

南水北调东线工程运行风险分析

耿雷华^{1,2}, 刘恒¹, 姜蓓蕾^{1,2}, 李爱花^{1,2}, 宋轩^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 将南水北调东线工程分解为提水、输水和蓄水三大系统, 结合层次分析法(AHP)和模糊综合评价法(FCT)建立了各系统工程运行风险因子识别体系和评价结构模型. 通过对东线一期工程运行风险的定量计算, 实现了工程各系统运行风险等级划分, 进而根据风险分析结果给出相应的降低风险的控制措施和对策, 为南水北调东线一期工程安全运行管理提供有益参考.

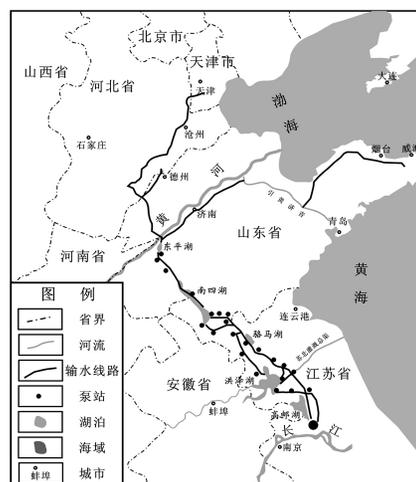
关键词: 南水北调; 工程运行; 东线; 风险分析

中图分类号: TV68

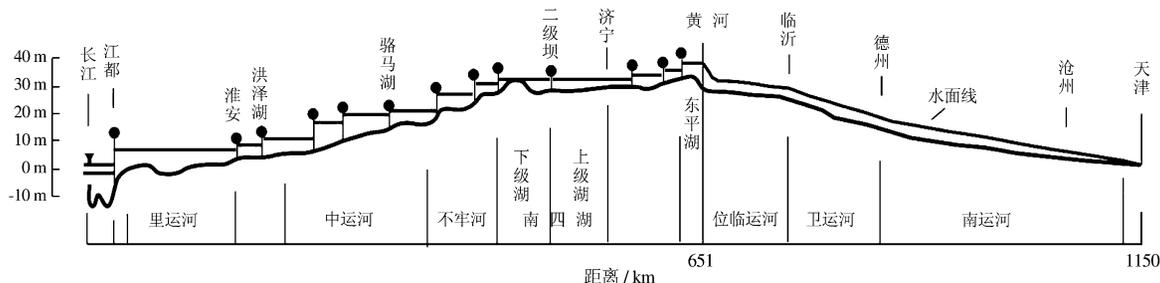
文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2010)01-0016-07

南水北调工程是我国重大战略性基础设施, 有助于缓解北方地区水资源短缺和生态环境恶化的局面, 保障社会经济和生态协调可持续发展. 东线一期工程从长江下游干流江都站取水, 利用京杭运河等河道, 经泵站逐级提水输水北送, 进入东平湖后分两路, 一路穿过黄河经小运河等自流至德州大屯水库, 另一路向东开辟山东半岛输水干线至威海米山水库. 调水线路总长1 466.50 km, 其中长江至东平湖1 045.36 km, 黄河以北173.49 km, 胶东输水干线239.78 km, 穿黄河段7.87 km^[1]. 全线共建设13个梯级泵站, 总扬程约65 m. 东线一期工程输水线路示意图见图1. 由于输水线路长, 涉及工程多, 工程运行将不可避免地受到各类不确定性因素的影响, 为规避或减少风险造成的损失, 有必要采用项目风险管理.



(a) 输水线路平面图



(b) 输水线路纵向剖面图

图1 南水北调东线工程输水线路

Fig. 1 Map of the water transfer route in the east-route-project

收稿日期: 2009-04-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A09)

作者简介: 耿雷华(1963-), 男, 江苏江阴人, 教授级高级工程师, 主要从事水资源可持续利用方面的研究工作.

E-mail: lheng@nhri.cn

本文从工程角度对东线工程运行风险进行识别、分析和评价, 依据风险评析结果, 进一步提出风险控制技术与控制对策.

1 东线工程系统划分

南水北调东线工程以电力为动力, 通过泵站逐级提高水头, 在各级泵站之间依靠水位差通过河道自流输送, 在调水沿线设有若干个用于调蓄的湖库. 因此, 根据东线工程建筑物与功能的不同, 将东线工程划分成提水、输水和蓄水等三大系统. 其中, 提水系统主要由一期工程新建的 21 座泵站及江苏省现有的 13 座泵站, 共 160 台套装机构成; 输水系统主要为输水河道和穿黄工程; 蓄水系统主要指输水沿线包括洪泽湖、骆马湖、南四湖和东平湖在内的四大天然湖泊. 南水北调东线工程系统分解概化见图 2.

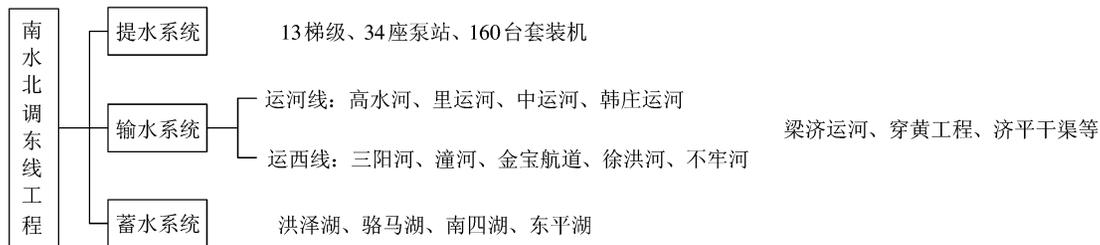


图 2 南水北调东线工程系统分解概化图

Fig. 2 Drawing of the conceptual system of the east-route project

2 风险分析流程与方法

风险分析, 首先需识别系统可能出现的失事形式、导致失事的影响因子以及系统失事可能造成的后果^[2]. 根据东线工程运行特点和破坏机理分析, 运用层次分析法对影响三大系统正常运行的风险因子进行界定和识别, 确定各系统风险评价的准则层和指标层. 在此基础上, 运用模糊综合评价法对风险发生的概率及后果进行定性与定量分析. 综合考虑失事风险率和损失后果, 建立评价标准以衡量风险的大小和程度, 确定风险是否需要处理和处理的程度. 东线工程运行风险分析、评价流程详见图 3.

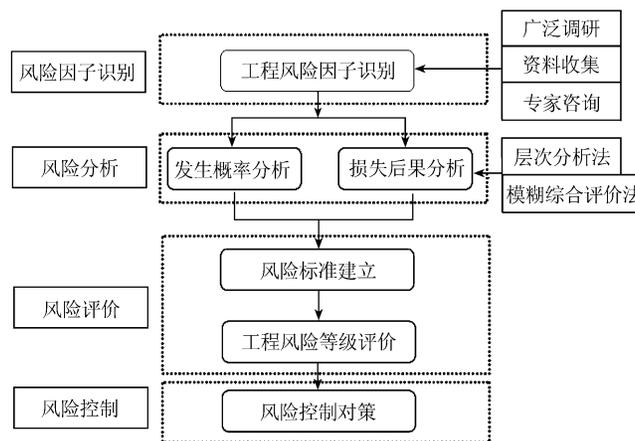


图 3 南水北调东线工程运行风险分析流程图

Fig. 3 Flow chart of the risk analysis for the operation of the east-route project

层次分析法和模糊综合评价法结合应用, 在处理复杂的大系统时具有得天独厚的优势. 层次分析法能够对工程系统进行分解, 合理的概化系统, 使其条理化、清晰化; 模糊综合评价法能够将隶属于不同层次及类别

的各种因素进行有效地综合、归纳,尤其适用于系统定性信息较多的情况,能很好地处理人的判断偏好固有的模糊性以及定性信息的模糊性.层次分析法可归纳为如下几个步骤:明确问题;建立层次结构;构造判断矩阵并计算权重向量;次单排序和一次性检验;次总排序和一次性检验.模糊综合评价法首先需建立评价问题的目标集和评定集,在满足一定条件下,对每一个指标定义隶属函数,然后根据层次分析法所确定的各层次(指标组,指标类)的权重,确定各层次的隶属度,最后计算系统总隶属度,根据总隶属度的大小,对评价对象进行逐一总评价.层次分析法和模糊综合评价法的具体计算步骤可参考文献[3-5].

在运用模糊综合评价法确定各系统运行风险率等级时,将工程运行风险率评价等级分为5级.从1级到5级,是风险率逐渐增加的过程.具体的风险评价等级取值与相应的风险描述见表1.

表1 南水北调东线工程各系统运行风险率评价标准

Tab.1 The evaluation standard of the risk probability for the east-route project

风险率等级描述	风险高	风险较高	风险中等	风险较低	风险低
发生频率描述	很可能发生	较可能发生	有可能发生	较不可能发生	不可能发生
风险率评价等级取值	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5]
相应风险概率概值	0.5~0.99	0.1~0.5	0.01~0.1	0.001~0.01	0.000001~0.0001

同时,对工程运行条件及运行情况进行分析,将失事后果也划分为5个等级,分别为重大、大、较大、中等和较小.组合风险概率等级和失事后果,确定系统运行风险等级.风险等级划分成5类:风险低、风险较低、风险中等、风险较高、风险高.风险评价标准见表2和表3.

表2 南水北调东线工程各系统风险评价标准

Tab.2 Standard for the risk evaluation of the east-route project

失事后果	1	2	3	4	5
重大	风险高	风险高	风险较高	风险中等	
大	风险高	风险较高	风险中等		
较大		风险中等	风险较低	风险较低	风险低,基本无影响
中等		风险较低			
较小					风险低,基本无影响

表3 风险等级判定标准描述

Tab.3 Description of the risk degree determination

风险等级	运行状况描述
1(风险高)	不能接受,应尽快改善以使风险等级降至3或3以上;(按现行规程、规范、标准和设计要求,工程存在危及安全的严重缺陷,运行中出现重大险情的数量众多,须立即采取除险加固措施.)
2(风险较高)	不宜接受,应于合理期限前改善,以使风险等级降至3或3以上;(工程功能和实际工况不能完全满足现行的规程、规范、标准和设计的要求,可能影响工程的正常使用,险情数量较多,需要进行安全性调查,确定对策.)
3(风险中等)	接受条件,存在适当之程序、控制、与安全保护;(各项监测数据及其变化规律处于正常状态,按照常规的运行方式和维护条件可以保证工程的安全性.)
4(风险较低)	现状接受,保持现有控制程序,无需采取任何附加措施;(工程实际工况和各种功能达到了现行规程、规范、标准和设计的要求,只需正常的维修保养即可保证其安全运行.)
5(风险低)	基本无影响

3 提水系统风险分析

提水系统运行风险主要表现为各种内因和外因引起的提水系统的提水水量不能满足规划要求,即受水区有需水要求时,提水系统不能满足水量要求,对部分自身存在防洪要求的泵站,在受到洪水冲击时,不能正

常运行的风险^[5].因此,提水系统运行风险主要来自两个方面.从导致泵站系统提水效率降低角度考虑,主要风险因子为系统运行条件、设备质量、技术状况.运行条件主要表现为拦污清污设备、进流漩涡两个方面;设备质量主要表现为电网电压波动、设备老化、磨阻增加等;技术状况表现为水泵特性误差、管理、维护状况等.从泵站系统工程安全角度考虑,主要为河道洪水水位和河堤提高两个风险因子.风险因子识别具体过程详见文献[6].

根据提水系统运行风险因子识别结果,采用模糊综合评价法来确定其相应的运行风险率.首先按照客观性、系统性、目的性、代表性和科学性等5个方面的原则,选取设备质量、技术状况、泵站系统工程安全等3个方面评价准则,建立提水系统运行风险评价层次结构(见图4).其次,依据一定原则和方法确定南水北调东线提水系统5个评价指标具体分级标准.然后,采用层次分析法确定权重.最后利用效用函数计算得到各泵站的风险指标值.

模糊综合评价方法对13级梯级泵站的风险评价结果表明,东线工程的13级梯级泵站中,大部分梯级泵站的风险率等级都在3~4之间,属于风险率较低级别.在13级梯级泵站中,风险率等级评价结果最劣的为淮阴枢纽,其综合风险等级评价结果为2.63,相应的风险率等级属于中等.主要原因是由于淮阴枢纽的3个泵站的单机流量为30和34 m³/s,淮阴枢纽的备用机组比例较低,仅为9%,根据该指标的评价标准,其风险率等级为2级,风险较高.

风险是失效风险率与失效造成的后果两个因素的函数,风险的大小不仅与失效风险率有关,而且也与失效后果息息相关^[7].在风险率评价的基础上,对提水系统失效后果进行评价.由于东线各梯级泵站除了主要承担南水北调的提水任务以外,还承担了调水沿线地区的供水,因此,各串联的梯级泵站的设计流量呈现出由南向北逐级减小的趋势,这一趋势与直观上的各梯级泵站失效造成的后果等级趋势是一致的.采用各梯级泵站的设计流量表征其失效后果的严重性.根据风险概率等级和梯级泵站流量的不同组合结果,划定风险评价标准,确定风险等级划分成5类:风险低、风险较低、风险中等、风险较高、风险高.通过提水系统工程安全风险在图上的投影可知,南水北调东线工程提水系统13级梯级泵站中,淮阴枢纽的风险性最高,风险等级为中等;其次是江都枢纽、淮安枢纽,风险等级为较低;其余的梯级枢纽风险等级均为低.

需要指出的是:江都枢纽和淮安枢纽处于13级梯级枢纽的水源区,而且其设计流量大,分别承担了第一级梯级枢纽和二级梯级枢纽总设计抽水量的80%和66.7%,因此,尽管这两级梯级枢纽风险率等级不高,但这两个梯级枢纽的风险等级是13级梯级枢纽中次高的.另外,东线工程采用了南四湖以南即江苏省境内为并联结构,南四湖以北为串联结构的工程输水特性,这一组成特点将提升东线工程提水系统的运行安全性.

4 输水系统风险分析

输水系统分为输水河道工程和穿黄工程两部分.对输水河道而言,风险主要表现为河道堤防的安全稳定性出现故障,不能满足其规划的输水功能,从而影响输水河道功能.堤防失事模式主要为漫堤失事、渗透失事和失稳失事三种^[8],风险因子则对应为洪水水位和堤防高度、堤防坡降和水力比降、以及土体的物理参数和水流冲刷力.对穿黄隧道而言,风险主要表现为隧道工程安全性出现故障,不能满足隧洞输水要求,风险因子主要有几个方面:工程本身引起的风险,例如:隧道突水、突泥等,以及工程外在因素引起的风险,例如:顶部地面塌陷、穿越煤层开采地区地基塌陷等^[9].

采用模糊综合评价方法对输水河道工程系统进行风险评价,综合考虑河道工程系统的荷载情况、工程结构及运行管理等各种影响因素,建立输水河道工程安全风险评价层次结构如图5.

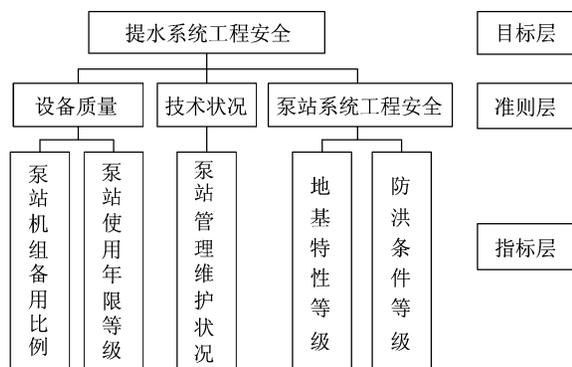


图4 提水系统工程运行风险评价层次结构

Fig. 4 Hierarchical structure of risk evaluation for the pumping system in the east-route project

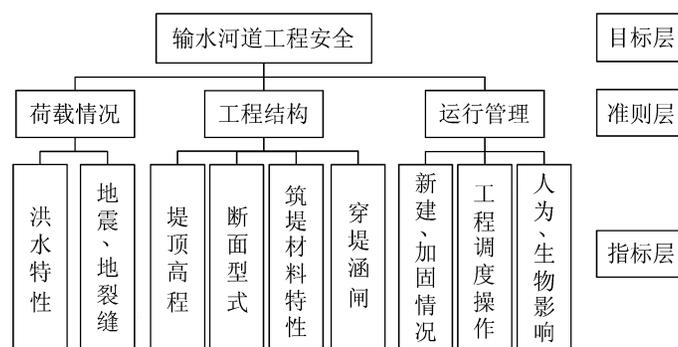


图5 输水河道工程运行风险评价层次结构图

Fig. 5 Hierarchical structure of the risk evaluation of river system in the east-route project

根据以上的层次结构,选取已有堤防中工程条件明确且安全性状较好的标准堤段作为参考,分析实际堤段与标准堤段之间存在的差距,利用模糊综合评价法确定各堤段的风险率等级。分析计算结果表明:南水北调东线一期输水河道工程中,运河线中韩庄运河运行风险率较高,风险率等级介于2~3之间,主要为人为采空沉陷、岩溶塌陷引起的滑坡、失稳破坏;中运河风险率为中等,风险率等级介于3~4之间,主要为输水渠道的渗漏、地裂缝滑坡等;里运河、高水河风险率为较低。运西线徐洪河风险率等级为中等,存在地裂缝引发滑坡的可能;新通扬运河、三阳河、潼河、金宝航道、三河以及不牢河风险率等级均较低。出南四湖后,由梁济运河输水至东平湖,由于地面沉降及岩溶塌陷的作用,易存在滑坡、失稳破坏,且存在可液化土层,梁济运河风险率等级为较高。济平干渠、济南~引黄济青段风险率较低,济平干渠全线全断面采用高性能砼板防渗和多功能的排水设施,基本解决了穿越区湿陷性黄土状土层的渗漏、失陷变形以及边坡稳定等问题。

在风险率评价的基础上,对输水河道失效后果进行评价。输水河道失效后果评价主要考虑河道的输水能力损失及工程经济损失,兼及其他功能如饮用水源、航运、灌溉、行洪等。工程在南四湖以南采用运河线、运西线并联,南四湖以北采用串联结构输水,并联模式较大地提高了输水系统的运行安全性。将河道工程风险概率等级及失事后果投影在风险图中,可知梁济运河风险较高,中运河、韩庄运河风险为中等,徐洪河、里运河及高水河风险为较低,其余输水河道段风险等级均为低。

穿黄工程为南水北调东线控制性工程,主要包括穿黄隧洞以及进出口闸门、埋涵等工程。由于工程水文、地质条件复杂,国内外尚无先例可循,隧洞突水、突泥以及围岩稳定问题则主要依托穿黄勘探试验洞的工程运行情况进行分析。对探洞的防渗阻水工程失事机理及运行工况进行分析,认为穿黄隧洞发生突水、围岩稳定性下降可能性较高;进出口闸门、滩地埋涵等工程失事风险率较低。由于隧洞涌水可能产生渗流冲刷堤基威胁黄河大堤安全,遭成险工岸垮堤,失事后果重大,风险较高。

5 蓄水系统风险分析

东线工程蓄水系统主要指沿线天然蓄水湖泊。界定蓄水系统的工程运行风险为天然湖泊堤防失事,不能满足规划调蓄功能的要求。因此,除荷载情况需添加风浪作用外,上述输水河道工程运行风险评价层次结构图(图5)亦适用于蓄水工程风险分析。

蓄水系统水情工情较南水北调东线工程建设前有较大改变。工程建设前蓄水系统的运行主要分为汛期及非汛期,工程运行期间则主要为汛期和输水期。根据南水北调东线一期工程调度运行方案可知,蓄水系统汛期工况较之前改变甚微,而输水期则意味着湖泊堤防将长期遭遇高水位浸泡。

蓄水系统运行风险率计算方法与输水河道相似,汛期失事后果分析主要参考湖泊历史出险情况及经济损失,输水期失事后果分析主要参考江水北调运行期、南水北调东线工程试运行阶段的湖泊险情及输水损失,并分析非汛期和输水期工况改变对调输水的影响。分析结果表明:在汛期洪泽湖风险较高,风险率等级介

于2~3之间,主要表现为行洪期间的风浪漫溢及渗透失事;南四湖及东平湖风险中等;骆马湖风险较低.与未建设南水北调工程的情况相比,由于工程建设过程中对穿堤涵闸及其他建筑物进行重建或加固,对蓄水湖泊的部分险工段进行防渗处理,在汛期同样工况情况下,风险等级均有一定程度的降低.在输水期间,湖泊堤防将长期遭遇高水位浸泡,洪泽湖和南四湖的风险为中等,洪泽湖蓄水工程风险主要表现为渗漏造成的输水效率降低以及堤防的渗透失事,南四湖蓄水风险主要表现为高水位运行条件下采煤沉陷段堤防产生新的沉陷.东平湖和骆马湖的风险均为较低.

6 对策措施

由于提水系统的大型泵站是南水北调东线的核心工程,其安全性是保障东线工程按设计畅通运行的重要保障.根据南水北调东线提水系统的风险评价结果,制定如下提水系统的风险控制技术及对策:注重泵站系统的巡视、维护和保养;进一步完善泵站枢纽管理体制;提高泵站自动化程度,保障工程效益发挥;定期进行地基监测,保障泵站的工程安全;提高泵站枢纽管理人员的素质,降低人为技术风险.通过以上风险管理措施,有效规避和降低泵站的失效风险,保障泵站的安全运行.

输水河道风险主要影响因素为人为穿堤采煤及地下水开采.针对堤防工程中存在的风险,提出采取非工程措施和工程措施并举的方法降低堤防的工程失效风险.主要的非工程措施有:划分堤防安全等级;落实穿堤采煤报批手续,事前在预沉区内采取应对措施,确保堤防安全及完整;严禁河道内无序采砂改变河道水流、水力条件;加强信息化建设,及时获得水情信息;实施堤防工程安全实时监测系统等.主要的工程措施有:复合堤顶高程,对堤防进行加固、提高;当遭遇渗透风险时,提高堤身和堤基抵抗渗透破坏的能力,同时降低渗流的破坏能力;当遭遇边坡失稳风险时,采用“上部削坡与下部固脚压重”,对因渗流作用引起的滑坡,采取“前堵后排”的工程措施.对穿黄工程而言,需加强工程安全检测,定期进行加固处理,确保帷幕、衬砌等防渗阻水工程处于最佳阻水状态;加强区域地下水检测,控制岩溶水的开采等.

蓄水系统主要风险控制对策为:进一步落实河道险工段及在建工程的防汛责任;提高流域排洪通道防洪标准,减小防洪工程实际防洪泄洪能力与设计标准间差距;及时全面掌握防洪工程运行情况,扎实做好水闸工程维修,确保启闭灵活,运用自如;加快对采煤沉陷段应急处理及加固进程,确保堤防安全及完整;改进洪水预报方法,不断提高预报速度和精度.进一步完善抢险预案,落实抢险物料、队伍等度汛措施,明确防汛责任等等.

7 结语

本文将南水北调东线工程分解为提水、输水和蓄水三大系统,结合层次分析法和模糊综合评价法建立了各系统工程运行风险因子识别体系和评价结构模型.对东线一期工程运行风险进行了定性与定量计算.南水北调东线工程提水系统13级梯级泵站中,淮阴枢纽的风险性最高,风险等级为中等,其余梯级枢纽风险等级均较低;输水系统中梁济运河风险较高,中运河、韩庄运河风险为中等,徐洪河、里运河及高水河风险为较低,其余输水河道段风险等级均为低.穿黄工程穿黄隧洞发生突水、围岩稳定性下降可能性较高,进出口闸门、滩地埋涵等工程失事风险率较低;蓄水系统在汛期洪泽湖风险较高,南四湖及东平湖风险中等,骆马湖风险较低.在输水期间,湖泊堤防将长期遭遇高水位浸泡,洪泽湖和南四湖的风险为中等,东平湖和骆马湖的风险均为较低.

东线工程在南四湖以南地区输水采取并联的形式,南四湖以北地区采取串联的形式.通过泵站提水的并联输水方式大大增加了东线工程的运行安全.南水北调东线工程运行以后,除了工程本身还存在风险会影响调水工程的正常运行外,还有水文风险、生态环境风险、经济风险和社会风险等也会影响工程运行.工程运行的风险是客观存在的,我们研究的目的,就是使人们,特别是决策者理解、认识和接受风险,在经济合理和可接受的范围内控制风险.另外,就是要制定相应的措施,建立一套快速有效的综合性的事先预警预控、事中紧

应急救援以及事后安置的预警管理模式,广泛调动各种社会资源,保障南水北调工程的运行安全。

参 考 文 献:

- [1] 中水淮河工程有限责任公司. 南水北调东线一期工程可行性研究报告[R]. 蚌埠: 中水淮河工程有限责任公司, 2005. (China Water Huaihe Engineering Co., Ltd. Feasibility research on the East-routine-project in the South to North Water Diversion[R]. Bengbu: China Water Huaihe Engineering Co., Ltd., 2005.)
- [2] 刘 勇, 刘建民, 张建设. 长距离输水工程风险分析研究[J]. 水利水电技术, 2005(4): 114-116. (LIU Yong, LIU Jian-ming, ZHANG Jian-she. Risk analysis on long-distance water diversion project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005(4): 114-116. (in Chinese))
- [3] 刘 云, 王 亮, 申林方, 等. 大坝安全风险评价的模糊层次综合模型[J]. 水科学与工程学报, 2007(1): 26-29. (LIU Yun, WANG Liang, SHEN Lin-fang, et al. Mode of fuzzy AHP synthetic evaluation in the risk for dam safety[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007(1): 26-29. (in Chinese))
- [4] 金菊良, 魏一鸣, 付 强, 等. 层次分析法在水环境系统工程中的应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 187-192. (JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, FU Qiang, et al. Application of analytic hierarchy process based on genetic algorithm to water environment systems engineering[J]. Advance in Water Science, 2002, 13(2): 187-192. (in Chinese))
- [5] 孙才志, 林学钰. 基于层次分析的模糊一致性判断矩阵及其应用[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(3): 59-63. (SUN Cai-zhi, LIN Xue-yu. Fuzzy consistent matrix based on AHP and its application[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(3): 59-63. (in Chinese))
- [6] 姜蓓蕾, 刘 恒, 耿雷华, 等. 层次分解法在南水北调东线工程风险因子识别中的应用[J]. 水利水电技术, 2009(3): 65-67. (JIANG Bei-lei, LIU Heng, GENG Lei-hua, et al. Application of hierarchic decomposition approach to identification of risk factors for East Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009(3): 65-67. (in Chinese))
- [7] 李 雷, 王仁钟, 盛金保, 等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 48-57. (LI Lei, WANG Ren-zhong, SHENG Jin-bao, et al. Risk analysis and risk management of dam[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006: 48-57. (in Chinese))
- [8] 徐卫亚, 邢万波, 王 凯, 等. 超标洪水下堤防失事风险评价及工程运用[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 39-44. (XU Wei-ya, XING Wan-bo, WANG Kai, et al. Integrated risk assessment of levees under over-level flood condition and a case study[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(3): 39-44. (in Chinese))
- [9] 毛 儒. 隧道工程风险评估[J]. 隧道建设, 2003, 23(2): 1-3. (MAO Ru. Risk analysis of tunnel project[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(2): 1-3. (in Chinese))

Operating risk analysis on the east route of South-North Water Diversion Project

GENG Lei-hua^{1,2}, LIU Heng¹, JIANG Bei-lei^{1,2}, LI Ai-hua^{1,2}, SONG Xuan^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper divides the east route of the South-North Water Diversion Project into three systems: the water pumping system, the water conveyance system and the water storage system. For each system, the operating risk identification and evaluation models are established by means of analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy consistency theorem (FCT) methodologies. Based on the qualitative and quantitative assessment results of the project, the operating risk grades are ranked for each system, and appropriate measures and strategies are given correspondingly to decrease the operating risk, which can be used as beneficial reference to the management of this water diversion project.

Key words: South-North Water Diversion Project; operating risk; east route; risk analysis