

岩溶山区城市地下隧道工程地质灾害风险分析

付君宜, 陈发达, 沈志平, 尹林莉, 王 祥

Risk analysis of the geological hazards during urban tunnel construction in mountainous karst areas

FU Junyi, CHEN Fada, SHEN Zhiping, YIN Linli, and WANG Xiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106-112

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City

周心经, 郭宇, 郑小战, 李晶晶, 张俊岭, 朱照宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 63-71

隧道洞口浅埋偏压段两种围岩注浆措施的抗震效果分析

Anti-seismic effect analysis of two kinds of surrounding rock grouting measures in the shallow and eccentric pressure section of tunnel portal

崔光耀, 宋博涵, 肖剑, 王道远 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 98-104



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205013

付君宜, 陈发达, 沈志平, 等. 岩溶山区城市地下隧道工程地质灾害风险分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 100-108.
FU Junyi, CHEN Fada, SHEN Zhiping, et al. Risk analysis of the geological hazards during urban tunnel construction in mountainous karst areas[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 100-108.

岩溶山区城市地下隧道工程地质灾害风险分析

付君宜¹, 陈发达², 沈志平¹, 尹林莉¹, 王 祥²

1. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550012;
2. 贵阳市城市轨道交通集团有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:岩溶山区城市地下隧道工程施工过程中存在大量不确定地质灾害风险因素, 由于成本和工期等原因无法详细查明所有水文地质和工程地质灾害风险源, 导致各种灾害事故频发。目前对于隧道工程灾害评价方法多依靠专家打分, 受人为主观因素影响大, 且部分评价指标难以量化。为解决上述问题, 依托岩溶山区轨道交通工程——贵阳市轨道交通 2 号线一期工程, 统计其 26 段区间隧道施工过程中灾害发生位置、类型, 仅选取明显相关地质灾害风险因素作为评价因素, 根据灾害类型和地质灾害风险因素的位置关系反演出灾害发生频率与地质灾害风险因素间的耦合关系, 建立岩溶山区城市隧道工程风险灾害评价体系。评价结果表明灾害发生频率与评价体系分段结果吻合程度均在 69% 以上, 评价体系能够较好预测灾害发生频率。

关键词:岩溶山区; 隧道工程; 风险评价; 灾害频率; 反演分析

中图分类号: P694; U452.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)03-0100-09

Risk analysis of the geological hazards during urban tunnel construction in mountainous karst areas

FU Junyi¹, CHEN Fada², SHEN Zhiping¹, YIN Linli¹, WANG Xiang²

1. Guizhou Zhengye Engineering and Technology Investment Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550012, China; 2. Guiyang Urban Rail Transit Group Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Construction of urban tunnel engineering in mountainous karst regions involves a plethora of uncertain geological risk factors. Due to cost and schedule constraints, hydrogeological and engineering geological risk sources cannot be identified in detail, leading to frequent disasters. Expert scoring, which is influenced by human subjectivity, is a common method for disaster evaluation in tunnel engineering, and some evaluation indicators are difficult to quantify. In order to address these issues, Guiyang rail transit line 2 Phase I project was selected as a case study to establish a risk disaster evaluation system for urban tunnel engineering in mountainous karst regions. The location and type of the disasters during construction were recorded for 26 running tunnels, and geological risk factors that were significantly correlated were selected as evaluation factors. The coupling relationship between the frequency of disaster occurrence and the geological risk factors was inverted, leading to the establishment of the risk disaster evaluation system of urban tunnel engineering in mountainous karst region. The evaluation

收稿日期: 2022-05-07; 修订日期: 2022-07-26

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 贵州省科研机构创新能力建设专项资金项目(黔科合企 [2019]4003); 中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地 [2021]4001)

第一作者: 付君宜(1988-), 男, 河南开封人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: 415981578@qq.com

通讯作者: 陈发达(1968-), 男, 贵州贵阳人, 学士, 研究员, 主要从事城市轨道交通建设与管理的工作。E-mail: 375431376@qq.com

results demonstrate that the degree of consistency between the frequency of disaster occurrence and the segmentation results of the evaluation system is more than 69%, indicating that the evaluation system is capable of predicting the frequency of disaster occurrence effectively.

Keywords: mountainous karst region; tunnel engineering; risk evaluation; disaster frequency; back analysis

0 引言

贵阳市位于云贵高原山区中部的东斜坡上,是典型岩溶山区,区域地形起伏大,地质条件复杂。轨道交通工程建设需穿越碳酸盐岩地层,各地层赋水性差异大,受构造影响,隐伏性岩溶发育强烈,岩溶溶洞水、岩溶管道水极其丰富,地下水埋深浅^[1]。建设至今,贵阳市轨道交通1号线、2号线施工过程中就发生过多起灾害事故,诱发了多次不同程度的路面塌陷、基坑围护结构失稳变形、边坡土体失衡坍塌、洞内塌方等^[2-4],不仅工期延误,还造成了严重经济损失。

目前,国内外学者对城市轨道交通工程风险评价开展了大量研究,取得了一定成果。评价方法采用定性为主的有层次分析法^[5-7]、模糊综合评价法^[8-10]、数学理论模型^[11-12]等,上述方法存在依赖人为主观判断的问题;定量评价方法有贝叶斯网络法^[13-14]、BP神经网络方法^[15-16]、蒙特卡罗法^[17]等,存在需要庞大数据库作为支撑的问题,通常数据来源于数值模拟,对于复杂施工环境模拟难度较大,且评价结果也难直观反映各评价因素的合格程度^[18]。此外,轨道交通工程风险评价因素通常种类较多,一般包含地质灾害风险因素、施工风险因素、周边环境风险因素等,很多因素难以量化,如李堃^[19]依托青岛地铁13号线工程提出区间隧道施工风险管理评价体系,评价因素包含“施工设备维护”、“政府政策干预”等;张飞^[20]针对贵阳市地铁1号线沙冲路站—望城坡站区间隧道工程提出施工风险评价体系,评价因素包括“爆破设计不合理”“工法转换不及时”“超前导管注浆不到位”等,上述评价因素难以量化,只能依靠专家打分确定。

为解决上述问题,本文将收集到的贵阳轨道交通2号线一期工程共计26个区间隧道发生的所有事故灾害作为数据样本,分析灾害类型和地质灾害风险因素,根据灾害发生处地层情况反演灾害发生频率与地质灾害风险因素间的耦合关系,尽可能减少人为主观因素影响,将轨道交通2号线一期工程的所有区间隧道进行灾害风险分段,为类似岩溶地区地下空间结构隧道建设的灾害风险控制提供了新的解决方法。

1 贵阳市轨道交通2号线一期工程概况

1.1 站点及区间隧道概况

贵阳市轨道交通2号线为南北—东西—南北向骨干线。2号线一期工程(七机路口站—油榨街站)线路全长27.7 km,均为地下线,共设车站25座,26段区间隧道(图1)。26段区间隧道平均站间距1 196 m,最大站间距2 125 m,最小站间距634 m,其中共4座换乘站。区间隧道以浅埋暗挖法为主,主要施工设备为悬臂挖掘机,部分区间隧道的少数交叉段采用明挖工法。

1.2 场区工程地质与水文地质概况

工程区涉及地层主要有二叠系、三叠系、侏罗系及第四系地层,主要土层有淤泥质土、夹杂卵石碎石的有机质土、含有建筑垃圾的红黏土人工填土、泥岩、砂岩、白云岩、灰岩等。2号线一期工程穿越断层共计14条,断层岩土完整性差,岩溶强烈发育,地下水发育。根据2号线勘察报告,工程统计的654个地质钻孔,发现溶洞199个,见洞率为20.3%。

2号线一期工程地表涉及水体主要有:白云区行政中心站—南湖路西侧约0.25 km为南湖水库,观山西路站西侧0.6 km为十二滩水库,诚信路站—观山西路站东侧1.5 km处为观山湖水库,二桥站北东2.0 km处为黔灵湖,观水路站—油榨街站下穿南明河。沿线地下水类型有松散层孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶水。

2 区间隧道灾害类型及风险因素

2.1 区间隧道工程灾害类型

通过对贵阳市轨道交通2号线一期工程施工风险事故处理相关会议纪要、第三方探察资料、地表异常处理总结报告等资料分析,分别筛选并汇总出轨道交通2号线一期工程施工过程中区间隧道工程所发生的事故灾害,并对各灾害进行分类,统计出区间隧道工程施工过程中所发生的灾害类型主要为涌水涌泥、隧道坍塌、地面塌陷、地表脱空、管道破损及建(构)筑物沉降变形。实际现场对于涌水涌泥和隧道坍塌难以区分,故将涌水涌泥和隧道坍塌分为同一种灾害;地面塌陷与地表脱空如图2所示,地表脱空后受到较重荷载就会发生

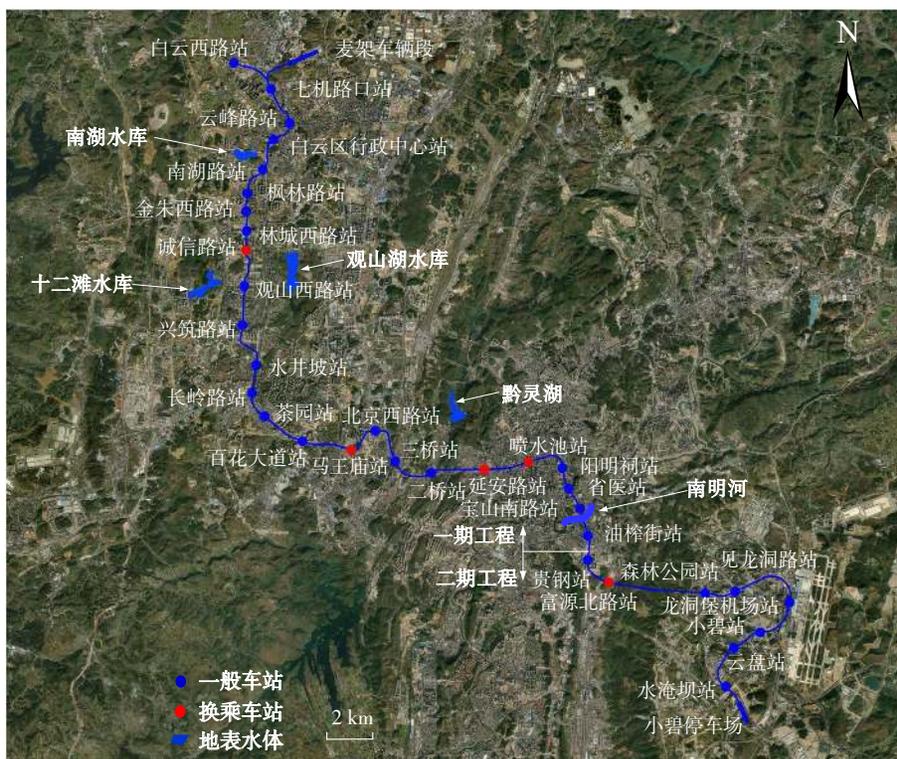


图 1 贵阳市轨道交通 2 号线区间隧道平面分布

Fig. 1 The plan distribution of Guiyang rail transit line 2 sectional tunnels

塌陷,故将两种灾害分为同一种灾害,最终共计四种灾害类型:涌水涌泥(坍塌)、地面塌陷(脱空)、管道破损及建(构)筑物沉降变形。

表 1 灾害数量统计
Table 1 Statistics of Disaster quantity

灾害类型	发生次数	占比/%
涌水涌泥(坍塌)	86	47.5
地面塌陷(脱空)	71	39.2
管道破损	22	12.2
建(构)筑物沉降变形	2	1.1

针对建(构)筑物沉降变形这类灾害,由于贵阳轨道交通 2 号线一期工程事故灾害发生次数过少,无法分析地质因素,这里推荐采用《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50650—2011)^[21]中对建构筑物与隧道临近关系及建(构)筑物重要性分类进行风险等级划分,本文不再论述。

2.2 区间隧道工程灾害风险评价因素

将统计出的灾害绘制在工程地质剖面图上形成灾害事故分布图,在分布图中分析事故发生处地层情况,识别出各灾害类型主要风险因素。以七机路口站—云峰路站、水井坡站—长岭路站、阳明祠站—省医站区间隧道为例,隧道事故灾害分布图如图 3 所示。对 26 段区间隧道事故灾害分布图分析得到各灾害发生频率明显与下列因素有关:

涌水涌泥(坍塌)灾害在隧道拱顶与岩土分界面较



图 2 七机路口站—云峰路站区间隧道地面塌陷与地表脱空

Fig. 2 Surface collapse and surface void on sectional tunnel of Qiji - Yunfeng station

26 段区间隧道各灾害类型发生次数如表 1 所示,表 1 表明 26 段区间隧道主要发生的灾害为涌水涌泥(坍塌)、地面塌陷(脱空)、管道破损,而建(构)筑物沉降变形仅在七机路口站—云峰路站区间隧道,云峰路站—白云行政中心站区间隧道出现 2 处房屋开裂,房屋开裂原因均为路面塌陷导致。

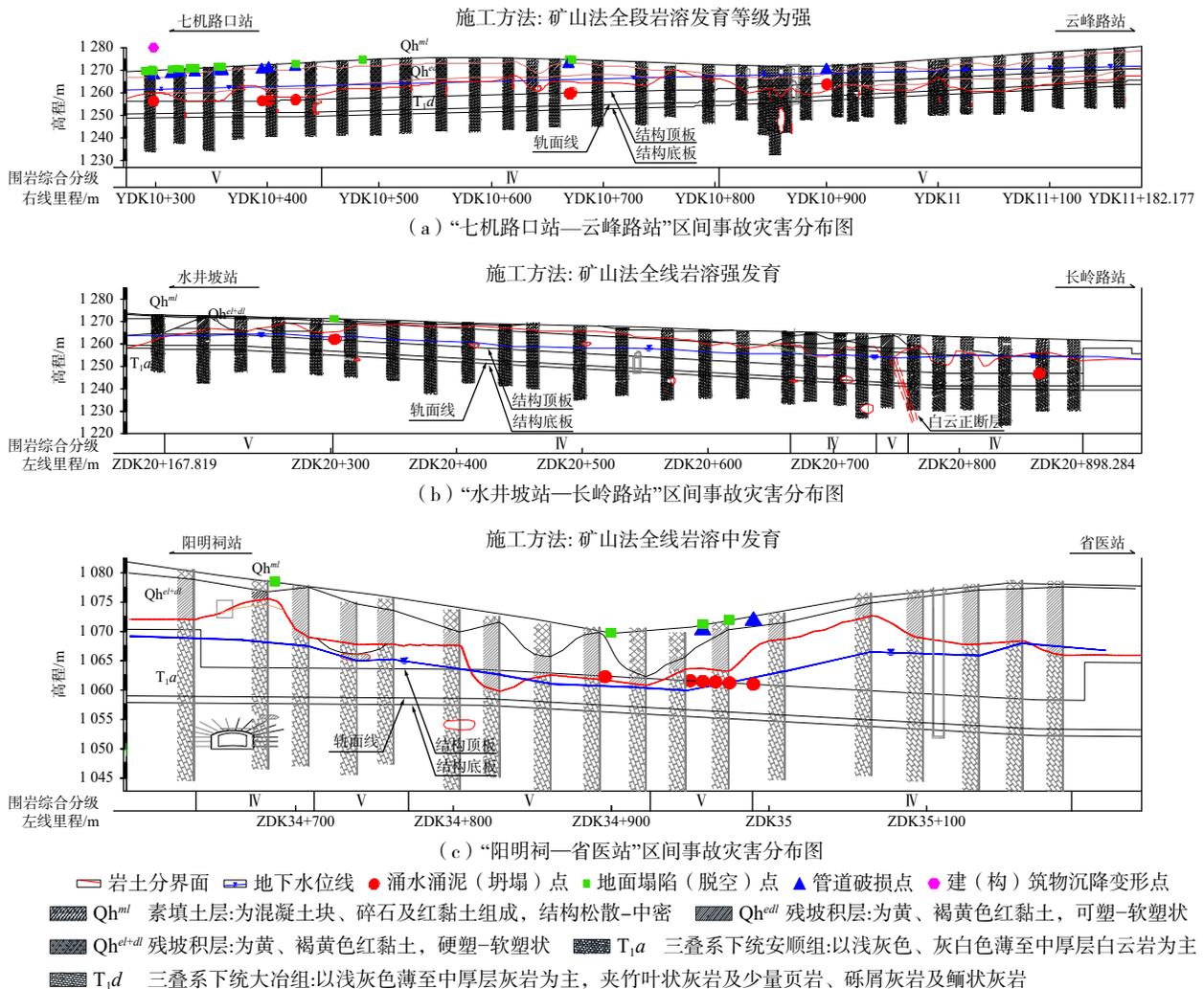


图 3 部分区间隧道事故灾害分布图

Fig. 3 Distribution map of disaster accidents in some tunnel sections

近, 或和地下水位面较近的位置更容易发生, 故将上述 2 个因素作为评价因素;

地面塌陷(脱空)灾害在涌水涌泥(坍塌)灾害发生的位置上方发生频率较高, 二者有显著耦合关系, 故将涌水涌泥(坍塌)灾害评价结果作为地面塌陷(脱空)灾害的评价因素;

针对管道破损灾害, 其经常和地面塌陷(脱空)灾害同时出现, 但地面塌陷(脱空)灾害和管道破损灾害发生的因果关系难以确定, 且根据有关数据贵阳市供水管网约有 1/3 供水量泄漏, 上述原因均导致管道破损灾害的评价因素难以明确, 有鉴于此, 本文仅根据事故灾害分布图中的规律来确定管道破损灾害评价因素。图 3 表明, 管道破损灾害发生的位置附近常伴随地面塌陷(脱空)灾害的连续发生, 二者有明显耦合关系, 故将地面塌陷(脱空)灾害的评价结果和连续分布长度作为评价因

素。此外考虑溶洞、溶沟、溶槽等岩溶相关因素都与 3 种灾害的发生有关, 这里引入岩溶发育等级作为 3 种灾害的评价因素。

关于围岩分级对灾害发生影响如图 3 所示, 围岩综合分级依据《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012)相关规定, 结合隧道埋深、工程地质及水文地质条件, 尤其是以拱顶、边墙、隧底岩土层的稳定为主要依据进行综合判定, 判定结果为 26 段区间隧道围岩分级均为 IV 级和 V 级, 且 2 种分级围岩均有灾害发生, 围岩分级与灾害发生频率间未发现显著关联, 故不将围岩分级作为评价指标。

根据上述结论, 确定 3 种灾害评价因素如下:

涌水涌泥(坍塌)灾害评价因素为: 岩土分界面与拱顶距离、地下水与拱顶距离、岩溶发育等级;

地面塌陷(脱空)灾害评价因素为: 岩溶发育等级、

涌水涌泥(坍塌)灾害评价结果;

管道破损灾害评价因素为:地面塌陷(脱空)灾害评价结果、分布里程长度。

3 灾害风险评价体系建立

3.1 涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价体系

26 段区间隧道涌水涌泥(坍塌)灾害发生次数统计结果如表 2 所示,由表 2 可得当岩土分界面高于拱顶 0~8 m 时、地下水位面高于拱顶 0~8 m 时,涌水涌泥(坍塌)灾害发生次数较多,当两个分界面高于拱顶 8 m 以上时虽然总次数很多,但该总次数包括大量山体下方隧道,隧道顶板上部围岩厚度可达到 10~50 m,其实际灾害发生频率很低;当岩土分界面低于拱顶 0~4 m 时、地下水位面低于拱顶 0~4 m 时,涌水涌泥(坍塌)灾害发生次数较多,但当岩土分界面与拱顶距离很远时,地下水与拱顶距离和涌水涌泥(坍塌)灾害发生率之间无明显关系,如图 3(b)所示。

表 2 涌水涌泥(坍塌)灾害次数统计
Table 2 Statistics of gushing water and bursting mud(collapse) disaster occurrences

岩土分界面与拱顶距离/m	次数	地下水位线与拱顶距离/m	次数
高于拱顶0~4	18	高于拱顶0~4	12
高于拱顶4~8	13	高于拱顶4~8	18
高于拱顶8以上	39	高于拱顶8以上	42
低于拱顶0~4	6	低于拱顶0~4	14
低于拱顶4以上	10	低于拱顶4以上	0

此外,26 段区间隧道中,岩溶强发育和岩溶中发育区间隧道数量均为 11 个,岩溶弱发育区间隧道数量为 4 个,岩溶强发育的区间隧道更容易发生涌水涌泥(坍塌)灾害,但是没有岩土分界面与拱顶距离、地下水与拱顶距离 2 个因素显著。

根据表 2 统计结果可以得出,岩土分界面与拱顶距离为涌水涌泥(坍塌)灾害的最主要影响因素,同时涌水涌泥(坍塌)灾害评价结果又影响到地面塌陷(脱空)灾害和管道破损灾害,故将岩土分界面与拱顶距离作为区间隧道灾害分段依据,如表 3 所示将区间隧道分为岩土分界面高于拱顶 0~4 m、4~8 m、8 m 以上,岩土分界面低于拱顶 0~4 m、4 m 以上等分段。计算每个分段的岩土分界面、地下水位面与拱顶平均距离,按表 3 采用固定分数减去平均距离的方式进行分值计算,将分值计算结果与权重相乘得到最终分值。根据最终分值将涌水涌泥(坍塌)灾害等级从高到低分为三级:一级 5.1~10 分,二级 1.6~5.0 分,三级 0~1.5 分。该评价体

系的分值计算方式、权重和灾害等级分级划分均经过反复调整,以达到最大限度接近实际灾害分布情况的目标。

表 3 涌水涌泥(坍塌)灾害评价因素评分标准和权重
Table 3 Scoring criteria and weighting table for gushing water and bursting mud(collapse) risk evaluation factors

评价因素分级	分值计算	权重
岩土分界面高于拱顶:0~4 m和4~8 m	10-平均距离	0.50
岩土分界面低于拱顶:0~4 m	5-平均距离	
岩土分界面高于拱顶超过8 m或低于拱顶超过4 m	0	
地下水位线高于拱顶:0~8 m	10-平均距离	0.35
地下水位线低于拱顶:0~4 m	5-平均距离	
地下水位线高于拱顶超过8 m或低于拱顶超过4 m	0	
岩溶发育等级强	8.3	0.15
岩溶发育等级中	5.1	
岩溶发育等级弱	1.8	

注:当岩土分界面高于拱顶超过8 m或低于拱顶超过4 m时,地下水位线与拱顶距离评价因素分值直接取0。

3.2 地面塌陷(脱空)和管道破损灾害风险评价体系

根据图 3 对区间隧道岩溶发育等级及涌水涌泥(坍塌)灾害发生情况进行分析,结果表明:岩溶发育等级越高和涌水涌泥(坍塌)这两个因素会导致地面塌陷(脱空)发生的可能性增大;地面塌陷(脱空)集中发生的区域则管道破损发生可能性增大,即管道破损发生可能性与地面塌陷(脱空)灾害的评分结果和分段长度有关。根据图 3 反演各风险因素的分值和权重如表 4 和表 5 所示,地面塌陷(脱空)灾害等级分为三级:一级 6.6~10 分,二级 3.6~6.5 分,三级 0~3.5 分,该评价体系同样经过反复调整以达到最大限度接近实际灾害分布情况的目标。

表 4 地面塌陷(脱空)灾害评价因素评分标准和权重
Table 4 Scoring criteria and weighting table for surface collapse(void) risk evaluation factors

评价因素分级	分值	权重
岩溶发育等级强	8.3	0.55
岩溶发育等级中	5.1	
岩溶发育等级弱	1.8	
涌水涌泥(坍塌)灾害	涌水涌泥(坍塌)评分结果	0.45

表 5 管道破损灾害风险分级标准
Table 5 Pipeline breakage disaster risk classification standards

风险因素分级	风险等级
地面塌陷(脱空)灾害风险等级为一级,且一级分段长度大于100 m	一级
其他情况均为三级	三级

4 部分区间隧道灾害风险分级

4.1 七机路口站—云峰路站区间隧道灾害风险分级

根据图 3(a)岩土分界面与拱顶距离, 将七机路口站—云峰路站区间隧道划分 6 个分段如表 6 所示。将表 6 中 6 个分段的涌水涌泥(坍塌)灾害进行风险评价, 得出涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果见表 7, 地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果见表 8, 管道破损灾害风险评价结果见表 9。

表 6 七机路口站—云峰路站区间隧道分段

Table 6 The running tunnel section of Qiji-Yunfeng station

岩土分界面与拱顶距离/m	里程	里程代号
高于拱顶0~4	YDK10+273.3~YDK10+462.5	1
	YDK10+632.4~YDK10+745.3	3
高于拱顶4~8	YDK10+462.5~YDK10+632.4	2
	YDK10+745.3~YDK10+809.5	4
低于拱顶0~4	YDK10+809.5~YDK11+018.3	5
低于拱顶超过4	YDK11+018.3~YDK11+182.2	6

表 7 七机路口站—云峰路站区间隧道涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果

Table 7 The evaluation of gushing water and bursting mud(collapse) on Qiji-Yunfeng station running tunnel

里程代号	岩土分界面与拱顶平均距离			地下水与拱顶平均距离			岩溶发育等级		评价结果	风险等级	
	平均距离/m	分值	权重	平均距离/m	分值	权重	等级	分值			权重
1	高于拱顶2.6	7.4	0.5	高于拱顶5.9	4.1	0.35	强	8.3	6.4	一级	
2	高于拱顶5.4	4.6		高于拱顶6.3	3.7		强	8.3		4.8	二级
3	高于拱顶3.6	6.4		高于拱顶6.2	3.8		强	8.3		5.8	一级
4	高于拱顶5.4	4.6		高于拱顶6.0	4		强	8.3		4.9	二级
5	低于拱顶2.1	2.9		高于拱顶4.5	5.5		强	8.3		4.6	二级
6	低于拱顶超过4	0		-	0		强	8.3		1.2	三级

表 8 七机路口站—云峰路站区间隧道地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果

Table 8 The evaluation of surface collapse(void) on Qiji-Yunfeng station running tunnel

里程代号	岩溶发育等级		涌水涌泥(坍塌)		评价结果	风险等级
	等级	分值	权重	分值		
1	强	8.3	6.4	7.4	一级	
2	强	8.3	4.8	6.7	一级	
3	强	8.3	5.8	7.2	一级	
4	强	8.3	4.9	6.8	一级	
5	强	8.3	4.6	6.6	一级	
6	强	8.3	1.2	5.1	二级	

表 9 七机路口站—云峰路站区间隧道管道破损灾害风险评价结果

Table 9 The evaluation of pipeline damage on Qiji-Yunfeng station running tunnel

里程代号	地面塌陷(脱空)风险等级	长度/m	风险等级
1	一级	189.2	一级
2	一级	170.0	一级
3	一级	112.9	一级
4	一级	64.2	三级
5	一级	208.8	一级
6	二级	163.9	三级

4.2 水井坡站—长岭路站区间隧道灾害风险分级

将水井坡站—长岭路站区间隧道分段如表 10 所

示。将表 10 中 3 个分段涌水涌泥(坍塌)灾害进行风险评价, 得出涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果见表 11, 地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果见表 12, 管道破损灾害风险评价结果见表 13。

表 10 水井坡站—长岭路站区间隧道分段

Table 10 The geological summary of running tunnel section Shuijing-Changling station

岩土界面与拱顶距离/m	里程	里程代号
高于拱顶0~4	ZDK20+167.8~ZDK20+311.8	1
高于拱顶4~8	ZDK20+683.4~ZDK20+898.3	3
高于拱顶8以上	ZDK20+311.8~ZDK20+683.4	2

4.3 阳明祠站—省医站区间隧道灾害风险分级

将阳明祠站—省医站区间隧道分段如表 14 所示, 将 4 个分段的涌水涌泥(坍塌)灾害进行风险评价, 得出涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果见表 15, 地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果见表 16, 管道破损灾害风险评价结果见表 17。

4.4 灾害风险等级与灾害发生频率关系建立

将 26 段区间隧道分段并进行灾害风险分级, 根据灾害分布图(图 3)统计各分段实际灾害发生频率, 建立涌水涌泥(坍塌)、地面塌陷(脱空)、管道破损 3 种灾害风险等级与实际灾害发生频率对应关系如表 18 所示, 与三级灾害风险等级对应的灾害发生频率范围经过反

表 11 水井坡站—长岭路站区间隧道涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果

Table 11 The evaluation of gushing water and bursting mud(collapse) on Shuijing-Changling station running tunnel

里程代号	岩土分界面与拱顶平均距离			地下水与拱顶平均距离			岩溶发育等级			评价结果	风险等级
	平均距离/m	分值	权重	平均距离/m	分值	权重	等级	分值	权重		
1	高于拱顶1.8	8.2		高于拱顶0.9	9.1		强	8.3		8.5	一级
2	高于拱顶8.1	0	0.5	高于拱顶2.9	0	0.35	强	8.3	0.15	1.2	三级
3	高于拱顶7	3		高于拱顶6.6	3.4		强	8.3		3.9	二级

表 12 水井坡站—长岭路站区间隧道地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果

Table 12 The evaluation of surface collapse(void) on Shuijing-Changling station running tunnel

里程代号	岩溶发育等级		涌水涌泥(坍塌)		评价结果	风险等级	
	等级	分值	权重	分值			权重
1	强	8.3		8.5	8.4	一级	
2	强	8.3	0.55	1.2	0.45	5.1	二级
3	强	8.3		3.9		6.3	二级

表 14 阳明祠站—省医站区间隧道分段

Table 14 The running tunnel section of Yangmingci-Provincial hospital station running tunnel

岩土界面与拱顶距离/m	里程	里程代号
高于拱顶0~4	ZDK34+897.8~ZDK34+971.2	3
低于拱顶0~4	ZDK34+793.7~ZDK34+897.8	2
高于拱顶8	ZDK34+636.7~ZDK34+793.7	1
	ZDK34+971.2~ZDK35+191.4	4

复调整,以使得尽量多的分段灾害风险等级与灾害发生频率保持一致。实际灾害发生频率与表 18 相符合的区

表 15 阳明祠站—省医站区间隧道涌水涌泥(坍塌)灾害风险评价结果

Table 15 The evaluation of gushing water and bursting mud(collapse) on Yangmingci-Provincial hospital station running tunnel

里程代号	岩土分界面与拱顶平均距离			地下水与拱顶平均距离			岩溶发育等级			评价结果	风险等级
	平均距离/m	分值	权重	平均距离(m)	分值	权重	等级	分值	权重		
1	高于拱顶8	0		0	0		中	5.1		0.8	三级
2	低于拱顶1.9	3.1		低于拱顶2.4	2.6		中	5.1		3.2	二级
3	高于拱顶2.3	7.7	0.5	低于拱顶2.8	2.2	0.35	中	5.1	0.15	5.4	一级
4	高于拱顶8	0		0	0		中	5.1		0.8	三级

表 16 阳明祠站—省医站区间隧道地面塌陷(脱空)灾害风险评价结果

Table 16 The evaluation of surface collapse(void) on Yangmingci-Provincial hospital station

里程代号	岩溶发育等级		涌水涌泥(坍塌)		评价结果	风险等级	
	等级	分值	权重	分值			权重
1	中	5.1		0.8	3.2	三级	
2	中	5.1	0.55	3.2	0.45	4.2	二级
3	中	5.1		5.4		5.2	二级
4	中	5.1		0.8		3.2	三级

表 13 水井坡站—长岭路站区间隧道管道破损灾害风险评价结果

Table 13 The evaluation of pipeline damage on Shuijing-Changling station running tunnel

里程代号	地面塌陷(脱空)风险等级	长度/m	风险等级
1	一级	144.0	一级
2	二级	371.6	三级
3	二级	214.9	三级

间隧道长度与总长度关系如表 19 所示。

由表 19 可得,三种灾害中管道破损灾害评价效果最好,相符区间隧道占比达到 91%,但考虑到管道破损灾害发生次数仅有 22 次,样本数据较少,相符区间隧道长度存在被高估的可能性;涌水涌泥(坍塌)和管道破损两种灾害的相符区间隧道长度较为接近,分别为 69% 和 73%,符合程度较好。综上所述,通过灾害评价体系和表 18 中的灾害风险等级与灾害发生频率对于关系,即可在勘察完成后预测矿山法施工过程中岩溶山区隧道工程灾害发生频率^[22-24]。

表 17 阳明祠站—省医站区间隧道管道破损灾害风险评价结果

Table 17 The evaluation of pipeline damage on Yangmingci-Provincial station

里程代号	地面塌陷(脱空)风险等级	长度/m	风险等级
1	三级	157.0	三级
2	二级	104.1	三级
3	二级	73.4	三级
4	三级	220.2	三级

表 18 灾害风险等级与灾害发生频率

Table 18 Disaster risk level and frequency of disasters

灾害类型	风险等级	灾害发生频率/(m·处 ⁻¹)
涌水涌泥(坍塌)	一级	0~51
	二级	51~200
	三级	>200
地面塌陷(脱空)	一级	0~83
	二级	83~210
	三级	>210
管道破损	一级	0~270
	三级	>270

表 19 与实际灾害发生频率相符的区间隧道长度占比

Table 19 Percentage of running tunnel length corresponds to the actual disaster frequency

灾害类型	与实际发生灾害		准确率占比/%
	频率相符的 区间长度/m	区间隧道总长度/m	
涌水涌泥(坍塌)	16 978.8	23 254.2	73.0
地面塌陷(脱空)	16 038.8	23 254.2	69.0
管道破损	21 167.2	23 254.2	91.0

5 结论

(1)贵阳城市轨道交通 2 号线一期工程,区间隧道事故灾害类型主要有 3 种:涌水涌泥(坍塌)、地面塌陷(脱空)和管道破损;与 3 种事故灾害有关的评价因素包括:岩土界面与拱顶距离、地下水与拱顶距离、岩溶发育等级。

(2)岩土分界面与拱顶距离、地下水位线与拱顶距离越近,涌水涌泥(坍塌)灾害发生的频率越高,但当岩土分界面与拱顶距离很远时,地下水位线与拱顶距离和涌水涌泥(坍塌)灾害发生频率之间无明显关系;当岩溶发育等级较高,则在隧道涌水涌泥(坍塌)灾害发生的位置上方地面塌陷(脱空)灾害发生的可能性较大;地面塌陷(脱空)灾害集中发生的区域则管道破损发生的可能性较大。

(3)建立贵阳城市轨道交通 2 号线一期工程的区间隧道灾害评价体系,在勘察工作完成后即可通过该体系评价预测各种灾害发生频率。

(4)就贵阳轨道交通 2 号线一期工程 26 段区间隧道而言,断层破碎带、地表水体处的区间隧道施工中灾害发生频率并没有显著提升,推测原因是施工中对上述地段采取了加强支护的处理措施,故减少了灾害发生数量。

(5)所建立灾害风险评价体系中仅选取明显相关地质灾害风险因素作为评价因素,导致评价因素较少且权

重较高,评价体系中忽略了部分权重较低的评价指标,从最终评价结果来看忽略掉的评价因素对灾害风险等级划分影响较小。

参考文献(References):

- [1] 黄亮,赵卫权,吕思思,等.喀斯特洞穴空间分布与河网密度关系研究——以贵州省为例[J].中国岩溶,2020,39(1):127-136. [HUANG Liang, ZHAO Wei-quan, LYU Sisi, et al. Study on the relationship between spatial distribution of karst caves and drainage density: An example of Guizhou Province [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(1): 127-136. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李红卫.溶洞对贵阳轨道交通工程隧道影响的数值分析[J].土木工程与管理学报,2017,34(4):24-29. [LI Hongwei. Numerical simulation of the influence of cave on Guiyang railway tunnel [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(4): 24-29. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张文,武科,刘国强,等.城市地铁隧道岩溶地质灾害预警与成因分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):42-46. [ZHANG Wen, WU Ke, LIU Guoqiang, et al. Geological disaster prediction and cause analysis of karst cave in Guiyang subway construction [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(2): 42-46. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 莫伟平.岩溶地区涌水对地铁隧道轨道结构的影响及防治[J].城市轨道交通研究,2021,24(7):115-119. [MO Weiping. Impact and prevention of environmental water gushing on metro tunnel track structure in Karst areas [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 115-119. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LI Liping, LEI Ting, LI Shucai, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels and software development [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1843-1854.
- [6] 毛正君,杨绍战,朱艳艳,等.基于F-AHP法的隧道突涌水风险等级评价[J].铁道科学与工程学报,2017,14(6):1332-1339. [MAO Zhengjun, YANG Shaozhan, ZHU Yanyan, et al. Risk grade evaluation of tunnel water inrush based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(6): 1332-1339. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴全立,王梦恕,殷明伦.基于网络分析法盾构下穿隧道风险分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1881-1888. [WU Quanli, WANG Mengshu, YIN Minglun. Risk analysis on shield TBM crossing underneath existing tunnel based on analytic network process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1881-1888. (in Chinese with English abstract)]
- [8] NEZARAT H, SERESHKI F, ATA EI M. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using Fuzzy Analytical

- Hierarchy Process (FAHP) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50: 358 – 364.
- [9] 张文泉, 刘毓. 岩溶隧道突涌水危险性的多级模糊综合评价 [J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(2): 187 – 192. [ZHANG Wenquan, LIU Yu. Multilevel fuzzy comprehensive evaluation of water inrush in karst tunnels [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2016, 36(2): 187 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 匡星, 白明洲, 王成亮, 等. 基于模糊评价方法的隧道岩溶突水地质灾害综合预警方法 [J]. 公路交通科技, 2010, 27(11): 100 – 103. [KUANG Xing, BAI Mingzhou, WANG Chengliang, et al. Research of comprehensive warning of water inrush hazards in karst tunnel based on fuzzy evaluation method [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(11): 100 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 蒋国云. 深埋隧道岩溶突水安全风险评价模型研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(2): 274 – 279. [JIANG Guoyun. Study on the security risk assessment model of karst water burst in deep buried tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(2): 274 – 279. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 何怡帆, 李天斌, 曹海洋. 隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 102 – 111. [HE Yifan, LI Tianbin, CAO Haiyang. Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 102 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [13] SOUSA R L. Risk analysis for tunnelling projects [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [14] 王葵. 城市地铁隧道事故案例统计分析与风险评价方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018. [WANG Gong. Study on accidents statistical analysis and risk assessment methods of urban subway tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王智伟, 王利, 黄观文, 等. 基于BP神经网络的滑坡监测多源异构数据融合算法研究 [J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 575 – 582. [WANG Zhiwei, WANG Li, HUANG Guanwen, et al. Research on multi-source heterogeneous data fusion algorithm of landslide monitoring based on BP neural network [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 575 – 582. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 董英, 张茂省, 李宁, 等. 城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 161 – 168. [DONG Ying, ZHANG Maosheng, LI Ning, et al. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 161 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [17] KAMPMANN J, ESKESEN S D, SUMMERS J W. Risk assessment helps select the contractor for the Copenhagen metro system [C] // *Proceedings of the World Tunnel Congress 98 on Tunnels and Metropolises*, 1998, (1): 123 – 128.
- [18] 黄仁东, 吴寒, 张惕, 等. 基于云模型的岩溶隧道涌水灾害危险性评价及其在青岩头隧道的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(5): 44 – 51. [HUANG Rendong, WU Han, ZHANG Ti, et al. Evaluation of water burst hazard in Karst tunnel based on cloud model and its application in Qingyantou Tunnel [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(5): 44 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李堃. 青岛地铁13号线区间隧道施工风险管理研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018. [LI Kun. Study on construction risk management of Qingdao metro line 13 tunnel [D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张飞. 贵阳市地铁1号线区间隧道施工安全风险评估 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016. [ZHANG Fei. Guiyang metro system line 1 tunnel construction safety risk assessment [D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB 50652—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for risk management of underground works in urban rail transit: GB 50652—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]
- [22] 冉光炯, 杨翹楚, 王健. 特长隧道隧址区三维地质模型构建方案 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(3): 930-940. [RAN Guangjiong, YANG Qiaochu, WANG Jian. 3D geological modeling scheme for super long tunnel site [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(3): 930-940. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 101 – 108. [PAN Tao. Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 101 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 姜封国, 白丽丽, 宋敏, 等. 哈尔滨城市地铁大断面隧道施工稳定性分析 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 1419 – 1427. [JIANG Fengguo, BAI Lili, SONG Min, et al. Analysis on construction stability of large section tunnel of Harbin City Metro [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1419 – 1427. (in Chinese with English abstract)]