

康亚静, 刘宇, 解家毕. 超标准暴雨洪水条件下南水北调中线工程沿线各单元风险评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 342-351. KANG Y J, LIU Y, XIE J B. Risk assessment of each unit along the middle route of South-to-North Water Transfer Project under over-standard rainstorm flood conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 342-351. (in Chinese)

超标准暴雨洪水条件下南水北调中线工程沿线 各单元风险评估

康亚静¹, 刘宇^{2,3}, 解家毕³

(1. 中国南水北调集团水网水务投资有限公司, 北京 100142; 2. 西北农林科技大学水利与建筑学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:对南水北调中线工程沿线 639 个单元工程风险进行评估, 并对灌渠河、贾河、金水河、石门河和沙沟 5 个典型单元进行重点分析。结果表明: 中线工程沿线 639 个评估单元中, 风险事件可能性指数为 1 的单元占比最大, 风险等级以一般风险为主; 在 5 个典型单元中, 极端降雨移用(植)后在交叉断面处形成的洪水基本上呈现流域面积越小洪水量级越大的特点。此外, 灌渠河排水倒虹吸发生渠顶漫溢的风险低; 贾河梁式渡槽、沙沟排洪渡槽和石门河渠道倒虹吸均存在较高的工程风险; 金水河渠道倒虹吸在超标准洪水下河道冲刷满足要求, 工程风险较低。研究成果对提前部署南水北调中线工程防御超标准暴雨洪水具有指导意义。

关键词:南水北调中线工程; 超标准暴雨洪水; 风险评估; 典型单元分析; 极端降雨情景移用(植)

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0035

南水北调中线工程是一项跨流域、大流量、长距离的大型调水工程^[1]。总干渠沿线所经地区的地理环境和水文气象条件差异较大, 地质环境复杂多变, 膨胀岩(土)、饱和砂土、湿陷性黄土和煤矿采空区等地质渠段问题较为突出^[2-3]; 沿线穿越河流、公路、铁路等各类交叉建筑物众多, 部分大型跨河建筑物结构复杂、施工难度大, 干线工程西侧水库 1 300 余座^[4-5]。工程运行过程中面临各种自然灾害、上游水库溃坝洪水风险、渠道和渠系建筑物结构破坏等各种风险事件的考验^[6-7]。

近年来, 在信息化、工业化和现代水利的推动下, 各种风险评估技术在水资源调度管理、大坝安全运行等领域取得较好的应用, 在长距离调水工程的风险评估方面也有一定的应用^[8-9]。目前, 针对南水北调中线工程的风险, 国内部分学者已开展相关研究。马力等^[10]建立基于模糊推理系统的 FMEA 风险评估模型, 并将该模型应用于南水北调中线工程辉县段输水渠道运行风险评估。冯平等^[11]建立

二维复合事件风险组合模型, 以南水北调中线工程河北段引水工程为研究对象, 对其防洪风险进行估算, 结果表明该段引水工程能够抵御 30 年一遇的洪水。黄昌硕等^[12]从工程本身入手, 分析了南水北调工程运行存在的风险, 并给出了具体风险的控制措施。位文涛等^[13]针对南水北调中线工程流量倒挂监测异常, 基于水量动态平衡原理及区间流量最长序列法, 在白河至黄金河河段构建了水动力模型, 为中线工程的运行调度管理提供有力支撑。然而, 在全球气候变暖的背景下, 极端暴雨洪水灾害的发生频率明显增高^[14]。南水北调中线工程多地属于暴雨集中区, 自运行以来多次遭遇特大暴雨灾害^[15-16]。目前, 针对南水北调中线工程面对超标准暴雨洪水时的风险程度, 仍需进一步研究。

为确保运行安全, 亟须开展超标准暴雨洪水条件下中线工程风险评估, 掌握超标准暴雨洪水可能对中线工程渠道和建筑物造成的影响。为此, 本研究采用多种方法, 评估了超标准暴雨洪水条件下中

收稿日期: 2022-12-07 修回日期: 2023-02-12 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1039.015.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909274)

作者简介: 康亚静(1991—), 女, 河北永年人, 工程师, 主要从事水利规划与管理研究。E-mail: kangyajing58@126.com

通信作者: 刘宇(1996—), 男, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: liuyu961030@163.com

线工程 639 个单元的工程风险, 并采用极端降雨情景移用(植)的方法对 5 个典型单元的工程风险进行重点分析, 有助于提升工程管理单位应对超标准暴雨洪水的应急处置能力, 减轻暴雨洪水灾害造成的影响。

1 研究区概况及数据选取

1.1 研究区概况

南水北调中线工程经过长江、淮河、黄河和海河四大流域, 沿线交叉河流众多, 情况复杂, 穿过的区域多为山前平原, 左岸河流多为山区性河流, 上游分布有暴雨区, 洪水暴涨暴落^[17]。南水北调中线

一期干线工程总干渠全长 1 432.493 km, 共穿过大小河流 705 条^[18]。中线干线工程沿线主要有太行山前保定暴雨区、太行山前邢台暴雨区、太行山前鹤壁新乡暴雨区、“7·20”郑州暴雨区和伏牛山前暴雨区 5 个大暴雨区^[19]。因此, 总干渠在设计时同时考虑了防洪排水的要求, 根据交叉河流上游集水区面积的大小, 分别采用渠跨河或河穿渠的建筑物型式。其中, 河渠交叉断面以上集水面积大于 20 km² 的河流(称为交叉河流)192 条, 集水面积小于 20 km² 的河流(称为左岸排水河沟)513 条^[20-21]。研究区范围及 5 个典型单元所在位置见图 1。

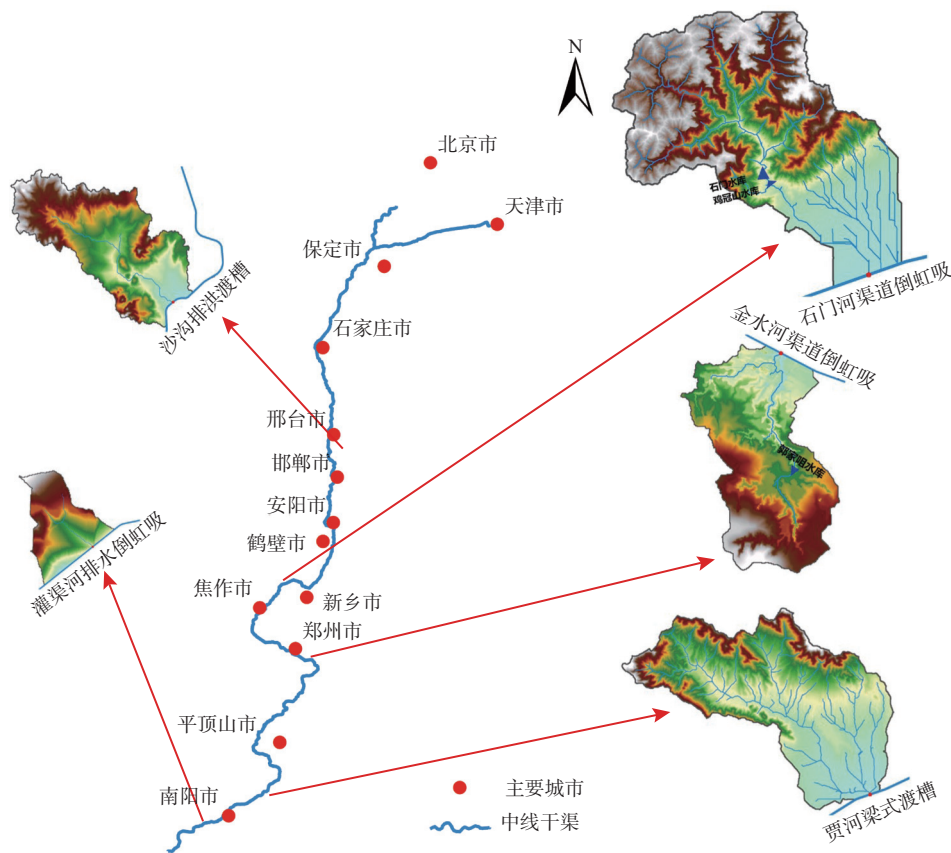


图 1 南水北调中线工程输水线路及 5 个典型单元地理特征

Fig. 1 Geographical characteristics of water conveyance line and five typical units in the middle route of South-to-North Water Transfer Project

1.2 研究数据选取

南水北调中线工程洪水风险的单元划分基于左岸水系, 以河渠交叉及左岸排水建筑物的汇水区域为依据, 按洪水来源及影响区范围划分洪水风险评估单元, 并细分为河流单独汇流区和串流汇流区。在本研究中, 中线工程穿越大小河流 705 条, 部分较小河流归并为一个单元, 共划分了 639 个由大型河渠交叉建筑物、左排建筑物与总干渠渠道组成的洪水单元。其中, 交叉建筑物的形式有: 梁式输水渡槽 19 座、涵洞式渡槽 7 座、渠道倒虹吸(暗渠)

120 座、排洪渡槽 6 座、河道倒虹吸 18 座、排洪涵洞 9 座、排水倒虹吸 327 座、排水涵洞 59 座、排水渡槽 74 座。另外, 所选择的 5 个典型单元从建筑物类型上涵盖了排水倒虹吸、渡槽和渠道倒虹吸, 均是在发生超标准暴雨洪水时易发生险情的建筑物型式, 同时兼顾了中线工程从南到北流经的长江、淮河、黄河和海河流域四大流域, 河南、河北两省和不同的管理处。建筑物交叉断面的左岸汇水区流域面积从 10 km² 到 207 km² 不等, 且分别位于太行山前和伏牛山前暴雨易发区, 部分位于“7·20”特大

暴雨、“63·8”洪水、“75·8”洪水、“96·8”洪水的暴雨覆盖区。因此,所选的 5 个评估单元具有一定的典型性和代表性。

2 研究方法

2.1 工程风险计算方法

2.1.1 工程风险事件可能性指数

在超标准暴雨洪水情景下,南水北调中线工程渠道和建筑物主要风险事件的可能性各不相同。因此,在本研究中对渠堤(防洪堤)、梁式渡槽、涵洞

式渡槽、排洪和排水渡槽的风险事件的可能性分别单独考虑,具体见表 1。另外,考虑到建筑物处于易发生特大暴雨区域,流域地形偏向于山区特征时,其发生风险事件的可能性更大^[22-23]。因此,综合雨区和地形因素对工程风险事件的可能性指数进行一定的修正,本研究中雨区、地形和雨区叠加地形因素的修正系数分别为 1.2、1.2 和 1.5。修正后的工程风险事件的可能性指数为修正系数乘以可能性指数,该指数共分 1~5 级^[24]。

表 1 南水北调中线工程风险事件可能性指数
Tab. 1 Middle route of South-to-North Water Transfer Project risk event possibility index

可能性指数	评价指标描述			
	渠堤(防洪堤)	梁式渡槽	涵洞式渡槽	排洪和排水渡槽
1	$\Delta H_{裕} > 1.8\Delta H$	$\Delta H_{空裕} > 1.8\Delta H$	$H_{槽顶} > H_{校} + 1.8\Delta H$	$H_{入渠} < H_{加大}$
2	$1.2\Delta H < \Delta H_{裕} \leq 1.8\Delta H$	$1.2\Delta H < \Delta H_{空裕} \leq 1.8\Delta H$	$H_{校} + 1.2\Delta H < H_{槽顶} \leq H_{校} + 1.8\Delta H$	$H_{加大} \leq H_{入渠} < H_{渠顶} - 0.5\Delta h$
3	$0.8\Delta H < \Delta H_{裕} \leq 1.2\Delta H$	$0.8\Delta H < \Delta H_{空裕} \leq 1.2\Delta H$	$H_{校} + 0.8\Delta H < H_{槽顶} \leq H_{校} + 1.2\Delta H$	$H_{加大} - 0.5\Delta h \leq H_{入渠} < H_{渠顶} - 0.2\Delta h$
4	$0.5\Delta H < \Delta H_{裕} \leq 0.8\Delta H$	$0.5\Delta H < \Delta H_{空裕} \leq 0.8\Delta H$	$H_{校} + 0.5\Delta H < H_{槽顶} \leq H_{校} + 0.8\Delta H$	$H_{加大} - 0.2\Delta h \leq H_{入渠} < H_{渠顶}$
5	$\Delta H_{裕} \leq 0.5\Delta H$	$\Delta H_{空裕} \leq 0.5\Delta H$	$H_{槽顶} \leq H_{校} + 0.5\Delta H$	$H_{入渠} \geq H_{渠顶}$

注: ΔH 为校核和设计洪水水位差值, m; $\Delta H_{裕}$ 为顶高程裕度, m; $\Delta H_{空裕}$ 为槽下净空裕度, m; $H_{槽顶}$ 为槽顶高程, m; $H_{校}$ 为校核水位, m; $H_{入渠}$ 为入渠后总干渠水位, m; $H_{加大}$ 为总干渠加大水位, m; $H_{渠顶}$ 为总干渠渠顶高程, m; Δh 为渠道超高, 一般采用 1.5 m。

2.1.2 工程风险事件后果严重性和风险等级标准

根据超标准洪水风险事件对供水、社会经济、生态环境的影响来确定风险事件后果严重性,并结合风险事件后果严重性指数标准,将渠道倒虹吸、梁式渡槽、涵洞式渡槽、暗渠所在评估单元的风险事件后果严重性指数设定为 5,将河道倒虹吸、排洪渡槽、排洪涵洞所在评估单元的风险事件后果严重性指数设定为 4,将排水倒虹吸、排水渡槽、排水涵洞所在评估单元的风险事件后果严重性指数设定为 3。此外,在超标准暴雨洪水条件下,工程风险量值可由工程风险事件可能性指数与后果严重性指数相乘得到,并依据风险等级矩阵表(表 2)将中线工程风险划分为 I、II、III 和 IV 共 4 个等级,各等级的风险量值分别为 [1, 4]、(4, 9]、(9, 15] 和 (15, 25], 分别代表低风险、一般风险、较大风险和重大风险^[25-26]。

为了更加清晰地展示在超标准暴雨洪水条件下对中线工程风险等级的评估流程,绘制流程图,用以系统地说明输入数据、计算方法和输出结果,具体见图 2。

表 2 南水北调中线工程风险等级矩阵

Tab. 2 Middle route of South-to-North Water Transfer Project risk level matrix

可能性指数	后果严重性指数				
	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

2.2 超标准暴雨洪水风险分析

通过暴雨洪水分析模型构建、极端降雨移用(植)设定、方案模拟、结果统计分析等步骤对典型评估单元的超标准暴雨洪水风险分析。

2.2.1 暴雨洪水分析模型

极端暴雨洪水分析计算采用水文和一、二维水力学耦合的洪水分析模型,该模型是中国水利水电科学研究院洪水分析系列软件中的核心模型,已成功应用于黄河下游、淮河、永定河等流域,并在南水北调中线干渠及跨河交叉建筑物对区域防洪影响风险评估和内水外溢洪水风险评估良好的应用效果^[27]。

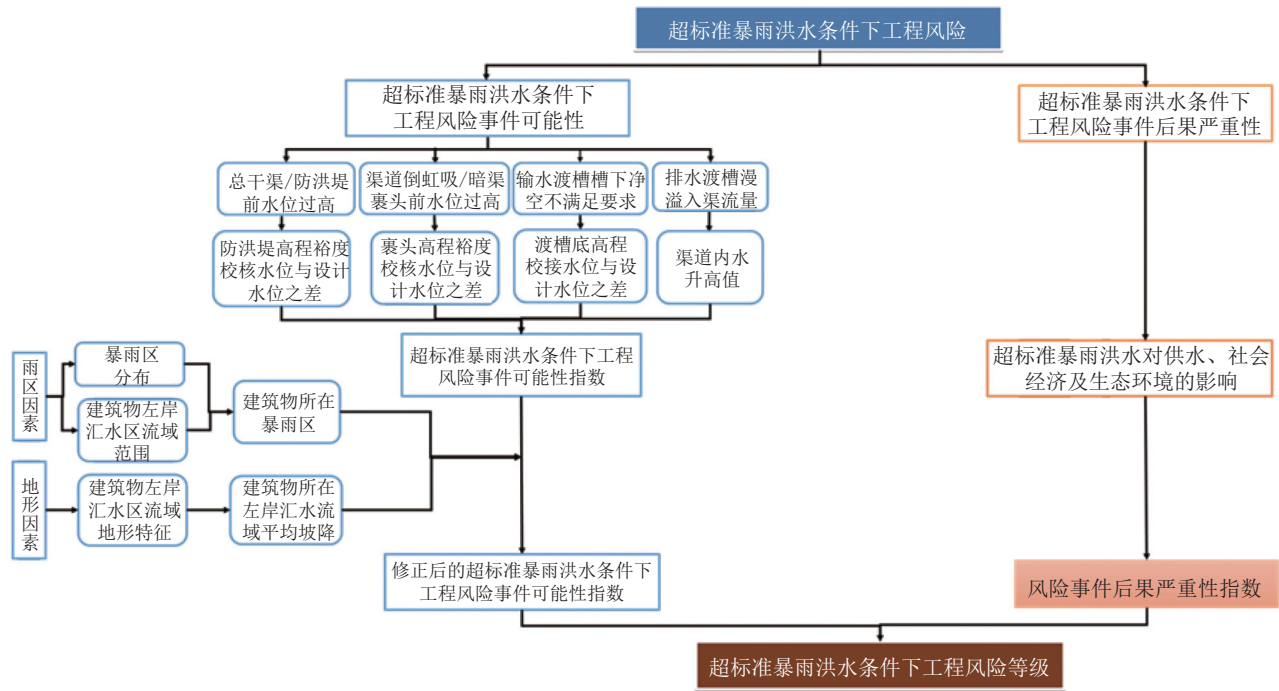


图2 超标准暴雨洪水条件下工程风险评估流程

Fig. 2 Engineering risk assessment process under over-standard rainstorm flood conditions

2.2.2 极端降雨情景移用(植)设定

针对灌渠河、贾河、金水河和石门河单元,拟定历史上发生的距离上述河流流域范围较近的“7·20”特大暴雨和“75·8”洪水两种移用(植)情景。沙沟单元位于海河流域,拟定为海河流域“63·8”洪水和“96·8”洪水的降雨移用(植)情景,降雨移用(植)方式和距离见表3。不考虑降雨在移植区域发生的可能性。

2.2.3 洪水风险分析

通过水文分析计算确定极端降雨情景下交叉河流各控制断面的洪水过程,构建流域“左岸汇水区—交叉建筑物—右岸淹没区”的暴雨洪水仿真模型,开展历史极端暴雨的情景方案模拟计算,分析超标准暴雨洪水对中线工程渠道和建筑物的影响,并评估提供关键控制断面的水力要素分析结果。

表3 南水北调中线工程5个典型评估单元的极端降雨移用(植)方案

Tab. 3 Extreme rainfall migration (planting) scheme for 5 typical evaluation units in the middle route of South-to-North Water Transfer Project

序号	单元名称	“7·20”特大暴雨移用(植)	“75·8”洪水的降雨移用(植)
1	金水河	按暴雨中心整体向西南方向移动6.9 km,移至流域中心,即郭家咀水库大坝附近	按暴雨中心整体向北移动179 km,移至流域中心,即郭家咀水库大坝附近
2	贾河	按暴雨中心整体向西南方向移动155.4 km,移至流域中心	按暴雨中心整体向西北移动57.5 km,移至流域中心
3	灌渠河	按暴雨中心整体向西南方向移动238 km,移至流域中心	按暴雨中心整体向西移动132.9 km,移至流域中心
4	石门河	按暴雨中心整体向北移动94.5 km,移至石门水库大坝附近	按暴雨中心整体向北移动281.8 km,移至石门水库大坝附近
	单元名称	“63·8”洪水的降雨移用(植)	“96·8”洪水的降雨移用(植)
5	沙沟	按暴雨中心整体向南移动55.2 km,移至流域中心	按暴雨中心整体向东南方向移动43.5 km,移至流域中心

3 风险评估

3.1 各单元风险评估

3.1.1 工程风险事件可能性

研究共排查639个洪水单元在超标准暴雨洪水条件下工程风险事件可能性,并对占有所有类型单元的80%以上的渠道倒虹吸和暗渠类、排水倒虹吸类和排水渡槽类三类单元进行重点分析(图3)。结果

表明:所有类型单元风险事件可能性指数以1为主,占总单元数的56.5%,主要原因是渠道倒虹吸和暗渠类单元因位于高填方渠段,渠道高程由内水确定,渠顶高程裕度很大,发生漫顶的可能性极小;风险事件可能性指数为5的单元占比次之,共有88个占总单元数的13.8%,主要原因是排水倒虹吸类单元出现工程风险事件的可能性较大,占该类型单元的20.5%;排水渡槽风险事件可能性指数以3为主,主

要原因是当洪水流量超过渡槽过流能力时都会发生洪水漫槽入渠, 若在超标洪水条件下一般都要发生漫槽。生洪水漫槽入渠, 若以漫槽为最可能发生的风险事

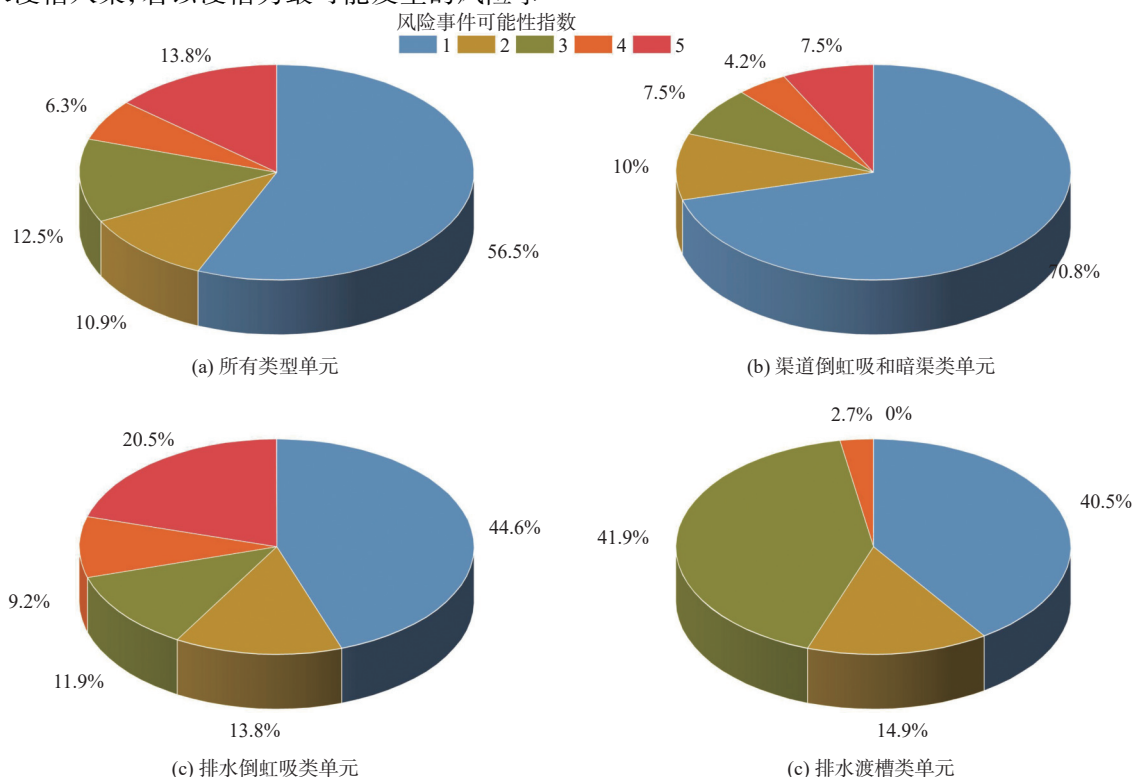


图 3 各类型单元风险事件可能性指数分布

Fig. 3 Distribution of probability index of various types of unit risk events

3.1.2 超标暴雨洪水条件下工程风险等级

综合超标暴雨洪水条件下工程风险事件可能性指数和后果严重性指数, 得到各评估单元的超标暴雨洪水条件下工程风险等级(图 4)。结果显示, 639 个评估单元中: 风险等级为 I 级的评估单元有 174 个, 占 27.2%; II 级的评估单元有 245 个, 占 38.4%; III 级的评估单元有 186 个, 占 29.1%; IV 级的

评估单元有 34 个, 占 5.3%。此外, 风险等级为 I、II、III 和 IV 级的风险量值中位数分别为 3.60、6.00、14.40 和 23.25, 风险等级为 I 级的风险量值主要集中在 3.60 左右; II 级的风险量值主要集中在 4.50 左右; III 级的风险量值主要集中在 15.00 左右; IV 级的风险量值主要集中在 25.00 左右。

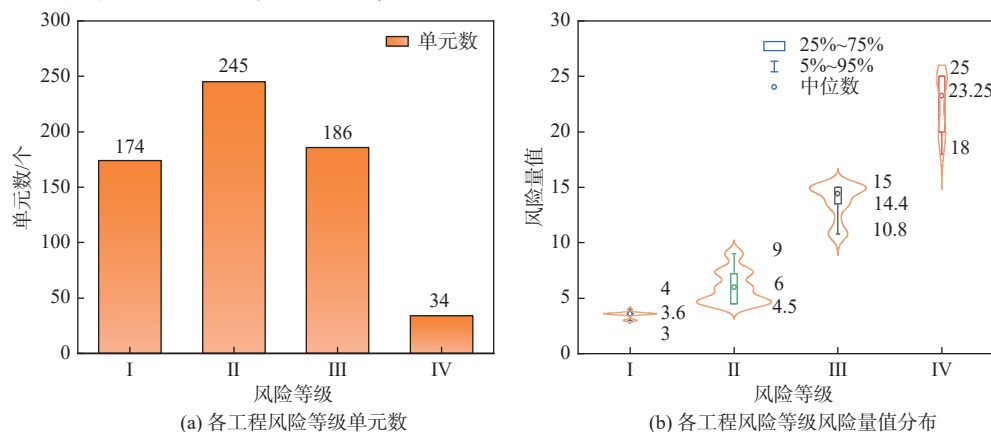


图 4 超标暴雨洪水条件下工程风险等级分布

Fig. 4 Distribution of engineering risk levels under over-standard rainstorm flood conditions

3.2 典型单元分析

3.2.1 设计和超标洪水分析

依据南水北调中线工程防洪要求, 当交叉断面

以上流域面积大于 20 km² 时, 其河渠交叉建筑物设计和校核标准分别为 100 年和 300 年一遇。本研究选取 350 年、400 年、450 年、500 年、1 000 年和

2 000 年 6 个重现期作为超标准洪水;流域面积小于 20 km² 的河流,其左岸排水建筑物设计和校核标准分别为 50 年和 200 年一遇,相应地选取 250 年、300 年、400 年、500 年、1 000 年、2 000 年 6 个重现期作为超标准洪水。此外,金水河交叉断面以上设计洪水,采用天然、郭家咀水库调蓄两种情景;石门河交叉断面以上设计洪水计算,则与初设保持一致,只考虑石门水库(中型水库)的调蓄作用。各河流交叉断面以上各频率洪水的洪峰流量、洪量见图 5。整体来看,金水河(未经郭家咀水库调蓄)、贾河、石

门河和沙沟交叉断面的设计和校核洪水不变;灌渠河交叉断面的设计和校核洪峰均减小 19%, 24 h 洪量均减少 36%;金水河洪水经郭家咀水库调蓄后,交叉断面设计和校核洪峰流量减少 28% 和 30%, 24 h 洪量减少 49% 和 50%。此外,各典型单元的洪峰流量和洪量均随洪水重现期的增大呈上升趋势,在 100 年一遇至 300 年一遇之间时,相对洪水频率变化的敏感性低,在超过 300 年一遇,尤其是 500 年一遇以上洪水重现期时,相对洪水频率变化的敏感性高。

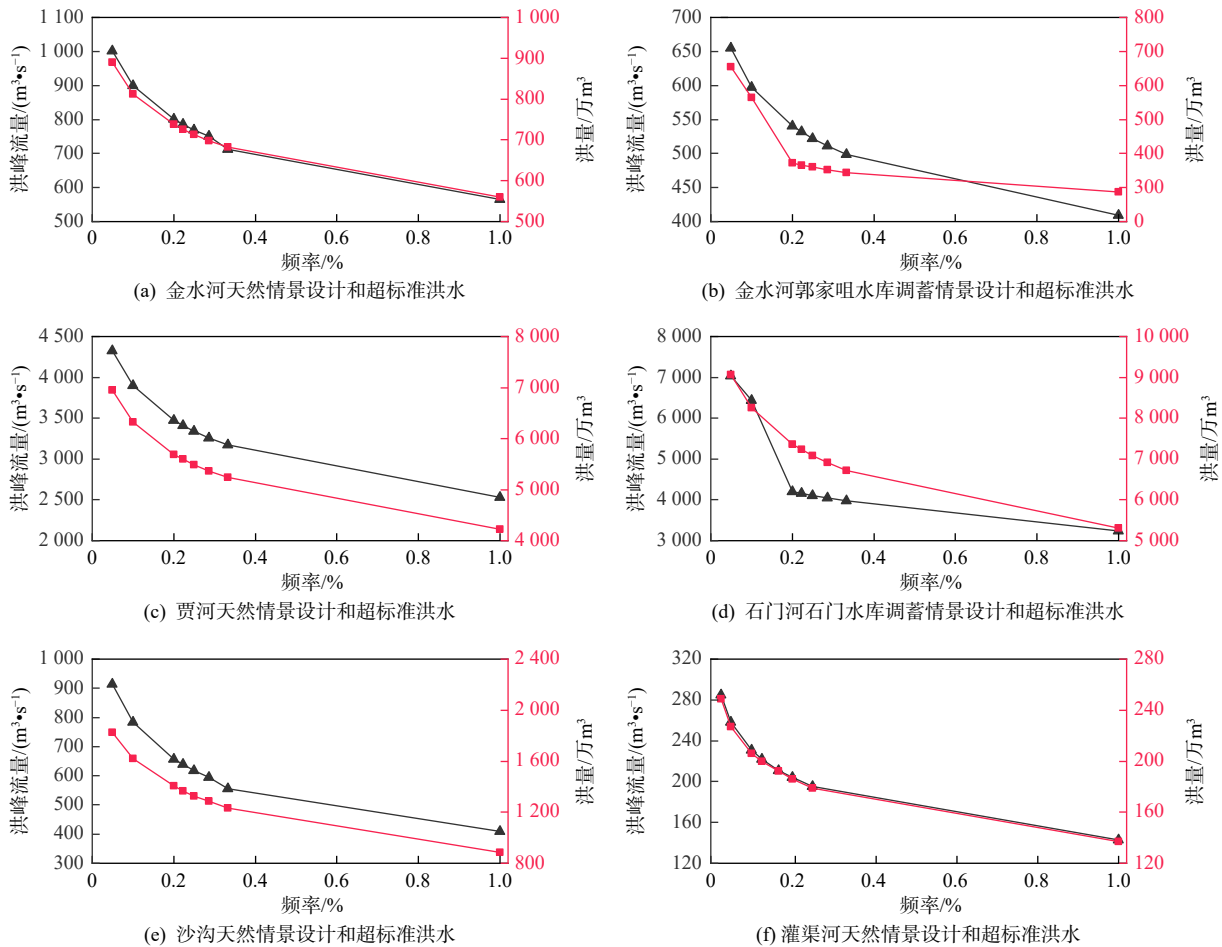


图 5 南水北调中线工程 5 个典型评估单元不同频率的设计和超标准洪水

Fig. 5 Design and over-standard flood in 5 typical evaluation units of middle route of South-to-North Water Transfer Project

3.2.2 水力要素复核

通过建立一维、二维洪水演进及耦合模型,利用复核的设计和校核标准洪水,对 5 个典型单元开展了水力要素复核(图 6)。结果表明:灌渠河排水倒虹吸复核的设计和校核洪水的水位均比原设计要低,分别低 0.59 m 和 0.73 m,且复核设计和校核流量分别比原标准低 33 m³/s 和 56 m³/s;贾河梁式渡槽交叉断面处复核的设计和校核洪水的水位均比原设计高,分别高 0.23 m 和 0.16 m,而复核设计和校核流量均与原标准相同。在天然工况下,金水

河渠道倒虹吸交叉断面处设计和校核洪水的水位分别比原设计标准高 0.35 m 和 0.36 m,而考虑郭家咀水库调蓄后,两个标准的水位、流量均比原设计标准低。石门河渠道倒虹吸的围堤冲毁前,两个标准的水位分别比原设计低 1.53 m 和 1.31 m,当围堤冲毁修复后,两个标准的水位则分别比原设计低 2.22 m 和 2.12 m。整体来看,对 5 个典型单元复核的设计和校核标准洪水水力要素与原设计较为接近,部分要素完全一致,这表明本研究所构建的模型能够较好地应用于典型单元风险评估。

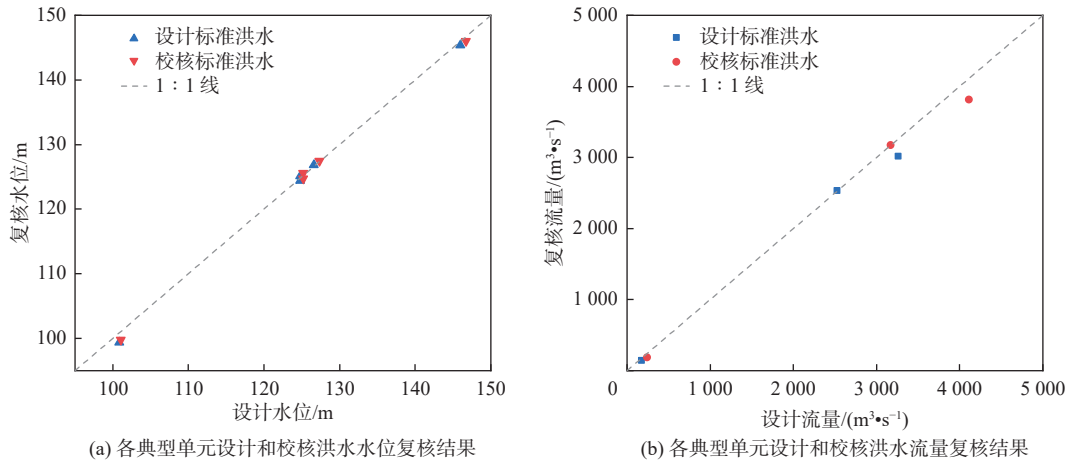


图 6 各典型单元设计和校核标准洪水水力要素复核结果

Fig. 6 The review results of hydraulic elements in the design and verification standard flood of each typical unit

3.2.3 极端暴雨洪水风险分析

中线工程 5 个典型评估单元交叉断面的洪水风险分析结果见表 4。结合各典型评估单元的防洪要求可知,在移用(植)“7•20”暴雨和“75•8”暴雨洪水情景下,灌渠河排水倒虹吸均满足防洪要求。现状条件下,贾河梁式渡槽在移用(植)“7•20”暴雨和“75•8”暴雨洪水时存在一定的工程风险。在“7•20”移用(植)洪水及“75•8”移用(植)两种工况下,金水河渠道倒虹吸河道冲刷均满足要求,但“75•8”移用(植)洪水有可能裹头漫溢入渠风险。遭遇“7•20”和“75•8”极端暴雨洪水时,石门河渠道倒虹吸管身存在冲刷失稳的风险,且裹头和岸坡现有的防护设

施均会冲刷坍塌。在“96•8”暴雨情景下沙沟排洪渡槽满足防洪要求,但在“63•8”暴雨洪水情景下存在槽身漫溢入渠的风险。此外,极端降雨移用(植)后在交叉断面处形成的洪水基本上呈现流域面积越小,洪水重现期越大,即洪水量级越大的趋势和特点。这与历史极端降雨时空分布的笼罩范围密切相关,对于面积较小的流域,特大暴雨基本覆盖整个汇水流域范围,而对于面积较大的流域如石门河则无法全部覆盖,面平均雨量会明显降低,产生的洪峰量级也相应降低。

表 4 南水北调中线工程 5 个典型评估单元在极端降雨情景下洪水风险分析结果

Tab. 4 Flood risk analysis results of 5 typical evaluation units of middle route of South-to-North Water Transfer Project under extreme rainfall scenarios

单元名称	流域面积/km ²	情景	最高水位/m	最大流速/(m•s ⁻¹)	洪峰流量/(m ³ •s ⁻¹)	重现期(洪峰流量)/(m ³ •s ⁻¹)
灌渠河	6.4	“7•20”移用(植)	146.37	4.24	220	500年一遇(209) 1000年一遇(231)
		“75•8”移用(植)	146.88	5.09	264	2000年一遇(255)
贾河	98.2	“7•20”移用(植)	126.48	3.86	2 178	100年一遇(2 530)
		“75•8”移用(植)	127.83	4.28	3 573	500年一遇(3 476) 1000年一遇(3 898)
金水河	25.4	“7•20”移用(植)	125.14	1.97	569	100年一遇(566)
		“75•8”移用(植)	125.79	2.12	813	500年一遇(801) 1000年一遇(900)
石门河	207.0	“7•20”移用(植)	98.88(围堤右)	6.20(围堤右)	3 488	100年一遇(3 016) 300年一遇(3 813)
			97.84(围堤左)	2.76(围堤左)		
		“75•8”移用(植)	99.25(围堤右)	6.69(围堤右)	4 416	500年一遇(3 990) 1000年一遇(5 816)
			98.07(围堤左)	3.02(围堤左)		
沙沟	23.8	“63•8”移用(植)	96.24	5.81	625	500年一遇(621)
		“96•8”移用(植)	95.16	4.32	315	50年一遇 100年一遇

3.2.4 典型单元风险事件可能性分析

根据 5 个典型单元在超标准洪水条件下的防洪安全性复核结果,结合总干渠和建筑物风险识别成

果和超标准洪水条件下工程风险事件可能性标准,可以分析出 5 个典型单元风险事件可能性及风险等级(表 5)。由表 5 可知:在 5 个典型单元中灌渠河

排水倒虹吸和金水河渠道倒虹吸发生渠顶漫溢的风险较低,风险量值分别为 6.0 和 7.5,均属于一般风险;贾河梁式渡槽和石门河渠道倒虹吸防洪能力不足存在较高的风险,风险量值均为 25.0,均属于重

大风险;沙沟排洪渡槽在“96·8”暴雨情景下能够满足防洪要求,但在“63·8”暴雨洪水情景下存在槽身漫溢入渠的风险,风险量值为 19.2,也属于重大风险。

表 5 超标准暴雨洪水条件下 5 个典型单元风险事件可能性及风险等级评估

Tab. 5 Possibility and risk level evaluation of 5 typical units risk events under over-standard rainstorm flood conditions

评估单元	风险事件	工程风险事件可能性指数	修正后工程风险事件可能性指数	后果严重性指数	风险量值	风险等级
灌渠河排水倒虹吸	进口侧渠堤(防护堤)漫顶	2	2.0	3	6.0	II
	槽下净空不足	2				
贾河梁式渡槽	槽墩冲刷失稳	5	5.0	5	25.0	IV
	裹头、边墩冲刷失稳	1				
金水河渠道倒虹吸	渠堤连接段漫顶	1				
	管身冲刷失稳	1	1.5	5	7.5	II
	裹头冲刷失稳	1				
石门河渠道倒虹吸	渠堤连接段漫顶	1				
	管身冲刷失稳	5	5.0	5	25.0	IV
	裹头冲刷失稳	1				
沙沟排洪渡槽	进口侧渠堤(防护堤)漫顶	4				
	槽身漫溢	4	4.8	4	19.2	IV

4 结论

本研究对 639 个洪水单元的工程风险事件可能性和风险等级评估,并针对所选灌渠河、贾河、金水河、石门河和沙沟 5 个典型评估单元,建立“左岸汇水区—交叉建筑物—右岸淹没区”洪水演进模型和河道一维洪水分析模型,确定在超标准暴雨洪水下典型单元的洪水风险情况,评估对中线工程渠道和建筑物的影响。主要结论如下:

在 639 个评估单元中,风险事件可能性指数以 1 为主的单元最多,占单元数的 56.5%;指数为 4 的单元最少,仅占单元数的 6.3%。风险等级为 II 级(一般风险)的单元占比最大为 38.4%,IV 级(重大风险)的单元占比最小仅为 5.3%。

从复核的设计和校核标准洪水水力要素的结果来看,所构建地模型能够较好的应用于各典型单元风险评估。各典型单元的洪峰和洪量均随洪水重现期增大呈上升趋势,在洪水重现期低于 300 年一遇时,相对洪水频率变化的敏感性低,当超过 500 年一遇时,相对洪水频率变化的敏感性高。

从 5 个典型评估单元的分析结果看,“7·20”特大暴雨和“75·8”洪水的暴雨移用(植)情景对于灌渠河均为超校核标准洪水。“7·20”特大暴雨移用

(植)情景下,贾河、金水河和石门河交叉断面处均为校核标准内洪水,“75·8”洪水的降雨移用(植)情景下,3 个典型评估单元均发生超 500 年一遇的洪水。针对沙沟单元,“63·8”洪水相当于 500 年一遇超过建筑物的校核标准,“96·8”洪水仍在设计标准内,且“63·8”洪水的雨量和影响远大于“7·20”特大暴雨。

在 5 个典型单元中,灌渠河排水倒虹吸和金水河渠道倒虹吸的风险量值相对较低,均属于一般风险;沙沟排洪渡槽、贾河梁式渡槽和石门河渠道倒虹吸存在较高的风险,均属于重大风险。

参考文献:

- [1] 冯志勇,李立群,吴永妍,等.南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):600-609. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0061.
- [2] 李立群,陈晓楠,陈文学.南水北调中线典型输水建筑物表面降糙防护探析[J].中国农村水利水电,2022(10):143-147,153. DOI: 10.12396/znsd.212008.
- [3] 马慧敏,何向东,张帅,等.南水北调中线膨胀土(岩)渠段问题及成因分析[J].人民黄河,2020,42(2):128-131. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.02.027.

- [4] 谢向荣, 郑光俊. 南水北调中线渠道工程关键技术研究[J]. *水利水电快报*, 2020, 41(2): 32-39. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2020.02.007.
- [5] 孙伟良, 李晓克, 程凯书, 等. 大直径地铁隧道下穿南水北调中线总干渠影响分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(5): 46-52. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2020062.
- [6] 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.
- [7] 胡丹, 郑良, 李硕, 等. 南水北调中线明渠工程运行风险评价方法研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 98-101. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.06098.
- [8] KONG X M, HUANG G H, FAN Y R, et al. Risk analysis for water resources management under dual uncertainties through factorial analysis and fuzzy random value-at-risk[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(9): 2265-2280. DOI: 10.1007/s00477-017-1382-3.
- [9] 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.
- [10] 马力, 刘汉东. 南水北调工程输水渠道运行安全风险评价[J]. *人民黄河*, 2022, 44(3): 138-143. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.03.027.
- [11] 冯平, 闫大鹏, 耿六成, 等. 南水北调中线总干渠防洪风险评估方法的研究[J]. *水利学报*, 2003(4): 40-45. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2003.04.008.
- [12] 黄昌硕, 刘恒, 耿雷华, 等. 南水北调工程运行风险控制初探[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(4): 10-12. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.04.003.
- [13] 位文涛, 靳燕国, 张召, 等. 南水北调中线工程流量监测站点倒挂数据清洗模型及应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1158-1167. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0114.
- [14] 曹雪健, 戚友存, 李梦迪, 等. 极端暴雨威胁下的城市内涝风险预警系统研究[J]. *大气科学*, 2022, 46(4): 953-964. DOI: 10.3878/j.issn.10069895.2112.21191.
- [15] 杜霞, 耿雷华. 南水北调中线工程运行风险分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2011, 42(3): 85-88. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.03.024.
- [16] 王军, 吴迪, 王超杰, 等. “21·7”河南极端降水的远距离台风作用分析[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(2): 75-85. DOI: 10.16765/j.cnki.16737148.2022.02.008.
- [17] 仲志余, 刘国强, 吴泽宇. 南水北调中线工程水量调度实践及分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 95-99, 143. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180015.
- [18] 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.10014179.2021.11.035.
- [19] 何小聪, 康玲, 程晓君, 等. 基于贝叶斯网络的南水北调中线工程暴雨洪水风险分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 10-13. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.04010.
- [20] 王浩, 雷晓辉, 尚毅梓. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 1-8. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001.
- [21] 李明新, 王辉, 张明波. 南水北调中线工程交叉河流设计洪水分析[J]. *人民长江*, 2005(10): 4-6. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.10.002.
- [22] 郝泽嘉, 郝清华. 交通桥梁跨越中线工程风险识别及处理措施[J]. *水科学与工程学报*, 2017(4): 82-85. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2017.04.029.
- [23] 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: 10.3724/SP.J.1201.2010.03001.
- [24] 周克发, 袁辉. 基于病害指数的大坝溃决可能性评价研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(2): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2011.02.002.
- [25] 汤洪洁. 长距离调水工程风险评估工作思考[J]. *水利规划与设计*, 2020(5): 86-91. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2020.05.020.
- [26] 李锋, 王慧敏. 基于知识元的非常规突发洪水事件演化风险研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3255-3264. DOI: 10.12011/1000-6788(2016)12-3255-10.
- [27] 周杨, 陈栋, 韩潇, 等. 调洪演算模型分析洪泽湖退圩还湖实施前后影响[J]. *水利规划与设计*, 2020(7): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.16722469.2020.07.015.

Risk assessment of each unit along the middle route of South-to-North Water Transfer Project under over-standard rainstorm flood conditions

KANG Yajing¹, LIU Yu^{2,3}, XIE Jiabi³

(1. China South-to-North Water Diversion Group Water Network Water Investment Co., Ltd., Beijing 100142, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The middle route of South-to-North Water Transfer Project is a large-scale water diversion project with cross-basin, large flow, and long distance. It is a major strategic infrastructure to alleviate the shortage of water resources in northern China, realize the rational allocation of water resources, and ensure sustainable economic and social development. With global warming, the frequency of extreme rainstorm and flood disasters has increased significantly. Since its operation, the middle route of South-to-North Water Transfer Project has encountered severe torrential rainstorm disasters many times, and is facing serious problems of water damage. Therefore, it is necessary to further study the degree of risk in the middle route project when encountering over-standard rainstorms floods.

The channels and buildings of the middle route of South-to-North Water Transfer Project were taken as the research object, and the method of combining the overall risk assessment and the typical unit analysis was used to evaluate the overall risk of 639 units of the middle route project, and the five typical units of Guanqu River, Jia River, Jinshui River, Shimen River, and Shagou were focuses on. In engineering risk analysis, methods such as engineering risk event possibility index and engineering risk event consequence severity were adopted. In the risk analysis of over-standard rainstorms floods, the risk of typical assessment units was analyzed through the construction of rainstorms flood analysis model, extreme rainfall migration (planting) setting, scheme simulation, and statistical analysis of results.

The results show that among the 639 evaluation units of the middle route of South-to-North Water Transfer Project, the units with a risk event probability index of 1 account for the largest proportion, and the risk level is mainly general risk. In the five typical units, the flood formed at the cross-section after extreme rainfall migration (planting) presents the characteristics that the smaller the watershed area, the larger the flood magnitude. In addition, the risk of overflow at the top of the irrigation canal river drainage inverted siphon is low. The Jiahe beam aqueduct, Shagou flood discharge aqueduct, and Shimen River channel inverted siphon all have high engineering risks. The erosion of Jinshui River channel inverted siphon meets the requirements under over-standard flood, and the project risk is low.

The conclusion indicates that under the condition of over-standard rainstorm flood, the channels and buildings of the middle route of South-to-North Water Transfer Project are generally low-risk, but some typical units have engineering risks such as insufficient flood control capacity, overflow of trough body, and embankment top, erosion and exposure of piers and abutments, and dam failure. Therefore, to ensure the safe operation of the middle route project, it is still necessary to further strengthen the engineering and non-engineering protection measures, and scientifically and reasonably formulate the revision mechanism of the over-standard rainstorm flood prevention plan. The research results have guiding significance for the early deployment of defense against the over-standard rainstorm flood in the middle route of South-to-North Water Transfer Project.

Key words: middle route of South-to-North Water Transfer Project; over-standard rainstorm flood; risk assessment; typical unit analysis; extreme rainfall migration (planting)