者把握工程整体风险水平,为后续制定风险管控对策和保障措施提供基础^[6-7]。

调水工程建设期的风险有很多,总体可以归纳为安全风险、进度风险和投资风险等。目前,已有很多学者^[8-11]对调水工程建设项目的安全、进度、投资风险分别进行定性的研究或定量的评价。在安全风险分析方面,刘帅等^[12]基于模糊综合评价和BP神经网络建立水电工程施工安全隐患评价模型,

构建具有多层次和多指标特性的水电工程施工安全隐患诊断指标体系,并对某水电工程施工安全风险进行了评价。在进度风险分析方面:何清华等^[13]基于113份调查问卷和实例,采用贝叶斯网络分析了大型复杂工程项目群的进度风险,识别出进度风险的关键敏感因素和最大致因链;王彦涛^[14]采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)构建施工进度风险评价模型,通过对各级指标一致性检验得到各指标权重,基于指标权重对施工进度风险进行评价。在投资风险分析方面:孙会堂^[15]采用层次分析法灰色关联评价模型评价河道治理投资风险;范向辉^[16]分析郑州市10年间主要材料价格的变化及对工程建设和工程造价的影响。

目前的研究大多都是对单项风险进行分析,从整体上对安全-进度-投资系统风险进行综合分析的研究^[17-18]很少,也没有考虑到各项风险之间的相关关系。在工程建设期,只考虑单项风险不利于工程项目总体管控。并且工程建设期安全、进度、投资

收稿日期:2023-08-17 修回日期:2023-11-16 网络出版时间:2024-03-14

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240312.1814.008

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000202);湖北省自然科学基金会青年项目(2022CFB573);引江济淮工程(河南段)工程科研服务项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021004)

作者简介:何山(1991—),女,河南信阳人,博士(后),主要从事水利水电工程研究。E-mail: jinsefengbao@163.com

之间存在显而易见的相互作用关系^[19],例如发生安全事故很可能影响工程建设进度,工程建设进度滞后也将影响投资计划进度,投资计划执行不到位将影响工程进度,还可能引发额外的安全事故^[20]。

本研究以引江济淮工程(河南段)为研究区域,分析安全、进度、投资单项风险,在分析安全、进度、投资风险之间相关性的基础上,构建安全-进度-投资系统风险评价指标体系,建立了改进的综合风险评价方法,对安全-进度-投资系统风险进行综合评价,明确系统风险等级,以期为引江济淮工程河南段建设期安全-进度-投资风险决策提供参考。

1 研究区概况

引江济淮工程(河南段)项目属引江济淮工程江西北送段中的一部分,为新建项目。该工程主要通过西淝河向河南省受水区供水,工程任务以城乡供水为主、兼顾改善水生态环境,工程等级为I等,工程规模为大(I)型。项目建设地点涉及周口市的郸城县、鹿邑县及商丘市的柘城县、睢阳区、虞城县、夏邑县共6个县(区)。工程总体布局主要包括输水河道、输水管道和调蓄水库等内容^[21-22]。

该项目属于长距离调水工程,沿线所经地区环境复杂多变,穿越公路、河流等各类交叉建筑物众多,部分建筑物结构复杂、施工难度大;程序流程涉及多个政府部门,制约工程进展。工程建设期可能发生的大部分风险事件主要体现在安全、进度、投资风险方面,需开展引江济淮工程河南段建设期安全-进度-投资系统风险分析工作,以提高工程安全可靠,降低风险事件发生概率。

2 研究方法

2.1 安全-进度-投资系统风险评价指标体系

影响安全-进度-投资系统风险的因素有很多,各种因素之间存在相互影响,建立完善的系统风险评价指标体系是风险分析的关键。

2.1.1 安全风险评价指标体系

工程项目建设期的安全因素主要有人、物、技术、环境及管理。结合引江济淮工程(河南段)安全风险源清单、风险识别结果、施工质量缺陷情况和安全风险源隐患情况,参照文献资料^[8-9]以及专家经验对安全风险进行筛选,过滤掉公认影响程度小的风险,该工程建设期安全风险可以分解为人员风险、材料设备风险和现场风险,其中施工质量不足是施

工人员素质不高、操作失误等导致的。安全风险评价指标体系见图1。

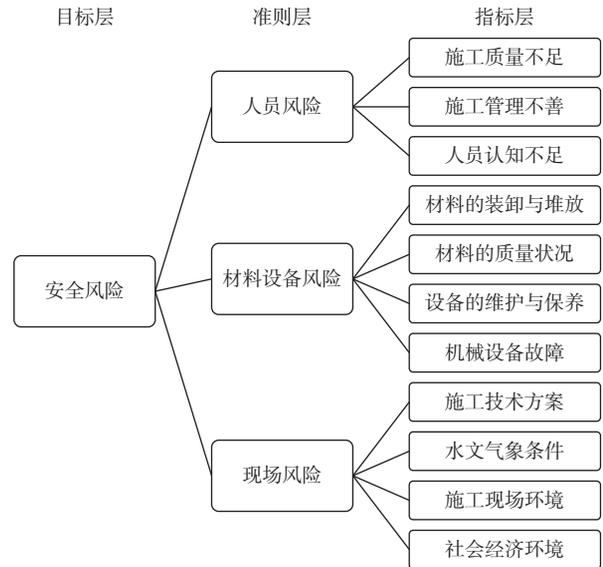


图1 引江济淮工程(河南段)建设期安全风险评价指标体系
Fig. 1 Index system for safety risk evaluation during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section)

2.1.2 进度风险评价指标体系

影响施工进度的因素有人、技术、材料、设备、资金、水文地质与气象、其他环境和社会因素以及其他难以预料的因素。根据风险评价指标选取原则,结合引江济淮工程(河南段)建设期进度风险源清单、影响进度的问题、工期调整情况,参照文献资料^[10,13-14]以及专家经验对进度风险进行筛选,结合该项目建设期实际情况,过滤掉公认影响程度小的风险,形成进度风险评价指标体系见图2。

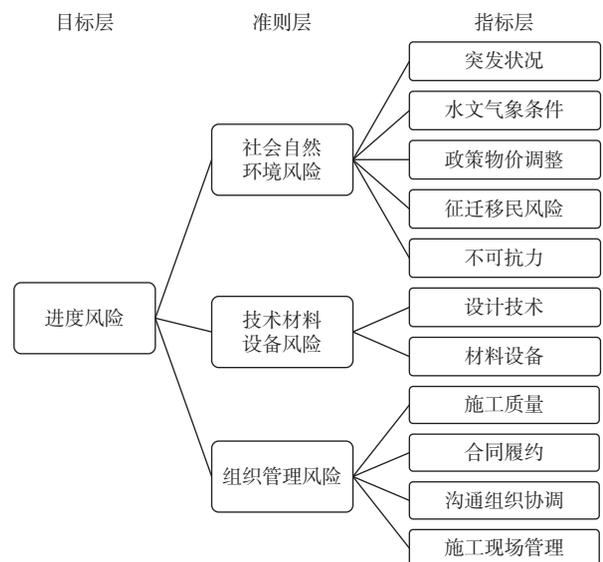


图2 引江济淮工程(河南段)建设期进度风险评价指标体系
Fig. 2 Index system for progress risk evaluation during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section)

2.1.3 投资风险评价指标体系

根据风险评价指标选取原则,结合引江济淮工程(河南段)建设期投资风险源清单、投资实施计划调整情况、投资计划执行的制约因素以及施工期设计变更情况,参照文献资料^[11]以及专家经验对投资风险进行筛选,过滤掉公认影响程度小的风险,结合该项目施工期投资情况和工程特点,形成投资风险评价指标体系见图 3。

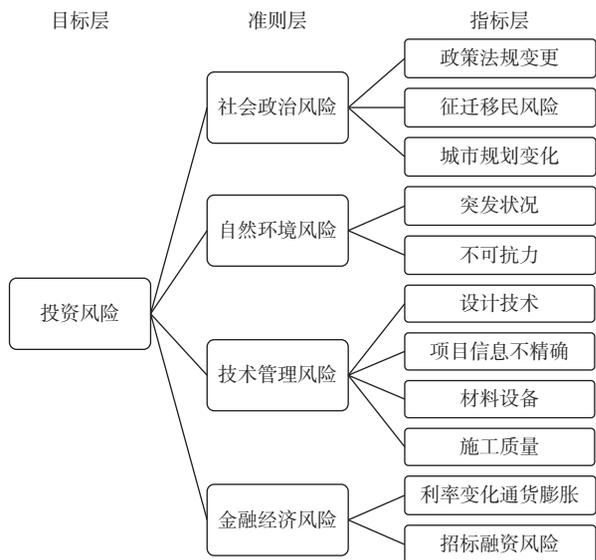


图 3 引江济淮工程(河南段)建设期投资风险评价指标体系
Fig. 3 Index system for investment risk evaluation during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

2.2 安全-进度-投资系统风险评价方法

在建立的风险评价指标体系的基础上,采用层次分析-模糊综合评价方法分析安全、进度、投资风险的单项风险及其系统风险。其基本流程为:采用层次分析法分配指标权重;采用模糊综合确定隶属函数。在此基础上采用改进的综合风险评价方法进行系统风险的分析。

2.2.1 基于层次分析法的指标权重分配

层次分析法可以用于分析风险因素以及风险层级间存在的决策结构,并对各施工风险因素进行权重赋值^[23]。其步骤如下:确定判断矩阵,构建判断矩阵可以将定性分析转换为定量分析,将主观信息量化,采用相对重要程度标度法,通过两两比较同层级各指标对上层级指标的相对重要程度,并采用九标度表来量化,得到各因子数量值并构成判断矩阵^[14];计算判断矩阵特征值和特征向量;当判断矩阵通过一致性检验后,判断矩阵所对应的特征向量的

各分量,即为各指标的权重 W 。

2.2.2 基于 LEC 法的单项风险评价

根据《河南省水利水电工程施工安全风险辨识管控与隐患排查治理双重预防体系建设实施细则》和《水利水电工程施工危险源辨识与风险评价导则(试行)》,结合引江济淮工程河南段现场环境和作业的实际状况,采用基于作业条件危险性评价法(LEC)的单项风险评价方法确定安全风险评价价值^[24-25],得到各个安全生产隐患的安全风险评价价值。将引江济淮工程河南段建设期施工安全风险水平分为 4 个等级,重大风险、较大风险、一般风险、低风险^[26]。风险度 R 计算公式可表示为

$$R = L \times E \times C$$

式中: L 为事故或危险事件的可能性大小; E 为人体暴露于危险环境的频率; C 为危险严重程度。 L 、 E 、 C 的取值参考文献^[26]。

2.2.3 基于风险矩阵法的单项风险评价

由于 LEC 法不适用于进度风险和投资风险,在参考相关文献后,采用风险矩阵法^[27]对工程建设期进度风险和投资风险进行评价。根据层次关系和级别,依次揭示各层级的风险,通过综合考虑风险概率和风险损失后果确定风险等级。该方法简洁、直观且不易遗漏。 R 计算公式^[28]可表示为

$$R = L \times S$$

式中: L 为风险因素发生的概率; S 为风险损失后果。

风险发生的概率和风险损失后果分成 5 个等级,见表 1。形成风险矩阵后,根据定级方法的风险评估矩阵将风险评价结果 R 分成 4 个等级。 R 的取值范围为 0.004~6.400。

表 1 风险发生概率和损失后果
Tab. 1 The grade of probability and consequences for risk

风险发生概率 L		风险损失后果 S		风险等级 R	
等级	定量	等级	定量	等级	定量
不可能	0.02	可忽略	0.20	I (低)	[0.004, 0.100]
较低	0.20	较小	2.00	II (一般)	[0.1, 1.0]
中等	0.40	中等	4.00	III (较大)	[1.0, 3.0]
较高	0.60	严重	6.00	IV (重大)	[3.0, 6.4]
频繁	0.80	非常严重	8.00		

风险概率和风险损失后果的评价采用基于模糊综合评判原理的隶属度计算^[5]。在确定因素集和评价集后,根据专家打分和文献数据,采用逐级估量法和模糊集法,在考虑所有因素对评价风险因素的影响后,对施工各风险概率和风险损失后果打分,

利用加权平均法对数据进行处理,得到指标层的评价结果。

2.2.4 改进的综合风险评价

单项安全风险分析采用LEC法,单项进度和投资风险分析采用风险矩阵法。这2个方法存在统计维度不一致的问题,因此先将安全、进度、投资的单项风险进行归一化处理。然后根据文献[10],将层次分析法确定的权重向量(W)和指标层的单项风险评价结果(R)进行运算,可以得出综合风险评价结果。风险度计算公式可表示为

$$R' = R \times W$$

2.3 安全-进度-投资系统分析

建设期安全、进度、投资风险之间的关系是相辅相成、不可分割的。工程安全是进度和投资的必要条件,工程出现安全问题将面临返工、整改,产生负进度,不仅直接造成成本增加,且更可能造成企

业无形资产的损失;投资计划执行不到位必然影响工程进度,还可能引发额外的安全事故。因此,在项目建设阶段,江济淮工程河南段项目所面临的安全、进度、投资风险不是独立、静态的,风险间存在着相互依赖、相互影响和相互作用关系;且受到系统内部和外部环境的干扰,导致工程整体风险的强度和性质发生改变,这也是导致风险突变的重要诱因,需要对安全-进度-投资系统风险进行综合分析。本研究对安全、进度、投资风险进行整合,构建安全-进度-投资系统风险评价指标体系见图4,可以看出,安全、进度、投资风险存在共同影响因素。比如:汛期大暴雨(水文气象条件)可能会导致正在施工的工程被破坏而影响安全风险,也会导致工程延期而影响进度风险;材料更新设备故障会同时影响安全风险、进度风险和投资风险。

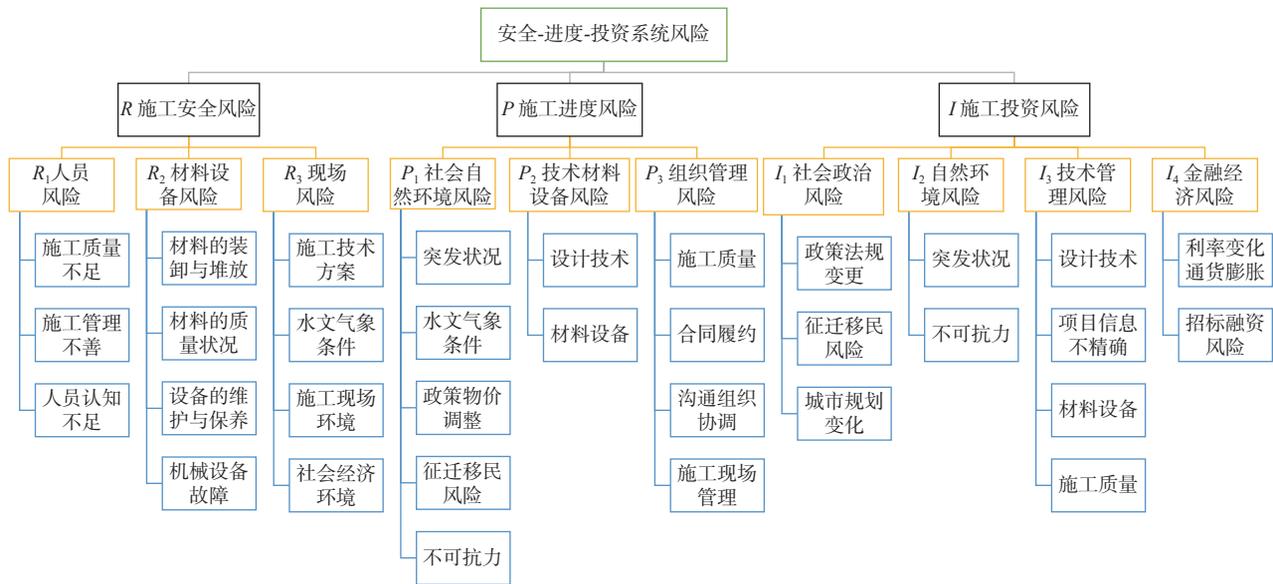


图4 引江济淮工程(河南段)建设期安全-进度-投资系统风险评价指标体系

Fig. 4 The index system of safety-progress-investment systemic risk evaluation during construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

3 结果分析

3.1 安全风险分析

3.1.1 权重确定

权重的确定是根据收集整理的引江济淮工程(河南段)建设期各施工标段安全生产隐患整改台账,将每个安全生产隐患情况按照图1分类,按照指标层进行统计,可得表2指标层的权重。表2中无安全生产隐患数据的,采用层次分析法确定权重。得到指标层对准则层和准则层对目标层的判断矩阵后,采用一致性检验公式进行检验。对判断矩阵的

特征向量进行计算,并进行归一化处理,即可确定基于层次分析法的指标权重(表2),比如 $W_s=(0.506, 0.214, 0.280)$ 。

3.1.2 隶属度计算

采用基于LEC法的单项风险评价,确定每个安全隐患的评价等级;根据安全隐患的分类结果,得到各个指标层的指标评价等级情况,即各个指标层中的安全隐患处于低风险、一般风险、较大风险和重大风险的概率,从而得到指标层 S_1 、 S_2 、 S_3 的单因素评价隶属度,见表2。

表 2 引江济淮工程(河南段)建设期安全风险评价

Tab. 2 Safety risk assessment during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

目标层	准则层	权重	指标层	权重	概率				指标层 风险	准则层 风险	目标层 风险
					低风险	一般风险	较大风险	重大风险			
人员风险 S_1	0.506	施工质量不足 S_{11}	0.745	0.88	0.11	0.01	0	45.9	64.2 (低风险)		
		施工管理不善 S_{12}	0.102	0.82	0.18	0	0	49.4			
		人员认知不足 S_{13}	0.153	0.31	0.05	0.64	0	170.2			
材料设备 风险 S_2	0.214	材料的装卸与堆放 S_{21}	0.095	0.91	0.09	0	0	42.2	69.9 (低风险)	84.7 (一般风险)	
		材料的质量状况 S_{22}	0.009	1.00	0	0	0	35.0			
		设备的维护与保养 S_{23}	0.741	0.57	0.41	0.02	0	71.9			
		机械设备故障 S_{24}	0.155	0.44	0.56	0	0	79.8			
现场风险 S_3	0.280	施工技术方案 S_{31}	0.613	0	0.67	0.33	0	156.3	131.1 (一般风险)		
		水文气象条件 S_{32}	0.099	0.16	0.37	0.45	0.02	166.0			
		施工现场环境 S_{33}	0.223	0.83	0.17	0.01	0	51.0			
		社会经济环境 S_{34}	0.065	0.28	0.56	0.15	0.01	115.1			

3.1.3 安全风险模糊综合评价

根据图 1 的工程施工安全风险评价指标体系,引江济淮工程(河南段)建设期施工安全风险评价指标因素集 $S=[S_1, S_2, S_3]$ 。结合 LEC 法,取施工安全风险评价等级 $V=[\text{低风险, 一般风险, 较大风险, 重大风险}] = [35, 115, 240, 490]$ 。

采用多级模糊综合评价方法,得到指标层的单项风险评价结果(表 2 第十列)和目标层 S 的模糊隶属度矩阵,表达式为

$$R_S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{S_1} \cdot R_{S_1} \\ W_{S_2} \cdot R_{S_2} \\ W_{S_3} \cdot R_{S_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.787 & 0.108 & 0.105 & 0.000 \\ 0.586 & 0.399 & 0.015 & 0.000 \\ 0.219 & 0.522 & 0.259 & 0.003 \end{bmatrix}$$

安全风险评价结果为: $S = W_S \times R_S = [0.585 \ 0.286 \ 0.129 \ 0.001]$, 则 $G_S = S \times V^T = 84.68$, 属于一般风险。

本研究采用基于建设期各施工标段安全生产隐患整改台账得到的大量安全生产隐患现场数据,计算得到指标层隶属度,而不是利用调查问卷或者专家打分,因此本研究具有可信性。

3.2 进度风险分析

3.2.1 权重确定

基于进度风险评价指标体系,结合工程建设期进度风险特点,参考 Saaty 标度法^[5,14]对工程建设期进度风险建立判断矩阵,确定指标权重,并通过一致性检验。

目标层为进度风险(P),准则层有社会自然环境风险(P_1)、技术材料设备风险(P_2)、组织管理风险(P_3)这 3 个要素。依据项目特点、参考其他项目及相关文献,确定准则层对目标层和指标层对准则层的判断矩阵。比如参考王彦涛^[14],组织管理风险>社会政策风险>技术材料设备风险。采用一致性检验公式计算,可得矩阵 P, P_1, P_2, P_3 的最大特征值 λ_{\max} 、一致性指标 CI 、一致性比例 CR , 计算结果见表 3。由表可知,目标层和准则层指标判断矩阵的 CR 均小于 0.1, 说明指标矩阵均通过一致性检验。

表 3 进度风险指标一致性检验结果

Tab. 3 Test results of index consistency for progress risk

指标	P	P_1	P_2	P_3
λ_{\max}	3.009 2	5.014 2	2.000	4.045 8
CI	0.004 6	0.003 6	0	0.015 3
CR	0.008 8	0.003 2	0	0.017 2

对判断矩阵的特征向量进行计算,并进行归一化处理,即可得出基于层次分析法的进度风险指标权重见表 4 第三列和第五列。

3.2.2 进度风险模糊综合评价

基于模糊理论,采用风险矩阵法(表 1),选取 10 名熟悉现场施工经验丰富的水电工程专家进行问卷调查,由专家根据工程及环境等具体情况,对引江济淮工程(河南段)施工过程的进度风险发生概率及进度风险发生对工程造成的损失程度进行判断赋值,并对数据进行处理^[10]。由此得到进度风险

评价结果见表4第六至九列。那么,进度风险评价 $[1.080 \ 0.176]^T=0.806$, 风险等级为 II (一般风险)。结果为 $P = W_p \times R_p = [0.539 \ 0.164 \ 0.297] \times [1.069$

表4 引江济淮工程(河南段)建设期进度风险评价

Tab. 4 Progress risk assessment during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

目标层	准则层	权重	指标层	权重	L	S	R	风险等级	准则层风险	目标层风险
进度 风险P	社会自然环境风险P ₁	0.539	突发状况P ₁₁	0.186	0.20	4.0	0.800	II	1.069 (III)	0.806 (II)
			水文气象条件P ₁₂	0.467	0.40	2.0	0.800	II		
			政策物价调整P ₁₃	0.096	0.02	2.0	0.040	I		
			征迁移民风险P ₁₄	0.202	0.60	4.0	2.400	III		
			不可抗力P ₁₅	0.049	0.20	6.0	1.200	III		
	技术材料设备风险P ₂	0.164	设计技术P ₂₁	0.667	0.40	4.0	1.600	III	1.080 (III)	
			材料设备P ₂₂	0.333	0.02	2.0	0.040	I		
	组织管理风险P ₃	0.297	施工质量P ₃₁	0.184	0.20	4.0	0.800	II	0.176 (II)	
			合同履行P ₃₂	0.097	0.02	0.2	0.004	I		
			沟通组织协调P ₃₃	0.432	0.02	2.0	0.040	I		
			施工现场管理P ₃₄	0.287	0.20	0.2	0.040	I		

3.3 投资风险分析

3.3.1 权重确定

对于投资风险,同理进度风险,基于投资风险评价指标体系,结合工程建设期投资风险特点,对工程建设期投资风险建立判断矩阵,确定指标权重,并通过一致性检验。

目标层为投资风险(I),准则层有社会政治风险(I₁)、自然环境风险(I₂)、设计管理风险(I₃)、金融经济风险(I₄)这4个要素。依据项目特点、参考其他项目及相关文献,确定投资风险各层次的判断矩阵。

一致性检验结果见表5,可知判断矩阵的CR均小于0.1,说明指标矩阵均通过一致性检验。

表5 投资风险指标一致性检验结果

Tab. 5 Test results of index consistency for investment risk

指标	I	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
λ _{max}	4.096 8	3.009 2	2.000	4.003 0	2.000
CI	0.032 3	0.004 6	0	9.905 9e-04	0
CR	0.036 3	0.008 8	0	0.001 1	0

对判断矩阵的特征向量进行计算,并进行归一化处理,即可得出基于层次分析法的投资风险指标权重见表6第三列和第五列。

表6 引江济淮工程(河南段)建设期投资风险评价

Tab. 6 Results of investment risk assessment during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

目标层	准则层	权重	指标层	权重	L	S	R	风险等级	准则层风险	目标层风险
投资 风险I	社会政治风险I ₁	0.070	政策法规变更I ₁₁	0.324	0.02	2.0	0.040	I	1.457 (III)	0.802 (II)
			征迁移民风险I ₁₂	0.587	0.60	4.0	2.400	III		
			城市规划变化I ₁₃	0.089	0.20	2.0	0.400	II		
	自然环境风险I ₂	0.483	突发状况I ₂₁	0.250	0.20	4.0	0.800	II	1.100 (III)	
			不可抗力I ₂₂	0.750	0.20	6.0	1.200	III		
	技术管理风险I ₃	0.186	设计技术I ₃₁	0.315	0.40	4.0	1.600	III	0.852 (II)	
			项目信息不精确I ₃₂	0.063	0.02	0.2	0.004	I		
			材料设备I ₃₃	0.197	0.02	2.0	0.040	I		
			施工质量I ₃₄	0.425	0.20	4.0	0.800	II		
	金融经济风险I ₄	0.261	利率变化通货膨胀I ₄₁	0.333	0.20	0.2	0.040	I	0.040 (I)	
			招标融资风险I ₄₂	0.667	0.02	2.0	0.040	I		

3.3.2 投资风险模糊综合评价

基于模糊理论,采用风险矩阵法(表1),选取相同的水电工程专家进行问卷调查,由专家根据工程

及环境等具体情况,对引江济淮工程(河南段)施工过程的投资风险发生概率及投资风险发生对工程造成的损失程度进行判断赋值,并对数据进行处理^[10]。

由此得到投资风险评价结果见表 6 第六至九列。那么,投资风险评价结果为 $I = W_I \times R_I = [0.070 \ 0.483 \ 0.186 \ 0.261] \times [1.457 \ 1.100 \ 0.852 \ 0.040]^T = 0.802$, 风险等级为 II (一般风险)。

3.4 安全-进度-投资系统风险分析

以上研究采用层次分析法基于相对重要程度标

度法分别确定目标层、准则层和指标层的判断矩阵,通过一致性检验后,分别得到目标层、准则层和指标层的权重。在确定安全、进度和投资的单项风险评价结果后,采用改进的综合风险评价方法,即可得到引江济淮工程(河南段)建设期安全-进度-投资系统风险综合评价结果,见表 7。

表 7 引江济淮工程(河南段)建设期安全-进度-投资系统风险综合评价
Tab. 7 The comprehensive evaluation of safety-progress-investment systemic risk during the construction period of Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

目标层	权重	准则层	指标层	权重 W	单项风险 R	归一化处理	改进 $R(10^{-3})$	排序	改进准则层风险(10^{-3})	改进目标层风险				
安全风险 S	0.824	人员风险 S_1	施工质量不足 S_{11}	0.310 3	45.85	0.046 7	1.45	13	12.583	0.058				
			施工管理不善 S_{12}	0.042 5	49.40	0.050 3	2.14	11						
			人员认知不足 S_{13}	0.064 0	170.20	0.173 2	11.08	2						
		材料设备风险 S_2	材料的装卸与堆放 S_{21}	0.016 7	42.20	0.042 9	0.72	18						
			材料的质量状况 S_{22}	0.001 5	35.00	0.035 6	0.05	24						
			设备的维护与保养 S_{23}	0.131 8	71.90	0.073 2	9.58	3						
			机械设备故障 S_{24}	0.027 4	79.80	0.081 2	2.23	10						
		现场风险 S_3	施工技术方案 S_{31}	0.141 7	156.25	0.159 0	22.56	1						
			水文气象条件 S_{32}	0.022 9	165.95	0.168 9	3.87	5						
			施工现场环境 S_{33}	0.051 6	51.00	0.051 9	2.68	8						
			社会经济环境 S_{34}	0.015 0	115.10	0.117 1	1.76	12						
		安全 进度 投资 系统 风险	0.116	社会自然环境风险 P_1	突发状况 P_{11}	0.011 6	0.80	0.103 0			1.19	14	2.632	0.012
					水文气象条件 P_{12}	0.029 1	0.80	0.103 0			3.00	7		
					政策物价调整 P_{13}	0.006 0	0.04	0.005 2			0.03	27		
征迁移民风险 P_{14}	0.012 6				2.40	0.309 1	3.88	4						
不可抗力 P_{15}	0.003 1				1.20	0.154 6	0.47	21						
技术材料设备风险 P_2	设计技术 P_{21}			0.012 6	1.60	0.206 1	2.60	9						
	材料设备 P_{22}			0.006 3	0.04	0.005 2	0.03	26						
组织管理风险 P_3	施工质量 P_{31}			0.006 3	0.80	0.103 0	0.65	19						
	合同履行 P_{32}			0.003 3	0	0.000 5	0	32						
	沟通组织协调 P_{33}			0.014 9	0.04	0.005 2	0.08	22						
	施工现场管理 P_{34}			0.009 8	0.04	0.005 2	0.05	25						
投资风险 I	0.060			社会政治风险 I_1	政策法规变更 I_{11}	0.001 4	0.04	0.005 4	0.01	31	0.085	0.006		
					征迁移民风险 I_{12}	0.002 5	2.40	0.325 9	0.81	15				
					城市规划变化 I_{13}	0.000 4	0.40	0.054 3	0.02	29				
		自然环境风险 I_2	突发状况 I_{21}	0.007 2	0.80	0.108 6	0.79	16						
			不可抗力 I_{22}	0.021 7	1.20	0.163 0	3.54	6						
		技术管理风险 I_3	设计技术 I_{31}	0.003 5	1.60	0.217 3	0.76	17						
			项目信息不精确 I_{32}	0.000 7	0	0.000 5	0	33						
			材料设备 I_{33}	0.002 2	0.04	0.005 4	0.01	30						
			施工质量 I_{34}	0.004 7	0.80	0.108 6	0.51	20						
		金融经济风险 I_4	利率变化通货膨胀 I_{41}	0.005 2	0.04	0.005 4	0.03	28						
			招标融资风险 I_{42}	0.010 5	0.04	0.005 4	0.06	23						

本研究采用层次分析法确定目标层安全、进度和投资风险的权重,并在层次分析法中采用主客观相结合的相对重要程度标度法和文献数据信息确定安全、进度和投资风险的相对重要程度。对一定领域研究的次数在一定程度上可以展示出学者们对该领域的重视和关注程度,也可反映这个领域的重要程度。因此,本研究分别查询调水工程建设期安全、进度和投资风险的文献,以“安全风险”和“施工”、“进度风险”和“施工”、“投资风险”和“施工”为主题,以水利水电工程为学科,在中国知网(CNKI)检索中文文献,分别检索到 728、102、53 篇。由此形成判断矩阵,通过一致性检验后,得到目标层安全、进度和投资风险的权重为(0.824, 0.116, 0.060)。

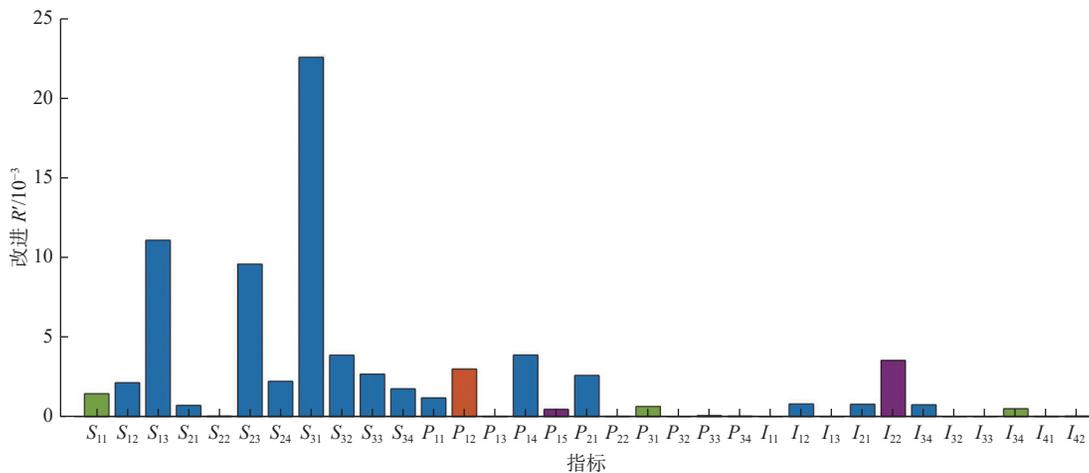


图5 引江济淮工程(河南段)建设期改进的安全-进度-投资系统风险综合评价结果

Fig. 5 The improved comprehensive evaluation results of safety-progress-investment systemic risk during the construction period for Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project(Henan section)

王志玮等^[29]在研究基于全生命周期的高速公路工程项目风险时得到进度风险、安全风险和质量风险的权重分别为 0.15、0.06 和 0.28, 如果将安全 和质量风险合并, 同样得到安全质量风险>进度 风险。咎彦国^[30]将建筑工程项目施工阶段安全 风险的影响因素分为 5 大类: 人的不安全状态、 物的不安全状态、技术工艺上的缺陷、组织管 理上的不足、环境及其他方面不适应状态, 并 借鉴文献中调查统计的相关数据, 确定了 5 大 类因素的权重为(0.26, 0.18, 0.20, 0.20, 0.16)。 当将组织管理风险合并入人员风险、技术工艺 风险和 环境风险合并为现场风险时, 同样得到 人员风险>现场风险>材料设备风险(物)。虽 然不同工程在构建风险评价指标体系时采用 的指标有差异、指标权重的赋值也不同, 但是 经过对比分析, 本研究与其他某些工程建设 期风险分

安全、进度和投资的单项风险评价结果分别 为 84.700、0.806 和 0.802, 很明显由于采用的 方法不同, 得到的结果存在统计维度不一致 的问题, 需要对单项风险评价结果进行归一 化处理。得到改进的安全风险为 0.058, 改进 的进度风险为 0.012, 改进的投资风险为 0.006, 故安全风险>进度风险>投资风险。

由表 7 和图 5 可知, 在安全-进度-投资系 统风险中, 安全风险的现场风险中施工技术方 案(S₃₁)风险最高, 排序第一, 其次是安全风 险的人员风险中人员认知不足(S₁₃)、材料 设备风险中设备的维护与保养(S₂₃)。可见 安全风险的影响因素对引江济淮工程(河南 段)施工的影响最大。投资风险的技术管理 风险中项目信息不精确(I₃₂)风险最小, 排 序最后。

析研究结果具有一定程度上的一致性, 这也 证明了本研究的合理性。

从图 5 也可以看出进度风险中不可抗力 (P₁₅)与投资风险中不可抗力(I₂₂)的评价结 果不一致, 进度风险中水文气象条件(P₁₂) 与安全风险中水文气象条件(S₃₂)的评价结 果不一致, 安全风险中材料的质量状况(S₂₂) 与进度风险中材料设备(P₂₂)、投资风险 中材料设备(I₃₃)的评价结果也不一致, 安全 风险中施工质量不足(S₁₁)与进度风险中施 工质量(P₃₁)、投资风险中施工质量(I₃₄) 的评价结果也不一致。这是因为目前的风险 评价虽然考虑了系统风险的失效模式, 但是 没有考虑安全-进度-投资系统风险之间共 因失效问题, 这些风险还存在着除了共因 失效基本事件以外的其他单独失效基本事 件。此时, 需要识别安全、进度和投资风险 之间的关系, 辨识出

导致安全、进度、投资风险中的两项或三项风险失效的事件,即共因失效事件。因此,在以后的研究中还需要进一步对安全-进度-投资系统风险的共因失效模式和事件进行分析研究。

4 结论

基于层次分析-模糊综合评价方法,分析了引江济淮工程(河南段)安全、进度、投资的单项风险。由于只考虑单个风险不利于工程项目总体管控,在此基础上,继续对安全-进度-投资系统风险进行了综合分析。结果显示:只考虑单项分项时,进度风险大于投资风险;综合考虑安全-进度-投资系统风险时,总体上安全风险最大,与工程实际风险情况基本相符,由此可认为该评价结果合理、可行。

通过本研究发现,安全、进度、投资风险间相互影响作用体现在他们之间存在着共同影响因素,即共因失效基本事件,在后续的研究中需要对共因失效问题进行分析研究。

在分析安全-进度-投资系统风险时,安全风险与进度和投资风险的分析存在统计维度不一致的问题,为此本文提出一种改进的综合风险评价方法,对系统风险进行综合分析。该研究方法为安全-进度-投资系统风险的协同管控提供了理论和技术参考。

参考文献:

- [1] 王兴菊,孙杰豪,赵然杭,等.基于可变模糊集理论的跨流域调水工程水资源优化调度[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 85-92,100. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0118.
- [2] 张慧,刘永强,汪小进,等.基于熵组合权重的调水工程项目管理模式选择[J].*南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1207-1211. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2015.06.039.
- [3] 徐宗学,庞博,冷罗生.河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 757-764. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0077.
- [4] 程琨,胡小梅,李德,等.引江济汉工程施工风险控制与管理[J].*人民长江*, 2016, 47(2): 56-58,66. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.02.013.
- [5] 赵延喜,徐卫亚.基于AHP和模糊综合评判的TBM施工风险评估[J].*岩土力学*, 2009, 30(3): 793-798. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.03.017.
- [6] 陈志鼎,张扬,闫海兰.基于熵权和改进AHP的中小型水电工程施工风险评估模型及应用[J].*水电能源科学*, 2016, 34(7): 171-174, 162. DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2016-07-043.
- [7] 强跃,何运祥,刘光华.基于模糊层次分析法的中小型水利水电工程施工风险评价[J].*施工技术*, 2013, 42(21): 51-54.
- [8] 孙开畅,蒙彦昭,颜鑫,等.基于PLS-SEM的水利工程施工安全分析[J].*水利水电技术*, 2019, 50(6): 115-119. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.06.015.
- [9] 汪涛,廖彬超,马昕,等.基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法[J].*土木工程学报*, 2010, 43(S2): 384-391. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.s2.066.
- [10] 李晓英,田佳乐,郑景耀,等.水利工程施工进度风险分析[J].*水利水电技术*, 2018, 49(6): 141-147. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.06.020.
- [11] 刘国东.工程项目投资风险管理研究[D].保定:河北农业大学, 2005.
- [12] 刘帅,盛金保,王昭升,等.基于模糊神经网络的水电施工安全隐患评价[J].*水利水运工程学报*, 2020, 179(1): 105-111. DOI: 10.12170/20181031004.
- [13] 何清华,杨德磊,罗岚,等.基于贝叶斯网络的大型复杂工程项目群进度风险分析[J].*软科学*, 2016, 30(4): 120-126,139. DOI: 10.13956/j.ss.1001-8409.2016.04.26.
- [14] 王彦涛.基于AHP的施工进度风险评价模型研究及应用[J].*现代隧道技术*, 2022, 59(S2): 5-12. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.S2.02.
- [15] 孙会堂.层次分析法灰色关联评价模型评价河道治理投资风险[J].*水利技术监督*, 2019, 148(2): 79-81, 163. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2019.02.026.
- [16] 范向辉.水利工程建设投资风险[J].*河南水利与南水北调*, 2015, 286(16): 85-86. DOI: CNKI:SUN:HNBD.0.2015-16-046.
- [17] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0004.
- [18] 黄锦林,杨光华,王盛.堤防工程安全综合评价方法[J].*南水北调与水利科技*, 2015, 13(5): 1011-1015. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2015.05.040.
- [19] 赵云,张向东,娄鹏.大型基坑项目风险评估与投资安全的经济分析[J].*水利水电技术*, 2011, 42(2): 66-70. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.02.007.

- [20] 马艳红. 浅论南水北调工程质量、进度、效益间的辩证关系[J]. *科技经济市场*, 2014(10): 80. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3788.2014.10.058.
- [21] 左其亭, 杨振龙, 路振广, 等. 引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 39-47,75. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0005.
- [22] 陶洁, 张李婷, 左其亭, 等. 基于泰尔指数的水资源配置公平性研究: 以引江济淮工程河南段为例[J]. *人民长江*, 2023, 54(12): 113-119. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.12.015.
- [23] 吴静涵, 江新, 周开松, 等. 地下洞室施工安全风险综合评价: 基于ISM-ANP的灰色聚类分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(6): 159-165. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.06.028.
- [24] 许兴武, 吴浩, 刘永强, 等. 基于改进LEC法的堤防施工危险源辨识及评价[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(5): 131-134.
- [25] 朱渊岳, 付学华, 李克荣, 等. 改进LEC法在水利水电工程建设期危险源评价中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5(4): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2009.04.011.
- [26] 金远征, 崔守臣, 赵礼, 等. 基于改进LEC法的水利施工安全风险评估与管控[J]. *人民长江*, 2018, 49(19): 63-66, 104. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.19.012.
- [27] 邱礼球. 基于物元可拓模型的改扩建隧道施工安全风险评估[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(增刊2): 25-30.
- [28] 陈钟, 王莉莉, 吴玉栋, 等. 基于LS-FAM模型船闸工程安全风险评价与管控[J]. *水利技术监督*, 2022(6): 107-111,133.
- [29] 王志玮, 蔡贞秀, 吴栋梁. 基于全生命周期的高速公路工程项目风险识别与模糊综合评价应用研究[J]. *项目管理技术*, 2012, 10(12): 46-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4313.2012.12.009.
- [30] 咎彦国. 建筑工程项目施工阶段安全风险的动态识别和实时预警研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

Risk analysis of safety-progress-investment system during the construction of water diversion project: Taking Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section) as an example

HE Shan¹, WANG Hui², CHENG Weishuai¹, LIU Yuan², FAN Jiayi², WANG Yongqiang¹, SANG Lianhai¹

(1. *Water Resources Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;*

2. *Henan Water Diversion Engineering Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China*)

Abstract: Water diversion project is an important measure to solve the uneven distribution of regional water resources, and effectively improve the ability of regional water security. Analyzing and evaluating the risks during the construction is of great importance for the project management. The risks during the construction of a water diversion project can be summarized as safety risks, progress risks, and investment risks. Considering only a single risk is not conducive to the overall management of the project, and it needs a comprehensive analysis of the project's systemic risk. The Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section) aims to supply water to urban and rural residents and improve the environment. This project is a long-distance water diversion project with a complex and changeable environment, along which there are many kinds of crossing structures such as roads and rivers. Some buildings are complicated in structure and difficult to construct. It is necessary to carry out a risk analysis of safety, progress, and investment system during the construction period for the Henan section to improve the safety and reliability of this project.

Many factors affect the risk of safety, progress, and investment system, and there are mutual influences among these factors. Establishing a comprehensive index system for risk evaluation is the key to systemic risk analysis. Based on the established risk evaluation index system, the LEC method was used to evaluate the safety risk during the construction period, and the risk matrix method was used to evaluate the progress risk and investment risk. The results of risk evaluation for the single risk of safety, progress, and investment were obtained based on the analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive risk assessment method. This process was divided into two steps: After

the index matrix passed the consistency test, the analytic hierarchy process was used to determine the weight of each index and the fuzzy comprehensive assessment method was used to determine membership function. When analyzing safety, progress, and investment systemic risk, it was found that the statistical dimension of safety risk was inconsistent with the progress and investment risks. Therefore, this study proposed an improved comprehensive risk assessment method to analyze the comprehensive risks of safety, progress, and investment systems.

The results showed that the evaluation results of single risk for safety, progress, and investment were 84.7, 0.806, and 0.802, respectively. All of the evaluation results were general. Because of the various approaches used, the resulting data had inconsistencies in statistical dimensions. Consequently, the results of the single risk assessment had to be normalized. Following that, the enhanced safety risk was 0.058, the enhanced progress risk was 0.012, and the improved investment risk was 0.006. The safety, progress, and investment systemic risks were the highest, commensurate with the project's real risk condition. Further analysis of the criterion layer and index layer in the index system showed that the risks of construction technology and scheme ranked first among the safety risks, which was the focus of subsequent risk management and control. The risks of lack of personnel cognition and the maintenance of equipment among the safety risks ranked second and third, respectively. As can be observed, the greatest impact on the construction of this project was the safety risk. Among the investment risks, the risk of erroneous project information was the lowest.

This study provided theoretical and technical references to improve the reliability of the systemic risk and reduce the occurrence of risk events during the construction period for the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section).

Key words: construction risk; improved comprehensive risk assessment method; safety, progress and investments systemic risk; water diversion project; Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section)

.....

(上接第 257 页)

In summary, the VG model has high applicability in the Naqu watershed of the Nujiang River source area, and it is recommended to use the VG model for fitting the soil water characteristic curve in the high altitude seasonal frozen zone. However, the model still has more obvious errors in the middle section of the soil matrix potential, and further work is still needed to prove its applicability to other alpine regions. Currently, there are still few studies on soil moisture profiles in the Tibetan Plateau, with scarce references and difficulties in field experiments. Therefore, in-situ observation experiments were chosen for data collection to obtain a long series of volumetric soil moisture content and soil matrix potential data, but soil moisture profiles are affected by wet and dry paths, and there are some errors in the soil moisture profiles. Therefore, it is necessary to analyze the paths of the collected data in the subsequent research and carry out validation experiments in the laboratory to improve and innovate the model to increase the simulation accuracy of the model, so as to make it more applicable in the Tibetan Plateau. This study can provide a basis for a deeper understanding of the soil moisture movement characteristics in the high altitude seasonal frozen zone and the water conservation role of the Chinese water tower zone.

Key words: soil water characteristic curve; model optimisation; soil texture; Van Genuchten model; Naqu watershed