

文章编号: 1008-2786-(2019)3-303-13

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000424

山区城市地下空间资源评价与开发利用模式 ——以延安市为例

张茂省¹, 李同录², 程秀娟¹, 孙萍萍¹, 李 强², 乔志甜², 赵权利²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘 要: 山区城市受地形地貌条件的限制, 面临建设用地不足、交通拥挤、人口密集的压力, 地表空间严重短缺。然而, 特殊的地形地貌与地质环境条件却有利于地下空间的开发利用。地下空间将成为山区城市发展中的一种宝贵资源。本文以黄土高原丘陵沟壑区的延安市为例, 基于地形、岩土、水文地质和地质灾害等地质环境条件, 并考虑文物保护单位及城市功能设施、空间需求及经济因素, 评估了延安市区 376.68 km² 地下空间天然资源量、可开发资源量, 对河谷以下 50 m 及川道两侧 1 km 内的地下空间资源适宜性进行了定性评估。结果表明, 延安市地下空间资源丰富; 地下空间天然资源量、可开发资源量约为 188.35、174.48 亿方; 地下 0 ~ -10 m, -10 ~ -30 m, -30 ~ -50 m 适宜开发的地下空间资源量分别为 23.25、11.52、1.44 亿方, 较适宜开发的分别为 4.18、62.44、71.65 亿方, 沿川道两侧适宜开发的侧向山体空间资源量为 12.29 亿方, 较适宜开发的资源量为 81.50 亿方; 延安市围岩类别自 II ~ VI 级, 其中 II ~ IV 级围岩工程性质良好, 有利于地下空间开发。本文提出了“垂向地下 + 侧向山体”地下空间组合开发的理念, 同时提出了延安市地面建设和地下空间协同开发方案, 这将成为延安乃至其他山区城市发展的一种新模式。

关键词: 山区城市; 地下空间; 延安; 围岩级别; 地质环境

中图分类号: TU 924

文献标志码: B

自 21 世纪以来, 我国经济飞速发展, 城市化水平越来越高, 然而, 土地资源短缺, 生存空间拥挤, 道路交通堵塞, 生态环境恶化等限制城市发展的问題随之而来。21 世纪将是地下空间利用的世纪, 已经成为岩土工程界的共识^[1-3]。原国土资源部“十三五”科技创新规划, 制定了以向地球深部进军为统领, 全面实施包括深地探测等“四位一体”的科技创新战略, 确立了“三深”战略领域跻身世界先进行列的总体目标, 足见地下空间开发利用在我国未来发展中的重要性 and 紧迫性。延安市是中国革命圣地,

是延安精神的诞生地, 红色旅游资源丰富, 每年有大量来自海外及全国各地的人来此参观学习。然而, 延安市地处陕北黄土高原, 地形起伏大, 城市空间限制在三条狭窄的川道上, 川道宽度不足 1 km, 目前宝塔区建设用地总面积 36.0 km², 仅占宝塔区国土总面积的 1%; 2018 年延安城区道路总长度为 97.6 km, 路网密度为 3.46 km/km², 其中, 支路密度仅有 0.83 km/km², 且在各支沟内的道路基本为尽头或枝状, 交通极为不便; 市政设施呈“线”状分布, 分布不均衡, 老城区服务压力较大, 设施老化等问题

收稿日期 (Received date): 2019-5-12; **改回日期** (Accepted date): 2019-6-10

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2018YFC1504700); 国家自然科学基金项目 (41530640); 中国地质调查项目 (DD20189270)。[National Key Research Planning Program (2018YFC1504700); National Natural Science Foundation of China (41530640); Project of China Geological Survey (DD20189270)]

作者简介 (Biography): 张茂省 (1962-), 男, 陕西乾县人, 博士, 研究员, 从事水工环地质调查与研究。[ZHANG Maosheng (1962-), male, born in Qian County of Shaanxi Province, Ph. D., professor, specialized in hydrogeology, engineering geology and environmental geology] E-mail: xazms@126.com

较为突出,达不到配套要求,难以满足城市发展的需求。同时作为中国革命红都的延安也是全国红色革命旧址数量最大、分布最广、规格最高的城市^[4],仅市区就有 168 处,受保护的革命旧址也占据了较大一部分土地,导致老城区建筑密度大,道路拥堵,公共绿地少,公共设施分布不均,还面临侧向山体地质灾害的威胁,极大地限制了延安城市的功能布局与快速发展。因此急需开发地下空间,并与地面平山建城相结合,为延安城市发展打开瓶颈。针对这些问题,2017 年自然资源部中国地质调查局部署启动了延安革命老区综合地质调查项目,通过无人机倾斜摄影测量、三维基础地质填图、工程地质钻探、多要素城市地质调查、三维地质结构建模等工作手段,结合延安市多山的实际情况,提出了延安市区应采用“垂向地下+侧向山体”地下空间开发的新理念,估算了不同层位地下空间天然资源量、可开发资源量,评价了不同围岩地下空间开发利用的地质安全性,提出了延安市重要交通枢纽、重要旅游景点的地下空间开发模式,结果可服务于延安市城市地下空间建设性远景规划,或可为国内其他城市地下空间开发利用提供借鉴。

1 延安市地下空间开发利用条件

延安市地形起伏大、地质灾害发育,不利于城市发展,但延安市区基岩埋深浅,基岩可作为良好的地下空间环境,起伏的地形有利于地下空间与地面设施的连接,因此延安地下空间开发具有得天独厚的地质条件^[5-6]。

1.1 地形条件

延安市位于陕北黄土高原腹地,属于典型的继承型和继承-侵蚀混合型的黄土梁峁沟壑区。黄土广覆于下伏起伏不平的基岩古地形之上,由于延河、南川河及其支流的长期侵蚀切割,形成了现今梁峁起伏、河谷深切的地形^[7]。延安市区素有“三川三山”之称,三川指东川河、南川河和西川河三处川道;三山指凤凰山、清凉山和宝塔山,延安市地貌及城市格局如图 1 所示。老城区主要分布在三川,中心城区集中在宝塔区的“三川”交汇处,城市以此为中心向三川呈狭长的“Y”形展开。总体地形特点是西南、西北、东南高,中部及东北部低,延安城区低,周围高。最高处位于南部十八行梁,海拔 1290 m;

最低处位于东北川口乡黑豆沟沟口,海拔 930 m,相对高差 360 m。高程自黄土梁、峁顶部的大于 1200 m 逐渐变化至 1100 m 左右,到梁、峁坡脚地带陡降至 1000 m 左右,之后以河流阶地的形式缓慢过渡到河床的 930 m 左右。延安市起伏的地形有利于地下空间与地面的连接。

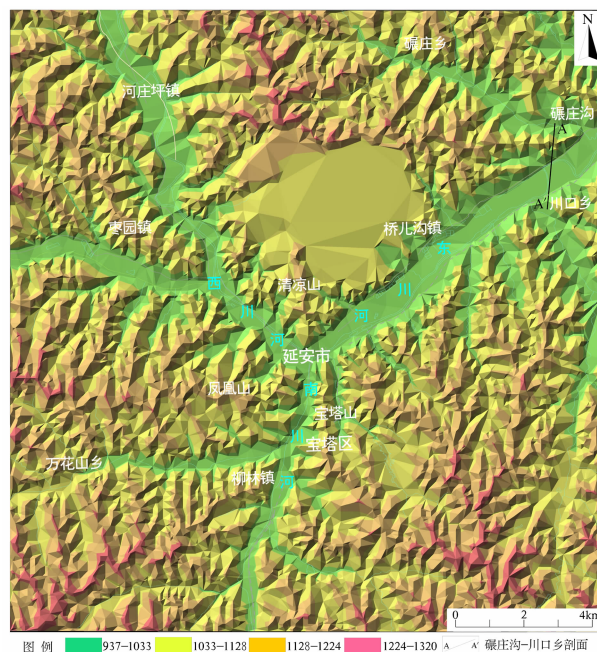


图 1 延安市地貌及市区分布

Fig. 1 Geomorphology and urban distribution of Yan'an City

1.2 岩土体条件

延安市构造上处于鄂尔多斯中生代盆地的中部,主要发育中-新生界地层,通过综合地层柱状图 2 可以看出,区内基岩地层从老到新主要有三个组,①三叠系瓦窑堡组:为泥岩、砂质泥岩与砂岩互层,出露于延安城东北部碾庄沟、川口一带及北部沟谷中,为一套河湖相含煤沉积;②侏罗系富县组:上部为泥岩夹砂岩,质地松软,遇水极易软化,工程地质性质差;下部为砂砾岩、泥质砂岩,块体性好,出露于延安城东罗家坪-泽子沟一带的沟谷之中;③侏罗系延安组:按岩性组合不同分为宝塔山段和枣园段,其中宝塔山段以砂岩、砂砾岩为主,钻孔揭露发现整套地层岩石较为均一,岩体结构完整,主要分布于宝塔山及长庆第一炼油厂周边的沟壑内,范围广泛;其中枣园段为砂泥岩互层,分布于杨崖以西和南七里堡以南的广大地区以及狄青牢以北地带,砂岩为长石石英砂岩,致密坚硬,中层-厚层状结构,工程地

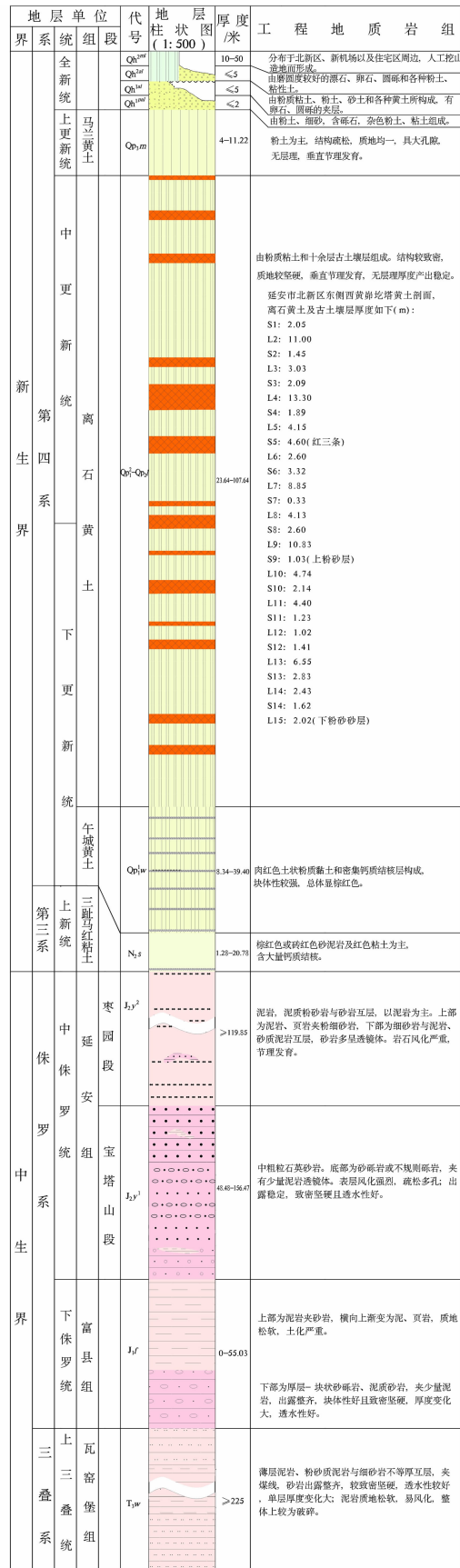


图 2 延安市综合地层柱状图

Fig.2 The comprehensive stratigraphy of Yan'an City

质性质良好;泥岩软弱,遇水软化,性质相对较差。土体主要包括:新近系红黏土,第四系风积黄土。由典型工程地质剖面图 3 可以看出,延安市基岩顶面高出河床约 30 ~ 40 m,红黏土零星分布在基岩顶面,与下伏基岩呈不整合接触,厚度变化大,遇水强度显著降低;上覆风积黄土,与不同时代地层呈不整合接触,黄土自马兰至午城均有分布,在斜坡地带,马兰黄土披覆在老黄土或更老地层之上,几乎覆盖整个梁峁区。该区马兰黄土普遍具有湿陷性,老黄土垂直节理、构造节理普遍发育。披覆式的黄土斜坡带是地质灾害易发区域。

通过工程地质钻探及岩土力学试验表明,延安市具有良好开发地下空间的岩土体条件,其中老黄土和中生代基岩均适合开发地下空间,基岩比黄土的开发利用条件好,特别是侏罗系延安组宝塔山段(J_{2y}¹)砂岩产状近水平,呈坚硬块状结构,是延安市地下空间开发的理想岩体。

1.3 地质构造条件

延安市整体位于鄂尔多斯构造盆地内部,盆地发育期在中晚三叠纪至早白垩纪,该时期形成了三叠系延长组、侏罗系延安组及直罗组、白垩系、第四系等 4 个地层不整合界面,表明在沉积阶段也发生过不均匀抬升和剥蚀事件。盆地在晚白垩纪开始隆升,至新近纪古新世仍处于隆起剥蚀状态。始新世末的喜马拉雅运动,使本区在连续上升的情况下,沉积了巨厚的第三系红粘土和第四系黄土地层,新生界以角度不整合覆于中生界的不同层位之上。

延安市中新世地层未经受过强烈的构造挤压、断裂错动和岩浆侵入,该区构造稳定、岩土体结构完整,在基岩斜坡露头上,可见大量垂直卸荷裂隙,基岩地层软硬相间,易风化剥落。但在钻孔岩芯中,岩石取芯率高,构造裂隙不发育,层面结合紧密,岩石风化程度低,岩体结构完整。延安市岩石的这种构造特征有利于地下工程建设。

1.4 水文地质条件

延安市地势高,河谷两岸的基岩顶面高出河床 30 ~ 40 m,河谷水位以上地下水仅接受大气降水补给。据 1951—2005 年资料,延安多年平均降水量为 562.10 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 70% 左右。年平均蒸发量 1600 mm。由于集中降雨流失多,入渗少,年蒸发量大,大气降水的补给量不大。区内河水位以下基岩埋深浅,基岩中的泥岩隔

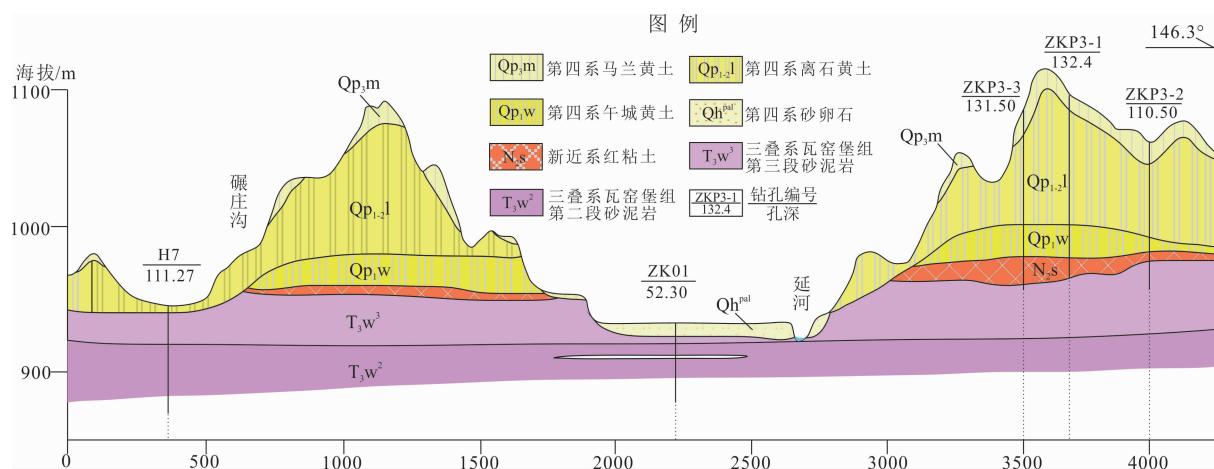


图3 A-A'碾庄沟至川口乡地质剖面

Fig. 3 Geological section from Nianzhuangou to Chuankou Village

水,河水对地下水的补给量也很小。因此延安市地下水不丰富,本次黄土梁峁中实施的钻孔均没有揭露到稳定地下水位,黄土含水层分布于黄土梁峁区,多呈条带状分布于较宽的梁峁下部,储水条件差,地下水水量贫乏;碎屑岩含水层分布于砂岩裂隙及顶部风化壳的裂隙中,以风化带含水为主要特征;基岩裂隙水分布极不均匀,裂缝发育深度一般为5~30 m,地下水仅在局部裂隙密集带相对较富集,但流量不大,很少有跌水或水流,深部基岩裂隙多不发育,水量极小^[7]。仅由于水库雍水或人为蓄水等,局地有地下水位升高的情况。地下水对于地下空间资源开发来说属于负面因素,因此延安市地下水贫乏有利于地下空间的开发利用,属有利条件。河床松散层中的地下水丰富,但厚度小,应回避在该层土中开发地下空间,若开发,适宜明挖施工。

1.5 地质灾害

延安市老城区被高陡黄土斜坡所环绕,是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害集中发育的区域^[8-9]。在2005年地质灾害详细调查及2017年延安市地质灾害群测群防结果的基础上,项目组通过排查,确定延安市宝塔区发育地质灾害隐患点245处,其中滑坡隐患点169处,崩塌隐患点32处,潜在危险斜坡地段44处。地质灾害威胁到约4700人的生命及910孔(间)窑洞(房屋)、铁路及公路等安全。

地质灾害主要发生在地表,因此开发利用延安市地下工程可回避大量灾害区,将受地质灾害影响的铁路、公路等重点受灾对象移居地下,有利于防灾减灾。

2 延安市地下空间资源评价

城市地下空间已经被视为人类所拥有的、至今为止尚未被充分开发的一种宝贵资源。早在1981年,联合国自然资源委员会就正式将地下空间列为“自然资源”。地下空间资源包括三个方面的含义:一是天然存在的地下空间资源总量;二是在一定的技术条件下可供合理开发的地下空间资源总量;三是在一定的历史时期内可供有效利用的地下空间资源总量^[10],本次评价前两者,即地下空间天然资源量,地下空间可开发资源量。

2.1 延安市地下空间评价理念与方法

根据延安市地下空间开发利用的有利条件,本文提出延安市区应采用“垂向地下+侧向山体”地下空间组合开发的理念,各自的特点如下:

(1)垂向地下空间开发:目前不同城市竖向分层大多分为四层,但分层位置有所不同。根据延安市的特点,以河谷谷底作为基准面,向下可分为4层,各层分界及功能如表1所列。考虑到50 m以下空间作为预留空间,近期不开发,本文只评价河谷以下50 m深度内的资源量,其功能布局如图4所示。

(2)侧向山体地下空间开发:指开发河谷两侧的侧向山体空间,川道两侧基岩顶面高,围岩质量好,可作为地下商业街、地下停车场、地下交通设施出入口、地下物流仓储空间等。本次以河谷河床(0 m)为基准面,沟谷外围1 km范围内侧向山体作为地下空间资源量的评估对象。

表1 地下空间竖向功能分层

Tab.1 Function division of vertical underground space

深度/m	道路下/m	非道路下
浅层 (0 ~ -10)	0 ~ -2.5	市政管线、路基
	-2.5 ~ -6	市政管线、建筑基础、地下通道
	-6 ~ -10	地下道路、步行通道
次浅层 (-10 ~ -30)	轨道交通线路、生产储藏及防灾设施	建筑物基础、轨道交通站台、地下综合体、生产储藏及防灾设施
次深层 (-30 ~ -50)	预留物流管道、地下道路空间	预留物流管线、地下道路以及危险品仓库空间
深层 (-50 以下)	预留特种工程等远期开发空间	

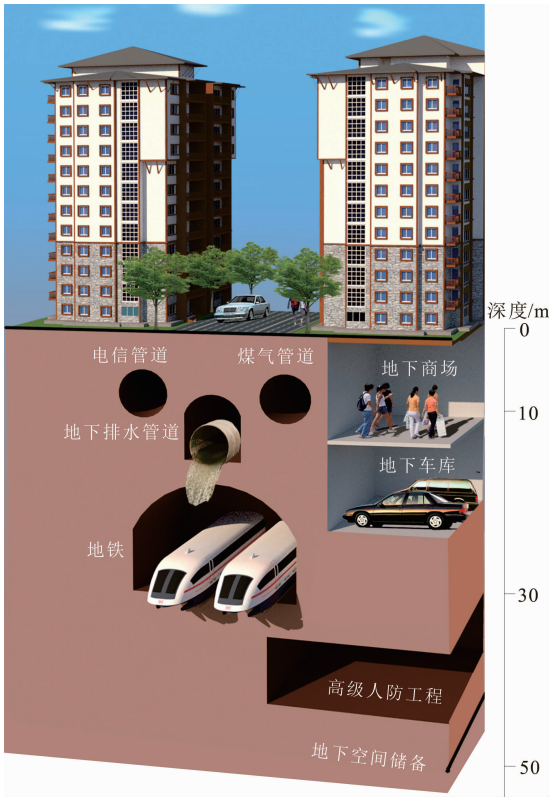


图4 地下空间竖向分区(0 ~ -50m)

Fig.4 Vertical zonation of underground space (0 ~ -50m)

地下空间资源量包括天然资源量和可开发资源量。天然资源量是指在指定地下深度区域内的全部

空间总体积;可开发资源量是指在指定深度区域内,受各种自然和建筑因素制约条件下可开发的空間总体积。地下空间资源量以及开发适宜性按不同深度分层次评价,开发的适宜性分为适宜、较适宜和不适宜三级,各级的评判标准如下:

(1)适宜:对历史文物或现代重要工程没有影响;地质环境条件良好,不受地质灾害的影响,地层为中生代基岩,岩体结构厚层状,岩性坚硬,地下水不发育,地下空间可利用性好,人类较为集中,空间利用率高。

(2)较适宜:对历史文物或现代重要工程没有影响;地质环境条件较好,地层为中生代基岩至第四系老黄土,岩体结构为中-薄层状,岩性为软硬相间的砂泥岩互层、新近系红黏土或老黄土,地下水不发育,空间可利用性一般,或者城市人口及设施较少,当前开发利用意义不大的。

(3)不适宜:位于历史文物保护区;或地质环境条件差,有潜在地质灾害隐患;空间可利用性差,开发成本高,经济效益低。

2.2 延安市地下空间资源量评价

有学者^[11]将负面清单法引入城市地下空间资源评价。结合延安市的特点,地下空间资源的负面因素分为限制因素和约束因素两类。限制因素包括文物、遗址、已有人类工程设施等。约束因素包括不利的地质因素,诸如滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,不稳定岩土体和软岩、软土等。

地下空间资源量可以理解为地面以下一定深度以内的天然资源量,以及扣除限制因素和约束因素的可开发资源量。本文对延安市市区 376.68 km² 范围,先计算其天然资源量,再扣除革命旧址、建筑地基等限制因素和地质灾害等约束因素影响范围,估算可开发资源量,并估算了河床两侧 1 km 范围的侧向地下空间资源量,结果如表 2 所示。其中垂向评估河谷以下 50 m 深度(高程约 910 m ~ 960 m)并按表 2 的深度分层,即 0 ~ -10 m、-10 ~ -30 m、-30 ~ -50 m 三个层次估算。

2.3 延安市垂向地下空间开发适宜性评价

根据地形条件、岩土特性、水文地质和地质灾害等地质环境条件,并考虑文物保护单位及已有城市设施、空间利用需求及经济因素^[10-13],对市区各层次地下空间开发的适宜性进行了评估。

表2 延安市市区垂向和侧向地下空间资源量统计

Tab.2 Resources of vertical and lateral underground space in Yan'an urban area

资源类型	分层/m	垂向地下空间 /($\times 10^8 \text{ m}^3$)	河谷两侧 1km 内侧向 空间/($\times 10^8 \text{ m}^3$)
天然资源量	0 ~ -10	37.67	105.98
	-10 ~ -30	75.34	
	-30 ~ -50	75.34	
可开发资源量	0 ~ -10	27.43	93.79
	-10 ~ -30	73.96	
	-30 ~ -50	73.09	

(1)0 ~ -10 m 地下空间

地下 10 m 内的适宜性评价结果如图 5 所示,不适宜区集中在河谷、沟谷斜坡带和文物保护区,面积约为 102.4 km²,占评估区的 27.18%,资源量约为 10.24 亿 m³。河谷区浅层为第四系冲积砂卵石,地下水位浅,土层松散,透水性强,地下空间利用成本高、效益低。沟谷斜坡带地质灾害易发,地下 10 m 仍然是潜在地质灾害的影响深度,地下开挖也会产生次生灾害,地下空间利用首先要治理灾害,成本高、效益低^[14]。文物保护区地下不宜开发。较适宜区分布在不适宜区外围,地质灾害不发育,面积约为

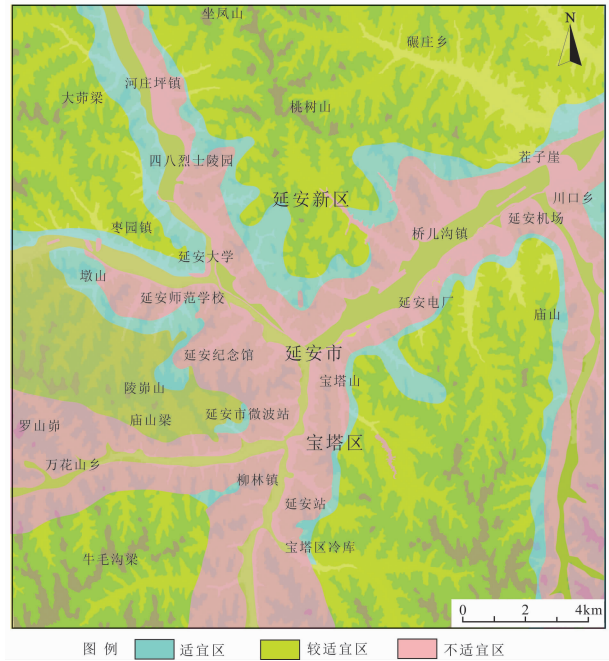


图5 延安市区 0 ~ -10 m 地下空间资源适宜性分区

Fig.5 Suitable zonation of 0 ~ -10 m underground space in Yan'an urban area

41.8 km²,占总面积的 11.10%。适宜利用区面积约为 232.5 km²,占总面积的 61.72%,位于远离河谷的梁峁地带,地层主要为老黄土和侏罗系砂泥岩,工程地质条件良好^[15-16]。但该区地表人口少,虽然适宜开发利用,但地下空间的开发利用性价比低,而在类似于延安新城,平山造城后,其浅层地下空间可进一步开发利用。

(2) -10 ~ -30 m 地下空间

地下 10 ~ 30 m 地下空间开发适宜性评价结果如图 6 所示,不适宜区主要为文物保护区,面积为 6.9 km²,占总面积的 1.83%,远小于浅层的不适宜区,这是由于该层地下空间基本不受地质灾害的影响。较适宜区面积约 312.2 km²,占总面积的 82.88%。主要分布于梁峁地带,该深度范围主要为侏罗系砂泥岩,其中砂泥岩互层的地层软硬相间,围岩类别较低,较适宜地下空间开发。适宜区面积约 57.6 km²,占总面积的 15.29%,该区域 -10 ~ -30 m 范围为坚硬的砂岩和半坚硬泥岩互层,岩体结构完整,透水性差,工程性质良好,适宜地下空间开发。

(3) -30 ~ -50 m 地下空间

地下 30 ~ 50 m 的适宜性评价结果如图 7 所示,与 10 ~ 30 m 的地质条件相似,该层不受地表地质灾

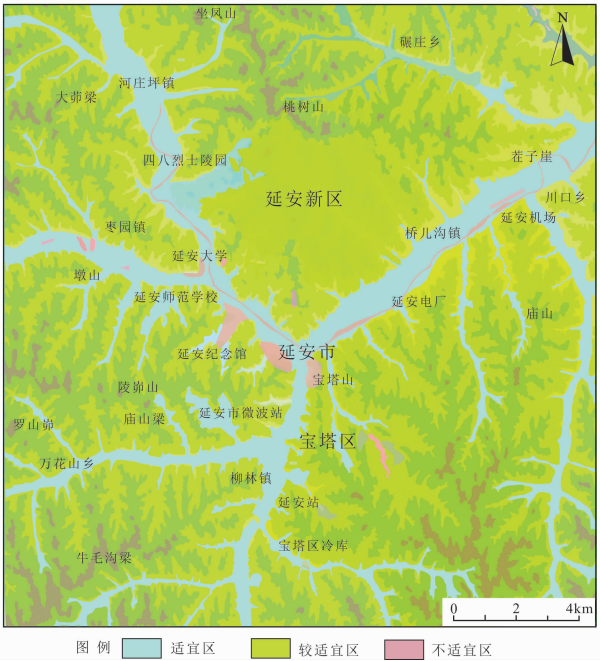


图6 延安市区 -10 ~ -30 m 地下空间资源适宜性分区

Fig.6 Suitable zonation of -10 ~ -30 m underground space in Yan'an urban area

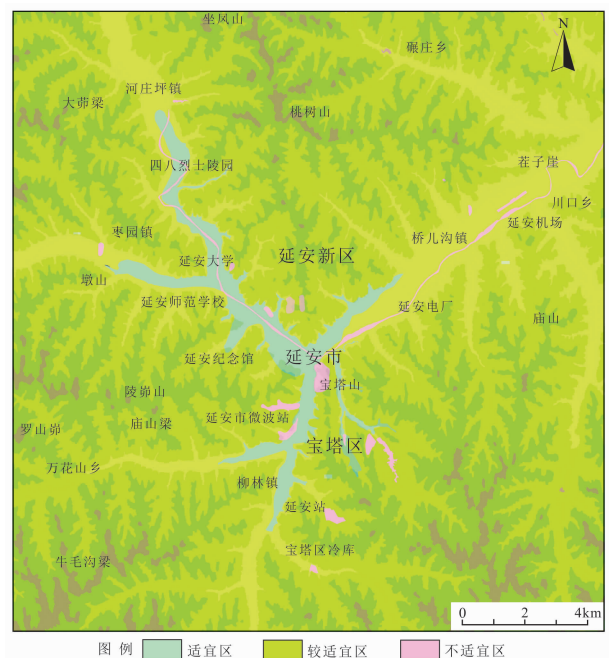


图7 延安市区-30~-50 m地下空间资源适宜性分区

Fig.7 Suitable zonation of -30~-50 m underground space in Yan'an urban area

害的影响。其中不适宜区面积约11.3 km²,占总面积的2.99%,主要为文物保护区下方。较适宜区约为358.2 km²,占总面积的95.10%,主要分布在河谷及梁峁地带下部,岩性为砂泥岩互层,围岩质量较差,但也可以进行地下空间开发。适宜区约7.2 km²,占总面积的1.91%,分布在河谷及梁峁下部,岩性以坚硬的石英砂岩为主,夹有半坚硬的页岩,岩体结构完整,围岩质量好,适合地下空间开发。

2.4 延安市河谷两侧侧向山体空间适宜性评价

延安市地形和地质条件不利于城市地面扩展,

但却有利于向河谷两侧的地下扩展,并有丰富的空间资源。以沟谷谷底为基准面,对沟谷外围1 km范围内侧向空间进行适宜性评估,结果如图8所示。可以看出,延安市区侧向空间资源总量达187.5 km²,占评估区面积的49.78%。其中不适宜区面积约21.6 km²,占侧向空间总量的11.50%,不适宜区主要在斜坡浅层,受到地表地质灾害的影响,有少部分在旅游景区。较适宜区面积约144.2 km²,占侧向空间总量的76.90%,分布在沟谷两侧的地质灾害发育较弱地带。适宜区面积21.8 km²,占侧向空间总量的11.60%,分布在河谷中游及上游两岸山体中,河谷两岸基岩出露,高出河床30~40 m,为坚硬的厚层砂岩,岩体结构完整,工程性质良好,适宜大跨度的地下工程建设。

综上所述,延安市地下空间资源丰富,不仅可以直接开发地面以下的空间,同时三川与三山相间的地形条件,有利于开发沟谷、河谷两侧的侧向山体空间。延安市区可开发利用的地下空间资源适宜性统计如表3所示。其中适宜、较适宜开发利用的垂向地下空间资源量约174.48亿m³,适宜、较适宜开发利用的侧向山体空间资源量约93.79亿m³。

3 延安市地下空间开发的地质安全性评价

地下洞室的围岩稳定性直接关系到施工安全和工程造价。延安市的岩土类型主要有第四系冲积砂卵石土和黄土,新近系红黏土和中生代砂泥岩。本文以岩性较好的中侏罗纪延安组砂岩为例,采用弹

表3 延安市区地下空间资源开发利用适宜性统计表

Tab.3 Underground space resources favorable to exploitation in Yan'an urban area

适宜性	资源量							
	地面以下深度/m						河谷两侧 1 km 内的侧向空间	
	0 ~ -10		-10 ~ -30		-30 ~ -50			
	资源量 /(×10 ⁸ m ³)	比例 /%	资源量 /(×10 ⁸ m ³)	比例 /%	资源量 /(×10 ⁸ m ³)	比例 /%	资源量 /(×10 ⁸ m ³)	比例 /%
适 宜	23.25	61.72	11.52	15.29	1.44	1.91	12.29	11.60
较适宜	4.18	11.10	62.44	82.88	71.65	95.10	81.50	76.90
不适宜	10.24	27.18	1.38	1.83	2.25	2.99	12.19	11.50
合 计	37.67	100.0	75.34	100.0	75.34	100.0	105.98	100.0

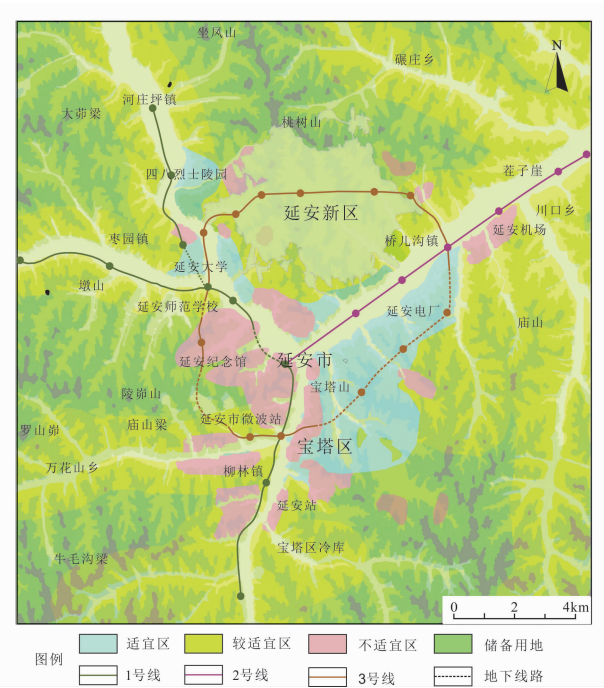


图 8 延安市区河谷两侧侧向山体空间适宜性及地铁规划
Fig. 8 Suitable zonation of the lateral underground space in the valley sides and the subway plan routes in Yan'an urban area

塑性法,以出现塑性区作为稳定性评价条件^[17-18],对洞室稳定跨度进行了计算。围岩参数见表 4,通过改变洞室跨度尺寸,得出埋深 10~30 m 的洞室,开挖的最大跨度如表 5。对各类岩土体,则结合《GB 50307-1999 地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》、《GB-50086-2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范》要求,按不同的围岩等级给出地下空间安全开发的地质建议如下:

- (1)河流冲积砂卵石层,土层松散,富含地下水,围岩类别可定为 VI 级。该层厚度小,不宜地下开挖,地下工程施工应采用明挖。
- (2)第四系黄土层,覆盖于梁峁区顶部,厚度变化大,最大厚度可达 150 m,其中晚更新统新黄土因强度低、具湿陷性等而不宜作为地下空间的场所,中更新统、早更新统老黄土围岩类别可定为 V 级,在该层位进行地下洞室开挖跨度宜小于 5 m,且需进行锚喷初期支护及施工过程监控量测。
- (3)新近系红黏土层,分布不连续,沟谷底部侵蚀强烈的地段有出露,具有弱膨胀性,致密,粘粒含量高,围岩类别可定为 V 级。
- (4)中侏罗统延安组以厚层石英砂岩为主,岩石坚硬、结构完整、埋深较浅,广布延河中上游,高出河床 30~40 m,围岩类别可定为 II 级。在该层进行

地下空间开挖时毛洞埋深在 10 m、20 m、30 m 时,对应的毛跨跨度宜小于 7.2 m、9.7 m、11.4 m,当跨度大于上述数值时,建议进行支护设计,并对围岩进行稳定性分析与验算。

- (5)下侏罗统富县组以含砾砂岩为主,坚硬-较坚硬,结构完整,主要分布在延河中游,围岩可定为 III 级。
- (6)上三叠统瓦窑堡组多为泥砂岩互层,硬质岩与软岩互层,埋深较浅,在延河和南川河沟谷两侧有大面积出露。卸荷节理和风化裂隙发育,块状-碎裂结构,围岩级别可定为 IV 级。

表 4 地下空间工程稳定性快速评价参数

Tab. 4 Quick evaluation parameters of underground space engineering stability

序号	参数	J _{2y} 砂岩层
1	侧压力系数 K_0	0.38
2	变形模量 E/MPa	4203
3	内聚力 C/MPa	4.23
4	内摩擦角 $\Phi/^\circ$	41.6
5	泊松比 μ	0.22
6	围岩容重 $\gamma/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2630
7	埋深 H/m	10, 20, 30
8	高跨比	1.0

表 5 基于弹塑性计算确定的砂岩洞室稳定性结果

Tab. 5 Evaluation results of sandstone chamber stability by elastic-plastic method

序号	埋深/m	毛洞跨度 /m	拱顶最大 竖向位移/m	拱顶允许最 大位移/m
1	10	7.20	8.50	8.54
2	20	9.70	11.00	11.02
3	30	11.40	13.30	13.33

4 延安市地下空间开发利用方案

根据延安市区轨道交通规划、重要革命旧址的分布特点,延安可按线状工程地下空间和区块地下空间进行开发,这两种空间开发均可采用垂向地下+侧向山体组合开发的模式,延安市具有这种组合开发的优势^[19]。

4.1 延安市区轨道交通规划建议

延安的老城区集中在三个川道,规划的新城区位于三个川道之间的梁峁区,平山填沟后作为城市

建设用地,其中北区大半已建成,东区和西区纳入未来建设规划。市区最主要的线状工程是未来的城市轨道交通,按照目前的城市格局,延安市政府规划了三条轨道线路:一号线位于延河上游和南川河沟谷中,长 26.6 km;二号线沿延河下游展布,长 12.0 km,与一号线交于市中心,这两条线路均沿川道布设,贯穿延安老城区;三号线为环线,长 28.4 km,连通老城区和新城区,形成一个整体的交通网络(图 8)。针对目前的规划,从地质环境条件、经济安全的角度提出如下建议:

(1) 3 号线环状穿越川道和新城区,新区高程 1100 m 左右,川道高程 940 ~ 1000 m,线路落差 100 ~ 140 m,因此建议新城区轨道线路改为从地下穿越,线路埋深宜在地面以下 10 ~ 20 m 处,这样既可以利用地下空间资源,又可以回避地面上遭遇黄土地质灾害的风险。

(2) 对于经过未来规划建设的东、西新城区的轨道,建议与未来沟谷挖填方规划相融合确定适宜的轨道线路高程,经过填方区,路基可考虑以填方形式衔接,将地铁设为明洞,并满足未来填筑场地时将明洞埋入地下的条件,与两端的开挖隧道连为一体。

4.2 重要革命旧址邻近地下空间开发建议

延安市范围内现有文物遗址 8545 处,其中新中国革命旧址 445 处,有全国重点文物保护单位 18 处,省级文物保护单位 30 处,区县级文物保护单位 161 处。中心城区共有三处历史街区,包括枣园、杨家岭和桥儿沟历史文化街区。延安市尽管规划了新城,缓解了城市空间的压力,但革命旧址都集中在川道中,旅游业作为延安市主要支柱产业,有大量参观学习的人员往来,因此对老城区重要场地的改造升级也是城市发展的重要任务。以中共中央原书记处所在地枣园革命旧址为例,从场地地质背景条件及地下空间开发利用的角度提出优化设计建议。

枣园位于老城区西北西川河东岸,距市中心 8 km,川道两岸有大面积基岩出露,基岩顶面高,为厚层延安组长石石英砂岩,岩体结构完整,围岩质量好,围岩类别为 II 级,有丰富的可开发侧向地下空间资源,适宜扩展侧向地下空间。根据岩土体等地质环境条件,并考虑文物保护区及已有设施及经济因素对枣园周围 $3 \times 3 \text{ km}^2$ 范围内侧向地下空间适宜性进行了评价,评价结果如图 9 所示。枣园周边侧向山体适宜开发的区域位于川道两侧,面积约

3.1 km^2 ,较适宜区主要在枣园山体公园附近,面积约 0.9 km^2 ,川道及沟谷中不适宜,从空间布局及经济角度考虑,枣园西北方向侧向山体的侏罗系砂岩层位可优先作为枣园革命旧址的储备空间,作为地下停车场、仓库或配套商业文化馆建设,剖面展布如图 10 所示。



图 9 枣园侧向山体开发适宜性分区图

Fig. 9 Suitable zonation of lateral mountain development of Zaoyuan

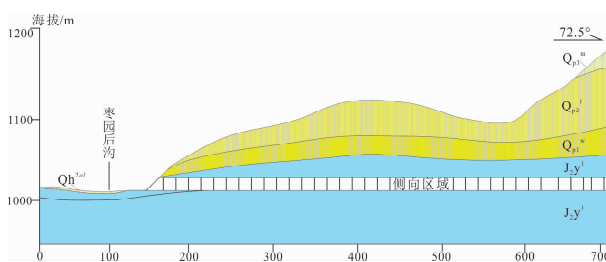


图 10 B-B'枣园侧向空间布置图

Fig. 10 Layout of the lateral space of Zaoyuan

4.3 延安市火车站地下空间开发利用建议

延安市火车站位于宝塔区柳林路,延河支流南川河右岸,是包西铁路线上的重要车站,始建于 1992 年,2006 年 4 月 20 日重新修建,于 2007 年 4 月 18 日建成新站房并投入使用,总建筑面积 2.4 万平方米,设计最高聚集人数 3000 人,24 h 经过延安火车站的客运列车共有 42 趟,其中高峰时段集中在 12:16—16:00 之间,始发或途径的列车达 12 趟,平均每 18.6 min 1 趟,延安市汽车南站也位于火车站

砂卵石土、黄土、新近系红黏土和中生代砂泥岩。其中砂卵石土松散,富含地下水,围岩类别可定为 VI 级;老黄土和新近系红黏土围岩类别可定为 V 级;延安组厚层石英砂岩围岩类别可定为 II 级,且在该层开挖时毛洞埋深在 10 m、20 m、30 m 时,对应的毛跨跨度宜小于 7.2 m、9.7 m、11.4 m。

(4)延安市地下空间具有“垂向地下+侧向山体”组合开发利用优势,针对延安市区轨道交通规划,提出将通过已建新城区和未来规划建设新城区的轨道线路改为地下隧道工程,采用川道区的明轨和梁峁区隧道相结合的交通网络,这样既可以减少线路落差,又可以避免交通线路大量占用地面资源。而延安老城区的主要旅游点、车站和商业区可就近开发侧向山体的地下空间作为地下停车场、商场和仓库等场地。

总之,地面侧向山体和垂向地下空间协同开发,或将是黄土梁峁沟壑区城市建设的一个新模式,可为山区城镇地下空间开发利用提供借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,2016:332-359. [ZHANG Zuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. Engineering geological analysis principles [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 332-359]
- [2] YUAN Hong, LIU Xinrong, DAI Zhizhong, et al. Low-carbon city and underground space planning in the mountain city-A case of Chongqing[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260; 1464-1467.
- [3] 王龄域. 城市的可持续发展与地下空间开发利用[J]. 住宅与房地产, 2017(9): 256-256. [WANG Lingyu. Sustainable development of urban and development and utilization of underground space[J]. Housing and Real Estate, 2017(9): 256-256]
- [4] 艾庆伟. 为了传承红色根脉—延安加强革命旧址保护纪实[N]. 陕西日报, 2015-4-24: 第1版, http://esb.sxdaily.com.cn/sxrb/20150424/html/index_content_000.htm.
- [5] 张茂省,校培喜,魏兴丽. 延安市宝塔区崩滑地质灾害发育特征与分布规律初探[J]. 水文地质工程地质, 2006(6): 72-74, 79. [ZHANG Maosheng, XIAO Peixi, WEI Xingli. A preliminary discussion of the occurrence of landslide in the Baota district of Yan'an City [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(6): 72-74, 79]
- [6] 张茂省,孙传尧,校培喜,等. 延安市宝塔区地质灾害详细调查示范[J]. 西北地质, 2007, 40(2): 29-55. [ZHANG Maosheng, SUN Chuanyao, XIAO Peixi, et al. A demonstration project for detailed geo-hazard survey in the Baota district, Yan'an [J]. Northwest Geology, 2007, 40(2): 29-55]
- [7] 张茂省,校培喜,魏兴丽,等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京:地质出版社, 2008: 11-32. [ZHANG Maosheng, XIAO Peixi, WEI Xingli. et al. Landslide and Collapse Disasters in Baota Area of Yan'an [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 11-32]
- [8] 祝俊华,段旭,陈志新,等. 延安地区生态环境与地质灾害相关性探讨[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 163-167. [ZHU Junhua, DUAN Xu, CHEN Zhixin, et al. Discussion of the correlation between eco-environment and geological disasters in Yan'an Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 163-167]
- [9] 段旭,祝俊华,董琪,等. 延安地区人类工程活动与地质灾害相关性探讨[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 106-110. [DUAN Xu, ZHU Junhua, DONG Qi, et al. Discussion of the correlation between Human engineering activities and geological disasters in Yan'an area [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 106-110]
- [10] 姚华彦,刘建军. 城市地下空间规划与设计[M], 北京:中国水利水电出版社, 2018: 19-32. [YAO Huayan, LIU Jianjun, Urban Underground Space Design [M], Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2018: 19-32]
- [11] 张茂省,王化齐,王尧,等. 中国城市地质调查进展与展望[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 1-9. [ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and prospects of urban geological survey in China [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 1-9]
- [12] 吴炳华,张水军,徐鹏雷,等. 宁波市地下空间开发地质环境适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 16-21. [WU Binghua, ZHANG Shuijun, XU Penglei, et al. Geological environment suitability assessment of underground space development in Ningbo city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 16-21]
- [13] 方寅琛,龚日祥,李三凤,等. 基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价—以嘉兴城市地质调查工作为例[J]. 上海国土资源, 2017, 38(2): 43-45. [FANG Yinchun, GONG Rixiang, LI Sanfeng, et al. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model, using the Jiaxing urban geological survey as an example [J]. Shanghai Land & Resources, 2017, 38(2): 43-45]
- [14] 郭大奇. 城市中心区地下空间开发利用模式探索[J]. 城市住宅, 2018, 25(4): 35-39. [GUO Daqi. Exploration on the exploitation model of underground space in urban central [J]. City & House, 2018, 25(4): 35-39]
- [15] 任幼蓉,韩文权. 重庆地下空间开发与环境保护协调发展研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 965-969, 995. [REN Yourong, HAN Wenquan. Study on coordinated development between underground space utilization and environment protection [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 965-969, 995]

- [16] 王永焱, 林在贯, 等. 中国黄土的结构特征及物理力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 181 – 200. [WANG Yongyan, LIN Zaiguan, Structural Characteristics and Physical and Mechanical Properties of Loess in China [M]. Beijing: Science Press, 1990: 181 – 200]
- [17] 李宁, 陈蕴生, 陈方方, 等. 地下洞室围岩稳定性评判方法新探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1941 – 1944. [LI Ning, CHEN Yunsheng, CHEN Fangfang, et al. Research on tunnel stability criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1941 – 1944]
- [18] 李宁, 刘乃飞, 李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(9): 1812 – 1821. [LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng, New method for stability evaluation of soil and soft rock tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(9): 1812 – 1821]
- [19] 王江波, 苟爱萍. 轨交站域地下空间综合开发利用模式研究——大连轨交站为例 [J]. 四川建筑, 2018, **38**(6): 113 – 119. [WANG Jiangbo, GOU Aiping. Study on comprehensive development and utilization model of underground space in rail transit station area – A case study of Dalian rail transit station [J]. Sichuan Architecture, 2018, **38**(6): 113 – 119]
- [20] 朱合华, 骆晓, 彭芳乐, 等. 我国城市地下空间规划发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, **19**(6): 12 – 17. [ZHU Hehua, LUO Xiao, PENG Fangle, et al. Development strategy on urban underground space planning in China [J]. Engineering Science, 2017, **19**(6): 12 – 17]

Evaluation of Underground Space Resources in Mountain Cities and Their Development Models

——Taking Yan'an City as an Example

ZHANG Maosheng¹, LI Tonglu², CHENG Xiujuan¹, SUN Pingping¹, LI Qiang²,
QIAO Zhitian², ZHAO Quanli²

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Key Laboratory for Geo-Hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The development in mountain cities are impeded by topographical and geomorphological conditions and most of them are arrested by insufficient construction land, traffic congestion and overloaded population, and now serious shortage of surface space continue to plague economy in mountain cities. Nevertheless, special topography and geo-environmental conditions in mountain cities are conducive to exploration into underground space, which will have become a valuable resource in the development of mountain cities. Taking Yan'an City in the hilly and gully areas of the Loess Plateau as an example, in this paper it introduced a concept of “underground downwards + hillside lateral” for advocating a combined utilization of underground space in mountain cities. In view of the geo-environmental conditions including topography, geotechnical and hydrogeological conditions and geohazard occurrences, and considering cultural relic protection sites and urban functional facilities, as well as space layout and economic concerns, the natural resources and exploitable resources in underground spaces within 376.68 km² of urban district of Yan'an were evaluated for knowledge. And the availability of underground space resources within 50 m below river valley and spaces in mountain massif within 1 km on both sides of valley roads was qualitatively evaluated. Results showed that the quantity of natural space resources and the available resources in Yan'an was about 18.835 billion cubic meters and 17.448 billion cubic meters, respectively; In the depth of 0 ~ -10 m, -10 ~ -30 m, -30 ~ -50 m, the volume of underground space resources favorable to exploitation was 2.325 billion cubic meters, 1.152 billion cubic meters and 144 million cubic meters, respectively; and correspondingly the amount accessible (sub-favorable) to exploitation was 418 million cubic meters, 6.244 billion cubic meters and

7.165 billion cubic meters, respectively. The bulk of space resources in valley massif within 1 km along both sides of valley roads was 1.229 billion cubic meters favorable to development, with a volume of 8.150 billion cubic meters accessible (sub-favorable) to exploitation. Generally, there are abundant underground space resources. Yan'an City's surrounding rocks were classified as Class II – VI, among which the Class II – IV have fine engineering properties and are suitable to underground space exploration. In this research, a coordinated development plan characterized by combination of surface construction and underground space utilization in Yan'an City was proposed and it could serve as a new model to solve the development problem of Yan'an as well as other mountain cities which facing the similar issue of city expansion due to surface space restriction.

Key words: mountain city; underground space; Yan'an City; surrounding rock level; geological environment