

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.030



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



岩溶山区三维地质建模及其在隧道规划中的 三维评价应用

魏来, 曹聪, 刘智, 龚思宇, 谢慧君, 李兴儒

(重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401121)

摘要: 岩溶地区地质环境脆弱, 为了降低隧道建设诱发的地质环境问题, 需要进行隧道规划适宜性评价。在岩溶山区构建较为精细的三维地质模型, 并在此基础上开展隧道规划适宜性三维评价, 是亟待解决的问题。选取重庆中梁山两江段为研究区, 通过适合区域地质特征的三维地质建模方法与网格剖分方法, 构建一系列较为精细的三维地质模型及属性模型, 基于层次分析法及多级指数叠加法, 构建符合地区地质环境条件与隧道建设现状的隧道规划三维评价体系, 并利用三维评价结果开展隧道规划评价分析应用。结果表明: 运用合适的三维建模方法能构建岩溶山区较为精细的三维地质模型, 以此为基础作为数据来源及空间分析载体, 能得出符合地区地质环境特点的隧道规划适宜性三维评价体系及三维评价结果, 成果可为岩溶山区隧道规划选址决策及山地城市地下空间格局优化工作提供支撑。

关键词: 岩溶山区; 隧道规划; 岩溶隧道; 三维地质建模; 适宜性评价

中图分类号: U452.1; P642.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

3D geological modeling of karst mountainous areas and its application in 3D evaluation of tunnel planning

WEI Lai, CAO Cong, LIU Zhi, GONG Siyu, XIE Huijun, LI Xingru

(Nanjiang Hydrogeology Engineering Geology Team of Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration,
Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: The geological environment in karst regions is inherently fragile, necessitating a suitability assessment for tunnel planning to mitigate geological issues induced by construction activities. A pressing challenge is to develop a detailed three-dimensional geological model in karst mountainous areas, which can serve as the foundation for conducting a comprehensive 3D suitability evaluation for tunnel planning. This study focuses on the Liangjiang segment of Zhongliang Mountain in Chongqing as the research area. Employing geological modeling methods and grid subdivision techniques tailored to the regional geological characteristics, a series of detailed 3D geological and attribute models have been constructed. Based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and a multi-level index overlay method, a 3D evaluation system for tunnel planning has been

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: 重庆英才计划“包干制”项目(cstc2024ycjh-bgzxm0179); 重庆市地矿局重大科研项目计划(DKJ-2024-NJD-B-005)

作者简介: 魏来(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质及地质信息化研究, E-mail: 1305223002@qq.com.

Received: 2024-11-26

Foundation items: Chongqing Talent Program ‘Fixed Quota’ Project (No. cstc2024ycjh-bgzxm0179); Major Research Project Plan of the Chongqing Bureau of Geology and Mineral Resources (No. DKJ-2024-NJD-B-005)

Author brief: WEI Lai (1986-), senior engineer, main research interests: hydrogeological engineering and environmental geology and geological informatization, E-mail: 1305223002@qq.com.

established, aligned with the local geological conditions and the current state of tunnel construction. Furthermore, the 3D evaluation results have been utilized for tunnel planning assessment and analytical applications. The findings indicate that by employing appropriate 3D modeling methods, one can construct detailed geological models in karst mountainous regions. This serves as a foundational data source and spatial analysis framework, enabling the establishment of a 3D suitability evaluation system for tunnel planning that is consistent with the local geological environment. The results provide substantial support for the planning and site selection of tunnels in karst mountainous areas and the optimization of underground space patterns in mountainous cities.

Keywords: karst mountainous areas; tunnel planning; karst tunnel; 3D geological modeling; suitability 3D evaluation

中国山地丘陵区域分布广泛,为实现各区域沟通连接,促进经济社会发展,需要修建各类越岭隧道^[1]。西南地区存在大量岩溶山区,其地质条件复杂,生态环境脆弱,隧道建设极易引发涌突水、地表水体流失、岩溶塌陷等系列地质环境问题^[1-3]。岩溶山区越岭隧道传统规划工作面临灾害风险高、精度不足、效率低等难题。因此,构建岩溶山区较为精细的三维地质模型,并在此基础上开展隧道规划适宜性三维评价,以此来优化隧道规划选址,实现城市空间的合理利用,最大限度地减轻对地质环境的负面影响,具有十分重要的意义。

目前隧道规划选址工作多以定性为主^[4],成果多为二维展示。三维地质模型仅局限于可视化展示、挖填方算量等用途,未得到充分利用^[5-6]。在城市地下空间开发评价研究领域,以往研究大多利用GIS平台,基于二维数据进行平面栅格叠加评价^[7-9],忽略了地下空间地质体的三维空间属性,评价结果在垂向上精度有限^[10]。近年来,随着三维地质建模技术的发展,基于三维地质模型的城市地下空间开发评价成为研究热点,学者们将三维地质模型应用于各地城市地下空间三维分析评价中,取得了阶段性研究成果^[11-15]。三维地质模型及三维评价结果的显示效果更直观,地质信息更为丰富立体,有助于城市地下空间利用的前期规划及后期管理^[14-16]。而三维建模技术方法及精度有待更新提高^[16-18],且选取合适的三维评价指标、建立适合地区地质环境特点的三维评价体系、深入挖掘三维地质模型内蕴的数据信息,以及将三维评价成果有效应用等方面均需进一步深入研究。同时以往相关研究多集中在具有深厚第四系覆盖层的沿海及冲洪积平原区城市地下空间开发评价,在地质环境条件较为复杂脆弱的岩溶山区隧道规划三维评价方面缺乏针对性研究应用。

重庆为典型山地城市,其地形地貌复杂、人口密度大且建设密集。重庆主城分布有缙云山、中梁

山、铜锣山、明月山4条近似平行的山脉(简称“四山”),“四山”具有独特的川东隔档式构造条件,存在大范围岩溶山区。笔者以“四山”交通规划建设强度极高的中梁山两江(长江、嘉陵江之间)段作为研究区,在综合该地区多源地质资料基础上,采用地质界线约束下的平行剖面-褶皱复原法建模技术与顺层截断网格剖分法,构建较为精细的三维地质模型及三维属性模型。基于区域地质环境条件和隧道建设现状背景,利用层次分析法及多级指数叠加法,构建越岭岩溶隧道规划三维评价体系。继而将三维地质模型成果集成到重庆市集景三维数字城市平台,并将其作为三维数据来源及空间分析载体。同时,基于建立的三维评价体系,开展三维数字平台二次开发,以实现研究区隧道规划三维评价。最后,利用隧道规划三维评价结果进行隧道工程验证及规划评价分析应用。

1 研究区概况

中梁山两江段位于长江至嘉陵江之间,地理位置介于 $106^{\circ}20' \sim 106^{\circ}30' \text{E}$ 、 $29^{\circ}20' \sim 29^{\circ}50' \text{N}$ 之间,海拔250~650 m,南北长约53 km(图1)。研究区隧道建设密度较高,分布有重庆绕城高速、北碚隧道、歇马隧道、土主隧道、双碑隧道、大学城隧道、银昆高速隧道、华岩隧道和华福隧道等多条已建在建隧道,共分布有已建在建隧道19条,隧道建设密度达0.36条/km,局部段可达0.7条/km,其建设密度和强度世界罕见。此外据“十四五”交通规划资料显示,中梁山两江段规划公路和城市轨道隧道多达8条。区域人口集中,分布有中梁山街道、歌乐山街道和山洞街道等多个密集城镇。受本底地质环境以及隧道工程、城镇建设等人类活动影响,该区域面临的地质环境问题十分严重。

研究区整体为华蓥山系延伸至重庆境内的支脉,区内主要控制性构造为观音峡紧窄背斜,背斜轴线大体沿南北向延伸^[3],呈现为狭长条状低山山

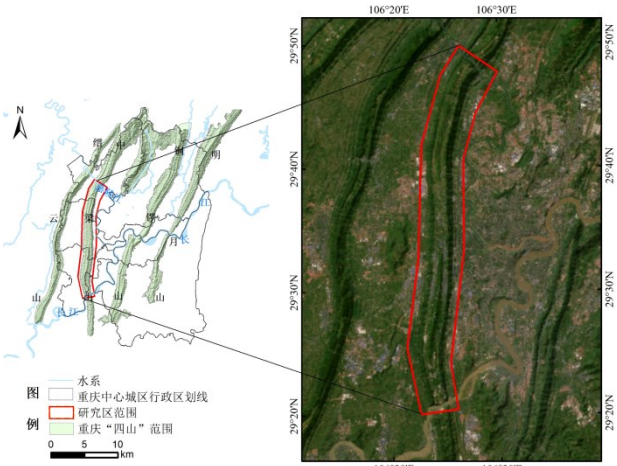


图1 研究区地理位置及遥感图像

Fig.1 Location and remote sensing image of study area

表1 研究区地层简表

Table 1 Brief stratigraphic table of the study area

地层系统			代号	厚度/m	岩性简述
界	系	统 组(段、层)			
中生界	侏罗系	上沙溪庙组	J _{2s}	900~1 400	泥岩与长石砂岩呈韵律互层
		中统 下沙溪庙组	J _{2xs}	200~500	泥岩夹长石砂岩,长石砂岩
		新田沟组	J _{2x}	100~300	泥岩、页岩夹砂岩透镜体,夹薄层介壳灰岩
		下统 自流井组	J _{1zl}	150~280	泥页岩夹灰岩、介壳灰岩、粉砂岩
		珍珠冲组	J _{1z}	100~270	泥、页岩夹石英粉细砂岩
	三叠系	上统 须家河组 四~六段	T _{3xj} ⁴⁻⁶	150~300	长石石英砂岩夹炭质页岩及煤
		一~三段	T _{3xj} ¹⁻³	100~360	炭质页岩夹长石石英砂岩及煤
		中统 雷口坡组	T _{2l}	25~660	灰岩、白云岩夹角砾,泥砂岩
		四段	T _{2l} ⁴	80~152	浅灰色白云岩,泥质白云岩夹盐溶角砾岩
		三段	T _{2l} ³	122~193	浅灰色中厚层状灰岩、泥质灰岩夹白云质灰岩及生物灰岩
古生界	二叠系	二段	T _{2l} ²	71~136	灰色泥质白云岩夹灰岩及岩溶角砾岩(深部为石膏),下部夹灰绿、紫色泥岩
		一段	T _{2l} ¹	195~282	灰色灰岩、泥质灰岩夹虫迹灰岩及生物灰岩
	飞仙关组	四段	T _{1f} ⁴	24~44	紫、黄绿色钙质页岩与泥灰岩互层
		三段	T _{1f} ³	128~163	灰岩、泥岩、泥质灰岩夹鲕状灰岩
		二段	T _{1f} ²	172~241	紫色钙质页岩夹泥灰岩
		一段	T _{1f} ¹	109~136	杂色中至薄层泥质灰岩夹粉砂岩、泥岩。
	上统	长兴组	P _{2c}	90~150	灰岩夹白云质灰岩,含燧石结核或团块
		龙潭组	P _{2l}	75~160	粉砂质粘土岩、页岩夹粉砂岩及煤层,泥质灰岩燧石结核灰岩与粉砂质粘土岩互层
	下统	茅口组	P _{1m}	150~600	灰岩含燧石团块、有机质页岩

研究区背斜核部普遍分布碳酸盐岩,从地层时代上具有中心向外越来越新的特点,此分布特征十分有利于岩溶水在灰岩与页岩交界处的灰岩一侧聚集,形成岩溶发育的强富水地带。该地区的暗河及大泉主要分布在三叠系下统飞仙关三段(T_{1f}³)与四段(T_{1f}⁴)接触带、下统嘉陵江组(T_{1j})和中统雷口坡组(T_{2l})地层交界处。研究区内碳酸盐岩类地层的分布和出露特征为岩溶的发育提供了充分条件,形成了岩溶地区特有的地质环境条件,同时也制约着该地区的交通规划建设。

由于研究区存在较大范围岩溶区,水文地质条件对隧道规划开发具有重大影响。为构建三维水

脉。顶部出露灰岩,受溶蚀后一般形成槽谷,两侧一般出露砂岩,形成高耸的山脊,因此,研究区常见“一山三岭夹两槽”或“一山两岭夹一槽”特有形态。岩溶槽谷高程一般在350~550 m之间,其地形地貌与地质构造和地层岩性关系密切。研究区出露的地层主要从背斜轴部至两翼对称分布,主要分布有二叠系下统茅口组(P_{1m})、上统龙潭组(P_{2l})、长兴组(P_{2c})、三叠系下统飞仙关组(T_{1f})、嘉陵江组(T_{1j})、中统雷口坡组(T_{2l})、上统须家河组(T_{3xj})、侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})、自流井组(J_{1zl})、中统新田沟组(J_{2x})、沙溪庙组(J_{2s})。中梁山研究区地层基本情况见表1。

文地质模型及开展后续三维评价分析,基于地区水文地质资料,根据不同部位构造、地貌、补给、储水条件,将研究区地下水类型分为红层孔隙裂隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水、碳酸盐岩类溶洞裂隙水3类。概化出每种类型地下水对应的富水性等级、岩溶发育程度、主要地层、分布位置划分(表2)。

2 研究方法

研究区为典型川东平行隔档式褶皱构造,地质环境条件较为复杂。构建三维地质模型及三维评价体系需要充分考虑其地质环境特点,充分利用数据的三维属性。研究方法步骤:1)根据研究区地质

表 2 研究区地层富水性及岩溶发育程度表
Table 2 Water richness and karst development in the study area

地下水类型	富水性等级	岩溶发育程度	主要地层	分布位置
红层孔隙裂隙水	弱富水	不发育	$J_{2S}, J_{2TS}, J_{2T}, J_{1Z}, J_{1Z}$	背斜两翼
碎屑岩类孔隙裂隙水	中等富水	不发育	T_3xj^{1-6}	
碳酸盐岩类洞隙裂隙水	中等富水	低发育	T_1f^{1-4}, P_2l	背斜轴部及两翼
	强富水	较发育	P_2c, P_1m	
		强烈发育	T_2l, T_1f^{1-4}	

条件和建设特点,选取并研究合适的建模方法与网格剖分方法,构建较为精细的三维地质结构模型与属性模型;2)以三维地质模型为数据基础,构建适合研究区地质环境特点的三维评价指标体系;3)构建综合评价模型;4)基于重庆市集景三维数字城市平台,将三维地质模型导入,进行三维评价算法二次开发,得到研究区隧道规划适宜性三维评价成果;5)开展隧道规划适宜性三维评价应用,并进行验证分析。

2.1 平行剖面-褶皱复原法

目前常用的三维地质建模方法主要有钻孔建

模方法、剖面建模方法、多源数据交互建模方法3种^[16,18],其中钻孔建模法发展得较为成熟,但需要大量钻孔数据并选择合适的插值算法进行插值计算生成,这在深厚第四系沉积地层中使用较多。在山地地区,由于地形陡峭、地质条件复杂,钻孔资料缺乏且分布不均匀,常规建模方法并不适用。为在地区已有资料基础上建立较为精细的三维地质模型,根据已有多源地质资料,提出地质界线约束下的平行剖面-褶皱复原法(图2)建立三维地质结构模型,三维地下水位模型主要采用钻孔法为主的多源数据建模法完成。

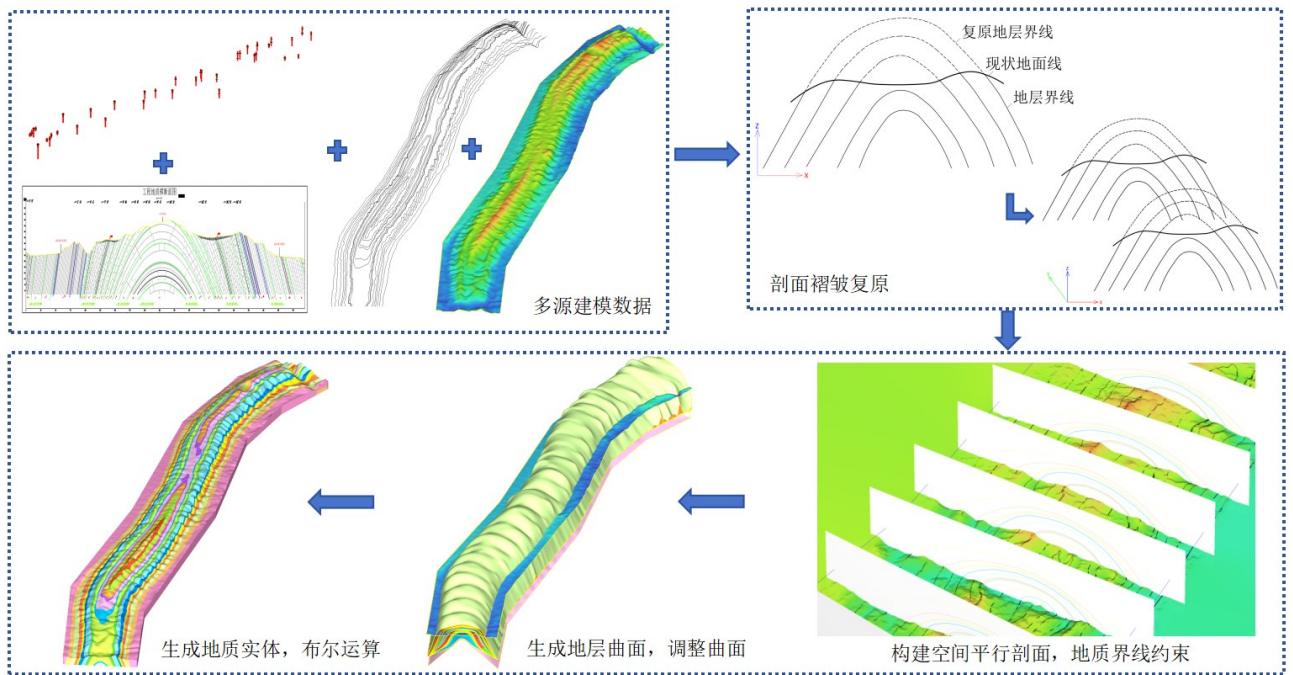


图 2 平行剖面-褶皱复原法建模示意图

Fig.2 Parallel section fold restoration method modeling diagram

在符合地区地质规律和地质认识的前提下,基于平行剖面建模法,探索地质界线约束下的平行剖面-褶皱复原法建模技术(图2)。该方法在川东平行隔档式褶皱地区十分适用,所建立三维模型整体性强,精度较高,能显著减少建模工作量^[16,18-19]。现实中由于地面风化剥蚀,背斜褶皱并不完整连续,若按传统剖面法建模,需要对褶皱两翼分别构建地质层位,加大了工作量,且极易出现误连地层等错误。平行剖面-褶皱复原建模方法主要包括:

- 1)褶皱复原。首先根据DEM、平面地质图、地质剖面、钻孔等多源建模数据资料,将背斜褶皱两翼相同地层界线还原成剥蚀前状态,形成原始层状整体,表达出完整的褶皱形态(图2)。在此基础上构建一系列垂直褶皱走向的平行或近似平行的地质剖面,并通过自动化流程将这些剖面按照其三维坐标位置导入三维建模软件。以地质界线为约束,运用插值算法生成三维地层面模型(图2)。
- 2)地层曲面验证及校正。通过已有钻孔及地

质资料数据验证地层曲面模型的正确性,对于产生地层穿越及存在较大误差处,通过设置虚拟钻孔及辅助剖面的方法调整模型精度。

3)生成地质实体。设置地质层面间的交切关系,将地面之上已剥蚀的地质体进行布尔运算,即可生成较为精确的三维地质结构模型。

2.2 网格剖分法

三维地质模型是三维评价属性赋值的基础,即需要进行网格剖分,将复杂的地质模型分割成一系列小而规则或不规则的网格单元,每个单元都将作为属性数据赋值的基本单位,从而支持对地质特征、资源分布等进行精确的三维评估与分析。目前,三维地质模型常用网格剖分方法为六面体网格法,用该方法切割三维地质体,在任何地质形态下都是六面体,在构造约束处误差较大,因此不能准确描述地质体形态,也不能精确反映山地城市构造较复杂地区的地质属性。

采用顺层截断网格法对三维地质模型进行网格剖分。该法在出现地层尖灭、侵入和断裂的位置,可被地质体的界面截断,避免出现跨过地质界面的网格。在同等网格数量下,该方法能极大地提升描述地质体几何形状和属性分布的精确度^[20]。其关键是在平面上定义一个平面矩形网格,利用该网格下切所有地质体,在没有断裂处,网格是六面体。在有断裂和尖灭处,网格形状可能会非常复杂,从而可准确地描述褶皱、断层等复杂地质体形态(图3)。

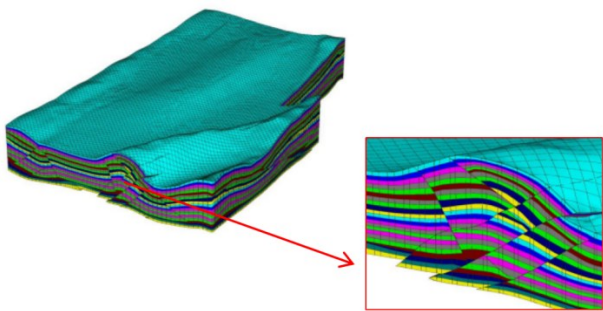


图3 顺层截断网格法示意图

Fig.3 Schematic diagram of truncated meshing method along rock face

2.3 AHP层次分析法及多级指数叠加法

结合研究区地质环境特点,通过比较不同方法的优劣,采用专家打分法并结合层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)^[8,11-12,14,17,21],选取三维评价因子,构建三维评价体系,确定评价因子的权重及打分赋值。

采用多级指数叠加法计算隧道规划适宜性综合评价结果。该方法优点在于能清晰、直观地反映

不同评价因子对结果的影响程度^[11,21]。多级指数叠加法结合线性加权函数,将各评价因子得分数值及权重值进行叠加计算,最终得到综合评价指标,并按照一定的分级标准对结果进行分级评价。

模型的表达式为

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i \sum_{j=1}^m \omega_{ij} \mu_{ij} \quad (1)$$

式中: ω_{ij} 为第*i*准则层中第*j*个因子的权重; μ_{ij} 为第*i*准则层中第*j*个因子的适宜性分值; ω_i 为第*i*个准则层的权重; P 为隧道规划适宜性评价结果。

3 构建三维地质模型

3.1 建模平台及数据来源

三维地质模型构建及网格剖分基于网格天地公司的深探地学建模软件完成。

研究区DEM数据主要来源于地理空间数据云平台 ASTER GDEM 数据产品(<https://www.gscloud.cn/>),其余建模数据主要来源于1:20万~1:1万区域地质调查、水文地质调勘成果资料,隧道建设资料等。

建模资料存在来源广、时间跨度大、精度差别大等特点,导致数据的坐标系统、地层划分等不统一,为三维建模工作带来困难。为了尽可能充分利用已有数据,必须统一所有数据的坐标系,将纸质化文件资料矢量化,转换成必要格式的文件,利用表1对数据进行统一地层划分。

研究区主要建模资料见表3,其主要分布位置见图4。研究区共有19个地层参与建模,平面地质界线呈对称分布(图4(a))。为使地质模型具有整体性,构建了29条垂直褶皱走向的平行或近似平行的地质剖面(图4(b))。此外,使用47个钻孔数据,其信息包括:钻孔坐标、钻孔深度、孔口标高、地层分层、地下水位监测数据等,主要用于构建及校验三维地质模型(图4(b))。

3.2 剖面布设及绘制

资料收集的已有地质剖面数量少且分布不均,长度及剖切深度不满足建模要求。为实现平行剖面-褶皱复原法构建三维地质结构模型,首先在已有地质剖面的基础上,垂直研究区背斜走向,按照1.5~2.5 km距离,共布设近似平行的29条地质剖面(图4)。

剖面布设好后,综合研究区多源建模资料,绘制二维地质剖面图,并通过验证钻孔调整地质剖面,控制剖面数据精度。基于前文所述褶皱复原法将剖面背斜褶皱两翼相同地层界线还原成剥蚀前状态,形成原始层状整体,表达出完整的褶皱形态。

表3 研究区主要建模资料一览表

Table 3 Summary of main modeling data in the study area

种类	主要内容	数量
地表高程图	地形图(1:10 000)、DEM数据(5 m)	1套
平面地质图	地质点、产状、地质界线、断层线、断层描述、地质路线、地层等	1套
地质剖面图	地面线、地质界线、地层、岩性、地层年代、断层等	29条
钻孔数据	水文地质、工程地质勘察、水文监测等 钻孔坐标、柱状图资料	47孔

注:资料来源为地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>);1:20万~1:1万区域地质调查、水文地质调查成果资料和隧道建设资料。

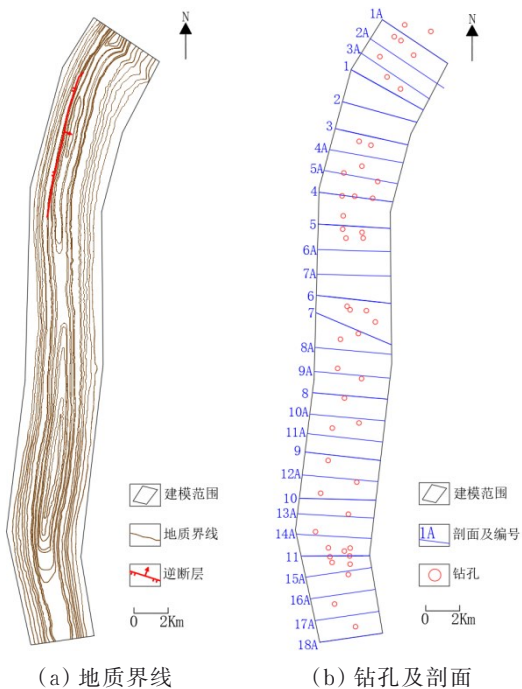


图4 研究区主要建模资料分布示意图

Fig.4 Distribution diagram of main modeling data in the study area

3.3 三维地质模型构建及成果

考虑模型美观性及模型实用性,三维模型底标高取海拔-100 m,三维模型建模精度100 m×100 m,网格剖分精度为100 m×100 m×25 m。

基于绘制的29条二维剖面图,对其进行空间坐标定位,获得三维平行剖面。继而对三维平行剖面进行地层解译,地层数据离散化处理,然后在地质界线的约束下,运用插值算法生成三维地层曲面。对于地层曲面中局部出现的越层或不符合地质规律处,使用添加虚拟钻孔及辅助剖面的方法来调整控制地层,提高地层精细度。根据校正过的三维地层曲面,确定其地层主辅交切关系,生成三维地质实体,对三维地质实体进行布尔运算,最终得到研

究区三维地质结构模型(图5)。

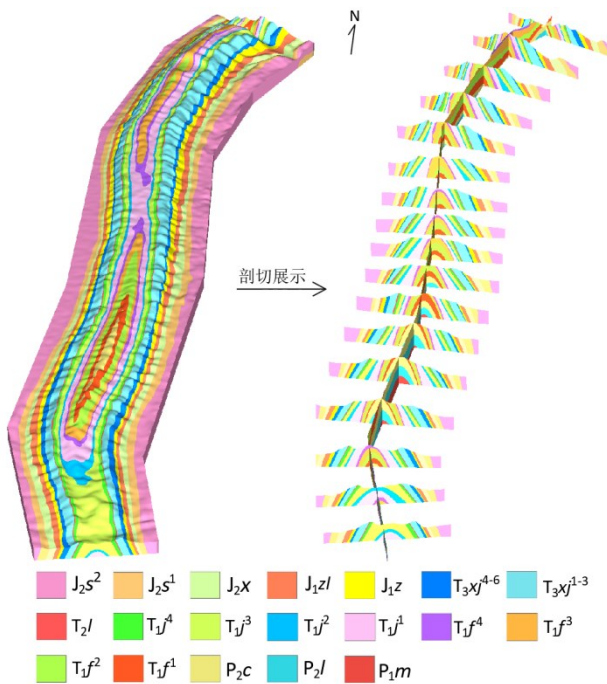


图5 研究区三维地质结构模型

Fig.5 3D geological structure model of the study area

将已有资料与建立的三维地质结构模型进行对比分析,三维地质结构模型的地形起伏、地层分布、地层厚度、岩层倾角等特征与已有资料及现场情况较为一致,能较好地刻画研究区细部地质特征。如图5所示,研究区地层从背斜轴部至两翼对称分布,背斜核部为三叠系中下统及二叠系地层,多为碳酸盐岩,地层时代上具有中心向外越来越新的特点。

根据表2对三维地质结构模型进行网格剖分,并按照研究区地层富水性等级赋值,即得到三维水文地质模型,如图6所示。研究区中部为碳酸盐岩地层,富水性等级为中等富水~强富水,体积占比约为58%,岩溶低发育~强烈发育,是本研究地下水的主要赋存区域,也是隧道建设极易诱发地质环境问题的区域。

三维地下水位模型主要根据研究区2022年10月至2023年9月一个完整水文年的钻孔地下水位监测数据,同时参照已建隧道地下水监测数据及隧道近年排水量数据构建。利用ModFlow软件对研究区地下水位进行数值模拟,依据2023年地下水数值模拟结果,结合已有钻孔地下水位数据构建三维地下水位模型,包括最高及最低水位面(图7)。为了便于后续评价参数获取,同时建立三维隧道模型(图7)。为了校验三维地下水位模型,将模型结果与地区地下水观测数据及近年新建隧道地下水监测数据进行对比,对于出现较大误差处,通过设置

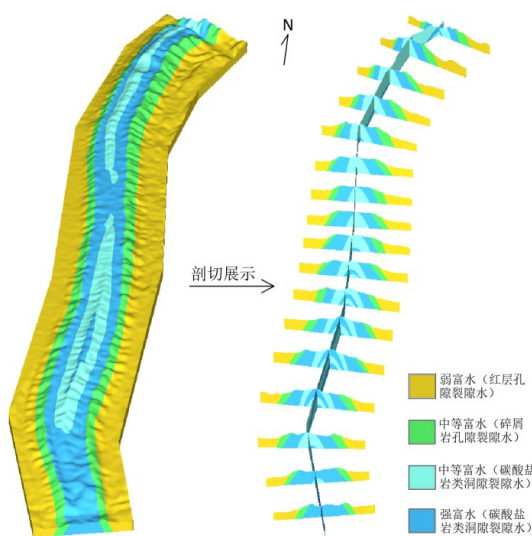
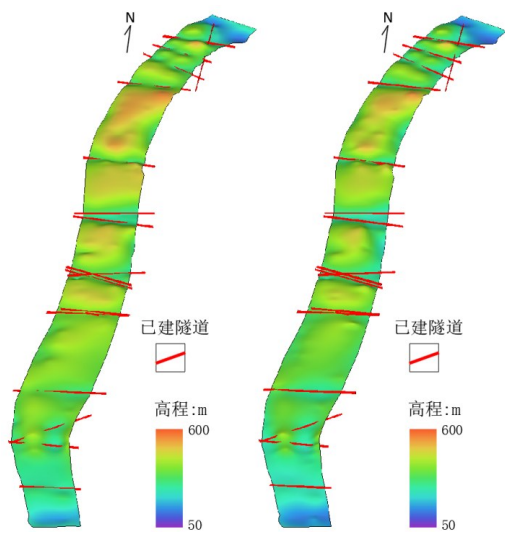


图6 研究区三维水文地质模型

Fig.6 3D hydrogeological model of the study area

虚拟钻孔及辅助剖面的方法进一步调整模型,最大限度地降低模型误差,提高其精度。



注:(a)最高水位 (b)最低水位

图7 研究区三维地下水位模型及隧道模型

Fig.7 3D groundwater level model and tunnel model in the study area

由图7所知,研究区三维地下水位面整体受地形控制,南北两侧向嘉陵江及长江排泄。水位面大多在地面以下20~100 m范围,局部受地形起伏及已建隧道影响,水位深度可达150~200 m。由于降雨补给,最高水位面均高于最低水位面,变幅范围多在10~150 m之间。将已建隧道概化为泄水廊道,其排水作用使研究区的初始地下水位面出现较大改变。地下水位面在垂直于隧道走向上,形成了以隧道为中心的降落漏斗状形态。隧道排水量越大,降落漏斗影响半径越大,地下水位面部分隧道之间形成了新的分水岭。特别是研究区中部歌乐山区域,由于隧道建设密集,形成了叠加效应,共同

作用形成了降落漏斗。

4 隧道规划三维评价

4.1 隧道规划三维评价体系

研究区需要构建合理的评价体系,对隧道规划地质环境适宜性进行定性分析以及定量分析。评价体系需要具有层次性、逻辑足够清晰明了,并且能厘清各因素之间的内在联系。相比传统的二维指标体系,三维评价指标体系能充分反映地下空间中复杂地质环境的三维空间结构特征和属性特征^[11]。

根据研究区长期的地质环境资料,结合有关评价体系研究经验,充分考虑当地特殊的地质环境以及其他自然客观属性因素,并结合三维地质模型数据特点,采用专家打分法结合层次分析法(AHP)选取评价因子及构建三维评价体系,AHP方法以分层结构的方式将多种选择和标准考虑在内^[8,11-12,14,17,21],按照层次筛选原则,抓大放小,评价体系共分为目标层、准则层、指标层3级(表4)。

表4 隧道规划适宜性三维评价体系

Table 4 3D evaluation system of tunnel planning suitability

目标层	准则层	指标层	数据来源
中梁山隧道规划地质环境适宜性A1	基础地质条件B1	含水层富水性C1	三维水文地质模型
		岩溶发育程度C2	三维水文地质模型
		地下水埋藏深度C3	三维地下水位模型
		地质构造C4	三维地质结构模型
		地形地貌C5	二维地表范围赋值
		地下水水位变幅C6	三维地下水位模型
	隧道建设强度B2	单位排水量C7	三维隧道模型
		隧道建设密度C8	三维隧道模型
		隧道垂向分布位置C9	三维地下水位模型
	保护对象重要性B3	保护对象重要性C10	二维地表范围赋值

三维评价体系将中梁山隧道规划地质环境适宜性A1设置为目标层,准则层设置3个一级评价因子,包括基础地质条件B1、隧道建设强度B2、保护对象重要性B3,对应10个二级评价因子,包括含水层富水性C1、岩溶发育程度C2、地下水埋藏深度C3、地下水水位变幅C4、地质构造C5、地形地貌C6、单位排水量C7、隧道建设密度C8、规划隧道垂向位置C9、保护对象重要性C10(表4)。其中C7~C10等符合地区岩溶隧道地质环境特点的三维评价因子,可以更好地评价和指导山地城市岩溶隧道的规划决策。

针对研究区地质环境三维空间分布特征及不同因素对隧道规划适宜性的影响,结合现有相关标

准规范,查阅地区隧道建设资料,并听取长期从事地区相关行业的专家学者建议,将三维评价因子进行分级赋值。二级评价因子按标准被分为较不适宜、一般适宜、较适宜、适宜4个级别,对应的打分数值为1、3、6、10分(表5)。

表5 隧道规划适宜性三维评价因子及分级标准
Table 5 3D evaluation factors and grading criteria of tunnel planning suitability

三维评价因子		分级标准			
一级	二级	较不适宜(1分)	一般适宜(3分)	较适宜(6分)	适宜(10分)
基础地质条件 B1	含水层富水性 C1	极强~强富水	中等富水(碳酸盐岩类洞隙裂隙水)	中等富水(碎屑岩类孔隙裂隙水)	弱富水
	岩溶发育程度 C2	强烈发育	较发育	低发育	不发育
	地下水埋藏深度(m) C3	<5	5~50	>50	无统一的地下水位
	地质构造 C4	距断层带距离<100 m	陡倾构造区产状>45°	产状15~45°	岩层平缓区产状<15°
	地形地貌 C5	全封闭的侵蚀溶蚀地形中的洼地、槽谷地段	半封闭的侵蚀溶蚀地形中的洼地、槽谷地段	侵蚀溶蚀地形中的残丘、孤峰、隆脊山地地段;构造剥蚀中、低山地段	构造剥蚀丘陵地段
	地下水水位变幅(m) C6	>50	10~50	<10	无统一地下水位
隧道建设强度 B2	两侧5 km范围单位排水量(m ³ /km) C7	>10 000	5000~10 000	500~5000	<500
	两侧5 km范围隧道建设密度(条/km) C8	>1	0.3~1	<0.3	无已建隧道
	规划隧道垂向位置 C9	水平循环带	深部缓流带	垂直循环带	无统一地下水位区
保护对象重要性 B3	保护对象重要性 C10	饮用水源地一级保护区;库容>1 000万m ³ 水库;5A级旅游风景区;野生动物栖息地;基本农田>1 km ²	饮用水源地二级保护区;库容100~1 000万m ³ 水库;3A~4A级旅游风景区;基本农田0.4~1 km ²	重要水源地;库容10~100万m ³ 水库;1A~2A级旅游风景区;基本农田小于0.4 km ²	村落集中供水水源;库容<10万m ³ 水库;旱地、林地、草地

4.2 确定评价因子权重

根据工程经验丰富的专家学者打分结果,利用AHP方法中1~9标度法对评价因子进行两两比较,建立判断矩阵并对矩阵的元素进行赋值,求解最大特征根、权重向量,并采用一致性比率检验判断矩阵的合理性。一致性比率CR<0.1,表明判断矩阵具有较好的一致性。最终得到的研究区三维评价因子权重(表6)。

评价因子的权重大小表明该因子对隧道规划开发的影响程度,从表6可知,B1(基础地质条件)对

表6 三维评价因子权重
Table 6 3D evaluation factor weights

指标	B1 (0.54)	B2 (0.26)	B3 (0.20)	综合权重 W
C1	0.24			0.130
C2	0.20			0.108
C3	0.15			0.081
C4	0.15			0.081
C5	0.15			0.081
C6	0.11			0.059
C7		0.50		0.130
C8		0.31		0.081
C9		0.19		0.049
C10			1.00	0.200

研究区隧道规划适宜性影响最大,B1中以C1(含水层富水性)影响最为显著,C2(岩溶发育程度)其次,经地区长期工程资料可知,隧道上方岩溶区地层富水性越高、岩溶越发育,隧道修建越容易诱发地表水漏失疏干、地下水下降、岩溶塌陷等一系列地质环境问题;其次隧道建设强度B1也从能从侧面反应研究区局部范围的地下水疏排现状及叠加规划隧道后其发展趋势,这些都是隧道规划建设诱发地质环境问题的重要因素;综合权重数值最大的为C10(保护对象重要性),当拟建隧道上方存在重要保护对象时,隧道规划建设诱发的地质环境问题会带来较大的风险及治理成本,这对隧道规划建设适宜性产生重大制约。评价因子权重大小与研究区隧道规划开发影响因素重要性相符,由此可见,用AHP方法建立的三维评价体系符合地区客观实际。

4.3 综合评价

根据AHP法对各评价因子进行分级赋值,在此基础上利用多级指数叠加法(式(1))对研究区隧道规划适宜性开展综合评价。综合评价结果分为4个等级,分别为:隧道规划较不适宜(评分区间:1~2.5)、一般适宜(评分区间:2.5~5)、较适宜(评分区间:5~7.5)和适宜(评分区间:7.5~10)。

5 结果与应用

5.1 研究区隧道规划适宜性三维评价结果

综合考虑研究区模型尺寸、计算机配置等因素,使用顺层截断网格法将模型剖分为 100 m×100 m×25 m 精度网格,剖分后模型网格数总计 1 227

310个。将剖分后的三维地质模型成果导入到重庆市集景三维数字城市平台,并基于本研究建立的三维评价体系开展隧道规划三维评价模块二次开发。利用平台空间分析功能对模型数据进行获取并计算赋值(表 4),得到研究区隧道规划适宜性三维评价结果,如图 8 所示。

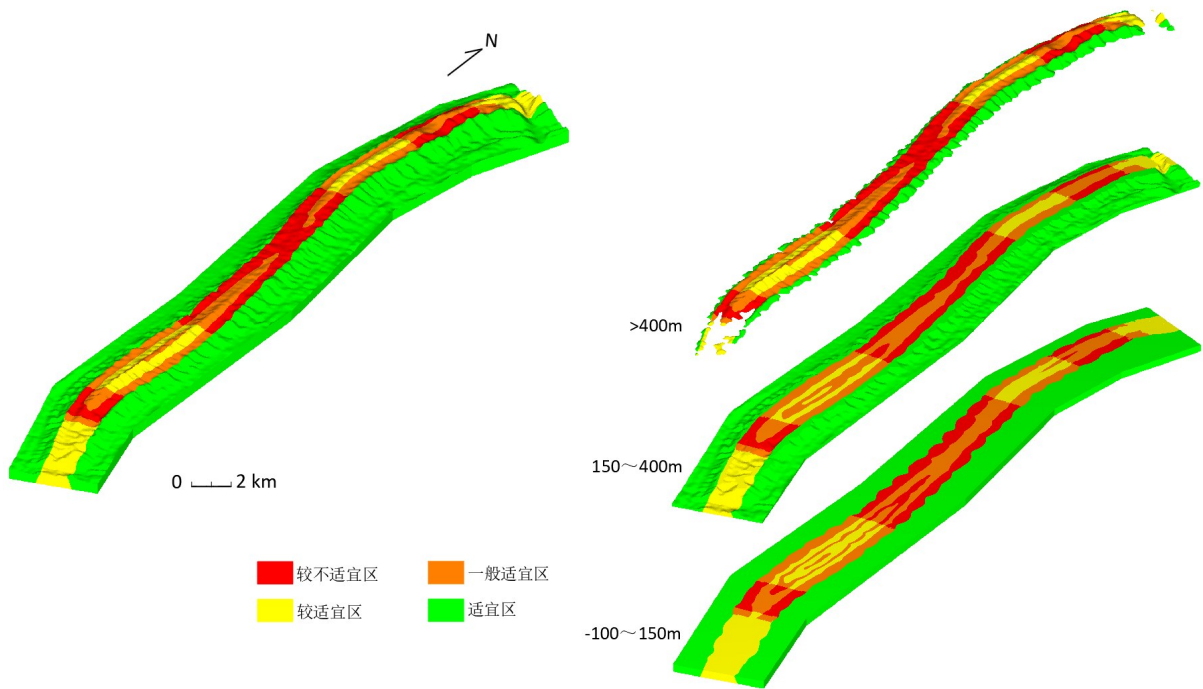


图 8 研究区隧道规划适宜性三维评价结果
Fig.8 The results of 3D evaluation of tunnel planning suitability in the study area

由图 8 可见,在空间上,隧道规划适宜性受地质构造及水文地质特征影响显著;在平面上,受地形地貌、隧道建设、保护对象分布范围等二维因素叠加影响。山脉两侧大部分区域属于侏罗系地层,岩性为砂泥岩互层,无统一地下水位,地质环境条件较好,属规划适宜区,网格体积约占 51%;山脉中部靠近背斜轴部,属于二叠系、三叠系地层,局部地层组碳酸盐岩含量高,多为岩溶地层,地下水位普遍较浅,主要为岩溶槽谷地貌。此外,该区域人类活动频繁,保护对象较多,再综合修建隧道造成的地下水位下降影响,地下水位变幅较大,因此隧道规划一般适宜(网格体积约占 18%)~较不适宜(网格体积约占 16%)区域多集中于此;山脉中部泥质含

量较高的层组以及头尾靠近长江、嘉陵江区域,由于靠近排泄基准面,地下水位较低,且地形陡峭,无保护对象分布,此区域属规划较适宜区(网格体积约占 15%)。

5.2 隧道工程验证及规划应用分析

为验证隧道规划适宜性三维评价结果的准确性,利用研究区近 5 a 建成的隧道开展对比分析。在平台中生成拟建隧道实体。将隧道实体与隧道规划适宜性三维评价模型进行求交布尔运算,获得近 10 a 建成的 4 条隧道的规划适宜性评价结果分布图(图 9)。根据分布图可清晰直观显示每条隧道对应里程的规划适宜性分布,以及每个适宜性段占比大小。

表 7 研究区近年建成隧道适宜性验证

近年建成隧道	较不适	一般适	诱发的地质环境问题
	宜段/%	宜段/%	
歇马隧道	20.2	48.8	引发大烂池水库漏失干涸,新增塌陷近 40 处。地质环境影响严重
土主隧道	30.4	31.3	引发塌陷 50 处以上,周边地下水彻底干涸。地质环境影响严重
华岩隧道	0	36.5	造成隧址周边地下水位下降,地表水塘水位下降。地质环境影响较严重
5 号线隧道	48.4	22.2	引发大规模涌水突泥,最大单日涌突水量超过 10 万 m ³ /d,周边地下水彻底干涸。地质环境影响严重

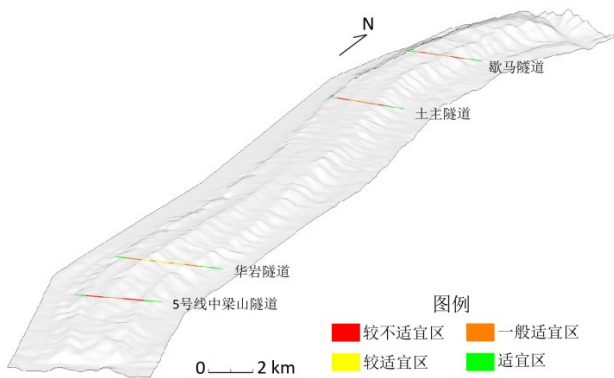


图9 研究区近年建成隧道规划适宜性三维评价

Fig.9 The project application results of 3D evaluation of tunnel planning suitability in the study area

近 10a 建成隧道的规划适宜性评价验证结果(表 7)表明,隧道规划适宜性三维评价结果与新建隧道诱发的地质环境问题基本一致。歇马隧道、土主隧道、轨道 5 号线隧道较不适宜段里程占比超过 20%,较不适宜~一般适宜段占比超过 50%。资料及调查显示,此 3 条隧道开始修建后,相应的不适宜区域地下水位明显下降,发生大量地面塌陷,造成了隧道周边地质环境的严重破坏,且较不适宜段里程占比越大,所引发的地质环境问题越严重,这与三维模型评价结果一致。同时,根据三维模型显示,3 条隧道修建导致严重环境问题的主因是隧道穿越了大范围岩溶段,地下水位埋深浅,地质构造强烈,基础地质条件脆弱,且上部存在重要保护对象。华岩隧道较不适宜段占比为 0,一般适宜段占比 36.5%,建成后造成了隧址周边地下水位下降,地表水塘水位下降。这表明,建立的隧道规划适宜性评价三维模型能够较好地反映实际状况,结果较为可靠。

运用适宜性三维评价成果,开展重庆中梁山两江段 2021—2035 年规划隧道进行规划适宜性评价分析应用。8 条规划隧道名称及空间分布如图 10 所示。

根据隧道评价结果,可及时调整隧道规划参数,进行线位比选,尽量选择较适宜~适宜区占比高的线位。在隧道设计阶段可结合平台中三维地质结构模型以及三维水文地质模型图,初步掌握相应里程段的地质环境条件、岩溶地层分布、施工难易程度等,提前制定精细化堵排水方案。

研究区拟建隧道规划适宜性区段表(表 8)显示,8 条规划隧道建设的较适宜段占比均较小。其中蔡家隧道、井口隧道、西永隧道、4 号线隧道、C4 线隧道较不适宜段里程占比超过 20%,较不适宜~一般适宜段占比超过 50%,建议该 5 条隧道及时调整隧道规划参数,进行线位比选。如规划方案不可避

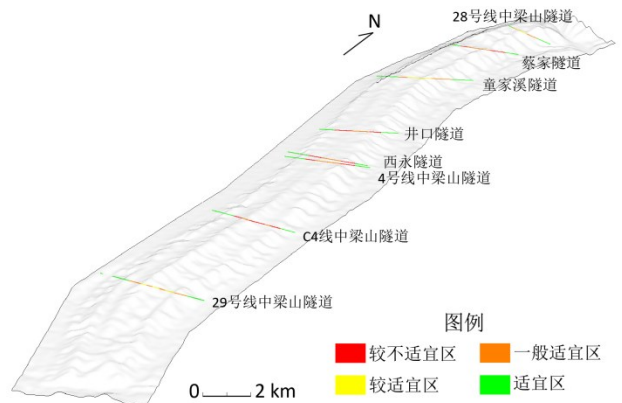


图 10 研究区隧道规划适宜性三维评价工程应用结果

Fig.10 The project application results of 3D evaluation of tunnel planning suitability in the study area

免时建议做专项水文条件论证,加强与已建隧道的相互影响评价,施工前根据三维地质模型地层分布情况合理制定隧道堵排水方案,尽可能降低对地质环境的破坏。

表 8 研究区拟建隧道规划适宜性区段表

Table 8 Planning suitability zone table of the proposed tunnel in the study area

拟建隧道	较不适宜 段/%	一般适宜 段/%	较适宜 段/%	适宜段/%
28 号线隧道	0	31.8	30.5	37.7
蔡家隧道	35.2	36.3	0	28.5
童家溪隧道	0	24.5	25.6	49.9
井口隧道	36.4	22.2	0	41.4
西永隧道	30.6	26.2	0	43.2
4 号线隧道	23.5	31.7	0	44.8
C4 线隧道	42.3	12.2	0	45.5
29 号线隧道	0	35.4	20.7	43.9

利用本研究成果开展隧道规划选线,极大地节省时间和人力成本,更加直观、快捷地获取所选线路地质条件的适宜性,有助于决策者开展隧道线路方案比选,得到最合适的隧道建设方案。但该方法也存在不足,一方面,模型的构建需要大量的地质本底资料和监测资料,后期资料更新后需专业人员进行维护。另一方面,评价体系存在人为主观影响,需要进一步探究更为科学合理的评价方法,建立多维量化评价体系。

6 结论

通过适合区域地质特征的三维地质建模方法与网格剖分方法,构建了中梁山两江段一系列较为精细的三维地质模型及属性模型,基于层次分析法及多级指数叠加法,构建了符合地区地质环境条件与隧道建设现状的隧道规划三维评价体系,并利用三维评价结果开展了隧道规划评价分析应用。得

到如下结论:

1) 基于多源建模数据,利用地质界线约束的平行剖面-褶皱复原法,可以建立研究区较为精细的三维地质结构模型,同时利用顺层截断网格剖分法可以得到符合区域构造特征的剖分网格。以此为数据来源及分析载体,基于层次分析法及多级指数叠加法,可以构建符合地区地质环境条件与隧道建设现状的隧道规划三维评价体系,进一步可得到隧道规划适宜性三维评价结果。研究成果可为重庆“四山”地区隧道规划选址决策及山地城市地下空间格局优化工作提供有力支撑,同时可为川东隔档式构造区及其他具有相似地质环境条件地区相关工作提供一定思路。

2) 研究区隧道规划三维适宜性结果空间上受地质构造及水文地质特征影响显著,同时在平面上受地形地貌、隧道建设、保护对象分布范围等二维因素叠加影响。隧道规划一般适宜、较不适宜区域多集中于近背斜轴部二叠系、三叠系碳酸盐岩地层,其体积占比分别为18%、16%;规划较适宜区多分布于山脉中部泥质含量较高的层组以及头尾靠近长江、嘉陵江区域,其体积占比15%;规划适宜区多分布于山脉两侧侏罗系地层,其体积占比51%。

3) 利用隧道规划三维评价结果,对研究区2021—2035年拟建隧道开展规划适宜性三维评价应用,结果能清晰直观显示每条规划隧道对应里程的规划适宜性分布。其中蔡家隧道、井口隧道、西永隧道、4号线隧道、C4线隧道较不适宜段里程占比超过20%,较不适宜~一般适宜段占比超过50%,建议对规划方案作出调整或开展专项水文条件论证,合理制定隧道堵排水方案,尽可能降低对地质环境的破坏。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40. (in Chinese)
- [2] 赵瑜, 胡波, 陈海林, 等. 岩溶隧道工程修建对地下水环境的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 1-8.
ZHAO Y, HU B, CHEN H L, et al. Impact of tunnel engineering on groundwater environment in karst area [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 1-8. (in Chinese)
- [3] LI Q S, KANG X B, XU M, et al. Effects of coal mining and tunnel excavation on groundwater flow system in karst areas by modeling: A case study in Zhongliang Mountain, Chongqing, Southwest China [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2023, 11(4): 391-407.
- [4] 陈小平, 辛理敏, 孔祥岁, 等. 妈湾跨海通道工程隧道选线快速评价模型研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1630-1636.
CHEN X P, XIN L M, KONG X S, et al. Research on fast evaluation model for route selection of mawan sea-crossing tunnel [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1630-1636. (in Chinese)
- [5] QU C Q, et al. The new comprehensive evaluation system for subsea tunnel site selection: A case study of the Qiongzhou Strait, China [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(8): 895-911.
- [6] 刘少鹏, 邓斌, 曹影峰, 等. 桥隧工程 GIS+BIM 正向设计方法与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 674-689.
LIU S P, DENG B, CAO Y F, et al. Geographic information system + building information modeling-based forward design method: Applications in bridges and tunnels [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 674-689. (in Chinese)
- [7] 赵思成, 胥犇, 李晓军, 等. 山地城市核心区地下空间开发适宜性三维评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 70-78.
ZHAO S C, XU B, LI X J, et al. 3D evaluation of suitability of underground space development in core areas of mountainous cities [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(1): 70-78. (in Chinese)
- [8] 苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 等. 考虑城市地质环境影响的深圳市地下空间开发适宜性评价[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 514-524.
SU D, HUANG M L, HAN W L, et al. Suitability evaluation of underground space development in Shenzhen: Urban geoenvironmental considerations [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 514-524. (in Chinese)
- [9] ZHOU D K, LI X Z, WANG Q, et al. GIS-based urban underground space resources evaluation toward three-dimensional land planning: A case study in Nantong, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 1-10.
- [10] 李鹏岳, 韩浩东, 王东辉, 等. 城市地下空间资源开发利用适宜性评价现状及发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(1): 121-128.
LI P Y, HAN H D, WANG D H, et al. Current situation and development trends of suitability evaluation of urban underground space resources [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41(1): 121-128. (in Chinese)

- [11] 程靖清, 李炎桂, 姚华舟, 等. 基于三维地质模型的地下空间地质环境条件适宜性评价: 以深圳湾超级总部基地片区为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2024, 58(5): 551-560.
- CHENG J Q, LI Y G, YAO H Z, et al. Evaluation of the suitability of geological environment conditions in underground space based on 3D geological model: A case study of Shenzhenwan Super Headquarters Base Area [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2024, 58(5): 551-560. (in Chinese)
- [12] DOU F F, LI X H, XING H X, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development - A case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, Eastern China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104052.
- [13] DOU F F, XING H X, LI X H, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development based on combined weighting and improved TOPSIS [J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1): 693-711.
- [14] 邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 等. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究: 以杭州市为例[J]. 地质论评, 2022, 68(2): 607-614.
- XING H X, DOU F F, GE W Y, et al. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization [J]. Geological Review, 2022, 68(2): 607-614. (in Chinese)
- [15] HOU W S, YANG L, DENG D C, et al. Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan city, South China [J]. Computers & Geosciences, 2016, 89: 1-11.
- [16] ANDERSEN T R, POULSEN S E, PAGOLA M A, et al. Geophysical mapping and 3D geological modelling to support urban planning: A case study from Vejle, Denmark [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 180: 104130.
- [17] 刘鑫宇, 董杰, 王睿, 等. 我国城市地下空间开发适宜性评价研究现状与发展趋势[J]. 地质与勘探, 2024, 60(2): 348-355.
- LIU X Y, DONG J, WANG R, et al. Current situation and development trend of urban underground space development suitability evaluation in China [J]. Geology and Exploration, 2024, 60(2): 348-355. (in Chinese)
- [18] 郝明. 多元复杂地质结构城市地质三维建模技术研究及示范应用: 以成都市为例 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- HAO M. 3D modeling technology for urban geology with diverse and complex geological structures research and demonstration application [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023. (in Chinese)
- [19] HUANG J C, LI A B, WANG X, et al. Automated identification and mapping of geological folds in cross sections [J]. Open Geosciences, 2023, 15(1): 20220479.
- [20] 李林, 王涛, 董英, 等. 地质结构约束下的城市多要素三维属性建模方法研究: 以西咸新区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 169-177.
- LI L, WANG T, DONG Y, et al. Multi-factor attribute modeling method constrained by geological structure: A case study in Xixian New Area [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 169-177. (in Chinese)
- [21] 吴少元. 基于三维单元模型的地下空间地质适宜性评价[J]. 人民长江, 2022, 53(12): 111-117.
- WU S Y. Geological suitability evaluation of underground space based on three-dimensional element model [J]. Yangtze River, 2022, 53(12): 111-117. (in Chinese)

(编辑 XXX)