

谢和平,高明忠,刘见中,等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1487-1503. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0547

XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1484-1503. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0547

## 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究

谢和平<sup>1,2</sup>,高明忠<sup>2</sup>,刘见中<sup>3</sup>,周宏伟<sup>4</sup>,张瑞新<sup>5</sup>,陈佩佩<sup>6</sup>,刘志强<sup>6</sup>,张安林<sup>7</sup>

(1. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 2. 四川大学, 四川 成都 610065; 3. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 4. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 5. 华北科技学院, 河北 廊坊 065201; 6. 天地科技股份有限公司, 北京 100013; 7. 北京华宇工程有限公司, 北京 100120)

**摘要:**以煤矿地下空间科学利用为主线,以提升煤矿地下空间综合利用为目标,系统调研分析了我国煤矿地下空间容量,首次绘制了全国生产煤矿井下可利用空间分布图、距地级市50 km内煤矿可有效利用的地下空间分布图、全国煤矿有序退出井巷可利用地下空间分布图,并由此建立了煤矿地下空间的判识和估算方法,对煤矿采空区可利用地下空间进行了估算。进行了不同开发利用功能的围岩适建性研究,提出了煤矿地下空间开发利用的六大设计原则和四大设计理念,系统提出了煤矿地下空间利用的方向、技术及构想。结合京西煤矿地下空间可利用容量、关停顺序和内外建设条件提出了合理的开发利用规划目标,作为典型案例设计了京西煤矿地下空间开发利用的构想。

**关键词:**煤矿地下空间;容量估算;围岩适建性;开发利用

**中图分类号:**P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)06-1487-17

## Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines

XIE Heping<sup>1,2</sup>, GAO Mingzhong<sup>2</sup>, LIU Jianzhong<sup>3</sup>, ZHOU Hongwei<sup>4</sup>, ZHANG Ruixin<sup>5</sup>,  
CHEN Peipei<sup>6</sup>, LIU Zhiqiang<sup>6</sup>, ZHANG Anlin<sup>7</sup>

(1. Institute of Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 5. North China Institute of Science & Technology, Langfang 065201, China; 6. Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 7. Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** Focused on scientific utilization of underground space in coal mines, the capacity of underground space in China is analysed systematically for promotion of underground space utilization. The distribution diagrams of available underground space in producing coal mines, available underground space in coal mines within 50 km far from prefecture-level cities and available underground space of tunnels in closing coal mines are produced for the first time. Based on a method proposed for identification and estimation of underground space, volume of available underground space in coal mines is estimated in the paper. A condition of surround rocks is evaluated for various functions of development and utilization of underground space. Then six design principles and four design concepts are proposed for development and utilization of underground space in the paper. New orientations, technologies and conceptualization for development and utilization of underground space are also suggested in a systematic viewpoint. In addition, on the basis of volume of

收稿日期:2018-01-09 修回日期:2018-03-11 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600701);中国科学院学部咨询评议资助项目(B-DX-2017-02);中国工程院咨询研究资助项目(2016-XZ-036)

作者简介:谢和平(1956—),男,湖南双峰人,中国工程院院士。E-mail:xihep@scu.edu.cn

underground space, closing sequence of coal mines and construction conditions in Western Beijing, the idea of development and utilization of underground space of coal mines in Western Beijing is proposed as a typical case in the paper.

**Key words:** underground space of coal mines; volume estimation; condition of surrounding rocks; development and utilization

人类社会的发展,极大地消耗了地球资源,加之地面环境承载力极其有限,因此向地下要空间、向地下要资源成为人们寻求良好生存环境、探索人类可持续发展的有效途径。在生态环境需求日益提高、生态文明建设深入人心的今天,利用煤矿地下空间具有重要的现实意义及深远影响。地下空间开发利用得到越来越多的重视,被公认为是构建城市可持续发展和支撑国家核心战略的重要组成部分<sup>[1]</sup>。

我国进入了社会经济发展的新时代,传统产业转型升级去产能、去库存导致大量矿井关闭,这些矿井在过去数十年的开采中,形成了大体量的地下空间,直接简单封井将直接造成数万亿地面地下固定资产的废弃和浪费,间接地会造成宝贵的地质和矿业遗址的损坏。同时,地下水位上升会直接造成地下水系污染,威胁水源地安全。这些地下空间若不加以治理或利用,将成为重大的潜在地质隐患,而将其合理利用则可转化为重要的地下空间资源,同时能有效减少或消除地灾隐患<sup>[2]</sup>。

目前我国有资源型城市 90 多座,这些城市应主动将矿区的地面土地资源纳入城市整体功能规划,可将矿区作为近期、远期的新城区进行规划、建设,将矿区打造成高新开发区、科技创新中心等,形成新的高端产业经济带。既充分利用了矿区地面土地,又带动了矿区的高端转型升级。利用矿山得天独厚的地下空间优势,在矿区地下打造新型地下房地产业,特别是地下经济适用房、地下图书馆、地下博物馆、地下会议展览中心、地下音乐厅、地下养老院等,以及深地地热转换与空气循环系统、地下清洁能源抽水储能及水电系统、地下水库、立体地下空间的交通网络和通讯网络系统等,形成地下新型经济业态。这样既可以避免煤矿采空区被充填造成的极大地下空间浪费,也可以缓解地面城市发展面临的人口增加、土地紧缺、住房紧张等突出问题<sup>[2]</sup>。

特别是首都北京寸土寸金,京西矿区紧邻首都中心城区,具有得天独厚的地理位置和交通优势,不仅煤矿开采可追溯到辽代,承载了 800 年北京工业文明发展史,而且矿区位于燕山运动地质构造遗产核心区域、北京生态涵养区,京西矿区地下空间的开发利用无论是对北京的历史还是现今都具有重要的意义。

本文对煤矿地下空间可利用潜力进行判识,估算

当前及未来可利用煤矿地下空间容量,深入分析煤矿地下空间围岩适建性与功能分类,提出安全和谐、资源开发与空间利用协同规划的设计理念,并以京西关停矿井为例介绍了地下空间可利用容量、开发利用途径,结合矿井关停顺序和建设条件提出合理的开发利用规划目标。

## 1 煤矿地下空间开发利用趋势分析

### 1.1 煤矿地下空间开发利用现状

早在 20 世纪中期,国外就开始探索煤矿地下空间的开发利用,发展了多种再利用途径,典型案例主要集中在德国、芬兰、荷兰、美国等国家。例如德国鲁尔矿区对具备一定价值的废弃工业场地和设施进行工业遗产保护和再利用,将某些符合条件的废弃煤矿巷道建成抽水蓄能电站;芬兰原位再现煤矿开采过程,演示采矿工具使用方法,开发出矿井乐园和博物馆;荷兰建成利用关停矿井地热资源的新型地热发电站,将热水输往附近民宅、商店、图书馆和大型办公楼<sup>[2]</sup>。目前,原中央直属的 94 个煤炭企业,有 2/3 的矿井已进入衰退期,部分煤炭企业开展了多种方式的矿井转型,取得了良好的效果。2004 年国土资源部正式命名了国家矿山公园,并启动国家矿山公园的申报与建设工作。2006-01-28,国务院发布《国务院关于加强地质工作的决定》(国发[2006]4 号),强调做好矿山地质工作,进一步促进国家矿山公园的建设。在此基础上,许多关停矿井采用建立国家矿山公园的形式进行转型利用,至今已经建立了 88 座矿山公园,例如四川嘉阳煤矿国家矿山公园、山西大同晋华宫矿地下探秘景区<sup>[2]</sup>、唐山开滦国家地质公园等<sup>[3]</sup>,但总体上我国煤矿地下空间的开发利用才刚刚起步。

### 1.2 煤矿地下空间开发利用方式及功能分析

(1) 促进资源枯竭型城市的转型发展。资源枯竭型城市是指矿产资源开发进入后期、晚期或末期阶段,其累计采出储量已达到可采储量的 70% 以上的城市。煤矿地下空间的综合利用是促进资源枯竭城市转型发展的有效途径。首先,煤矿地下空间利用其自身的优势,可建成地下科学实验室、地下医学与康复中心、地下博物馆、地下景观、地下游泳池、地下工厂、地下酒店等,还可用于填埋工业垃圾、生活垃圾、矿上尾废等,甚至开发地下特色旅游等,在不丧失原

有城市功能的情况下,促进资源枯竭型城市的特色发展。其次,综合利用煤矿地下空间在地质灾害防护能力方面的优势,建立完善的地下地质灾害防灾体系,同时利用煤矿地下空间储水、调水,提高城市泄洪排涝和雨水调蓄能力,保障城市安全,提高城市抗灾抗毁能力以及防御现代战争和核战争的能力,实现资源枯竭型城市的安全发展。再次,还可综合利用煤矿地下空间将地表空间转化为生态用地,恢复湿地、森林,有效增加地表绿化面积,净化空气、降低噪音、保护水资源、改善城市面貌,净化城市生态环境,实现资源枯竭型城市向宜居城市的根本转变<sup>[4]</sup>。

(2)提高战略能源和战略物质储备能力。煤矿地下空间温度、湿度稳定,具有防空、防爆、隔热、保温、抗震、防辐射、低能耗且对地面无风险等特点,若能够有限提升近场围岩的抗渗性能,则可成为战略能源和战略物质储存的理想场所,还可进行危险品储存。此外,以太阳能、风能为代表的清洁能源发展迅速,风电、光电装机容量不断增加,但由于风能的间歇性特征使其利用严重不足,弃风问题十分严重。可考虑先将风力发电转化为压缩空气储能,将压缩空气储存在煤矿地下空间中,然后再将压缩空气转化为电能,或将风力发电转化为抽水蓄能,只要选取低渗透的近场围岩,则有望解决我国风电、光电使用中存在的问题。

(3)提升深地科学研究水平。煤矿地下空间可用于构建以科学前沿探索为目的的深地科学实验室。煤矿地下空间的恒温、恒湿、低本底辐射等特征,具有地面实验室无法比拟的优越性。以暗物质探测为标志的先导科学实验室、以多场耦合为标志的放射性废物处置实验室、以物质循环为标志的生态圈实验室、以康复医学为标志的地下医学实验室等,都可构建在煤矿地下空间中。

以地下生态圈实验室为例,地下自循环生态圈是一个相对封闭的空间,其核心在于构建一个能实现能量自平衡的相对独立生态圈。地下自循环生态系统构建与自循环原则主要指构建地下模拟阳光、生态空气、洁净水、生态植被以及地下农场的生态圈,实现阳光、空气、水的自制备、自循环。并与地下植被、景观等现代生态农业相结合,充分发挥地下空间恒温恒湿优势的同时,还可以调节微气候。利用煤矿地下空间构建的生物与环境相互协调并在一定时期内处于相对稳定的动态平衡状态中,通过工程学、生物学、医学、农学等相关领域的联合攻关,在系统探索地下自循环生态系统重要物质元素智能重生与循环、地下生态系统演替、地下自循环生态系统医学等规律的基础

上,形成和发展生态系统中多能量供给与转换、生命元素物质循环、水平衡及自净、岩石成土、地下医学与康复等理论与技术,从而提升深地科学研究水平<sup>[1]</sup>。

## 2 煤矿地下空间可利用判识研究与估算

### 2.1 煤矿可利用地下空间判识指标研究

煤矿地下空间赋存情况各异,要达到二次利用,须有一套成熟的判别方法。判识分析遵循定量界定为主、定性判断为辅的原则。首先,设定交通便利性、围岩稳定性、系统安全性、技术复杂性等四项定性指标。其次,设定经济效益和开发潜力两项定量指标,同时满足上述指标可判识为地下可利用空间。具体指标包括:

(1)区位便捷性。废弃矿井往往位于城市边缘甚至山区、荒漠地带,因资源而生,基本上都是依资源开采地而居,缺乏一般城市的开放性,经济体系处于封闭状态,城市其他社会服务功能紧紧依附于主导资源产业,缺乏自主运营的空间。自然资源作为不可再生资源,随着资源的枯竭,人口外迁,区域经济和环境会出现大幅下降。由于区位条件差,自我发展能力较弱,二次利用要更多考虑人流和交通工具的可到达性,即交通便利性。

(2)围岩稳定性。废弃矿井地下空间岩体结构一般为弹塑性地基上煤柱或矿柱支撑的上部较完整层状岩体结构,由于支撑结构的变形,可能导致结构的失稳而引起覆岩破坏和地表沉降。部分废弃矿井失稳破坏并导致覆岩沉降的主要机制为:矿柱压入底板和底臃、矿柱破坏、顶板坍塌等,不同的破坏机制将造成不同的塌陷形态<sup>[5]</sup>。

(3)系统安全性。废弃矿井再利用是一个系统工程,并且工程处于深埋地下的封闭空间,应力、温度、地下水、气体甚至其它未知因素都有可能对工程造成重大影响。

(4)技术复杂性。废弃矿井地下空间若用作常规用途,如人造景观、工业旅游等,本身不存在太大技术难度;但若用于核废料存放、二氧化碳封存、能量转化等方向,则存在较大的技术复杂性,有些还是未知的新兴领域。该技术复杂性包括机理复杂性、过程复杂性、控制复杂性甚至目标复杂性等。地下空间赋存特征千差万别,二次开发利用方向众多,针对不同的方向需要对其技术复杂性进行预判。

(5)开发潜力。开发潜力是指矿井地下空间以其自然、经济、技术、社会资源等禀赋为依托,形成的规模效应或示范效应<sup>[6]</sup>。开发潜力主要表现在规模化优势、资源优势、技术优势、产业协同优势等方面。

(6)经济效益。经济效益是衡量一切经济活动的最终的综合指标。最重要的是成本优势,成本优势能够为地下空间利用相关产业的培育和壮大提供可持续的发展动力。成本优势涉及多个方面,例如因其具有优越的地理区位、丰富的劳动力资源、发达的交通条件或者先进的技术水平等禀赋优势而获得产业发展的成本优势。除了成本优势外,还有市场需求,地下空间利用相关产业的选择需建立在能够满足当前或者未来的市场需求之上,产业发展才有可能规模化。只有兼顾成本优势和市场需求,才能取得良好的经济效益。

## 2.2 煤矿可利用地下空间容量估算研究

在煤矿可利用地下空间判识指标研究的基础上,即可对煤矿可利用地下空间进行分层次、分类别估算。

### 2.2.1 煤矿井巷可利用地下空间估算

笔者将全国生产煤矿可利用井巷地下空间量总量、“十三五”期间全国有序退出煤矿井巷地下空间量、距离地级市 50 km 以内的煤矿井巷地下空间量三类统计。根据全国典型煤矿规模与井巷可利用地下空间量(主要包括井筒、井底车场、大巷、主要硐室等)调研数据,估算出煤矿规模与其井巷可利用地下空间量的比例系数(简称煤矿规模与利用系数),详见表 1。

(1)全国生产煤矿可利用井巷地下空间总量统计。

根据国家能源局 2017 年 3 月发布的 2016 年 7 ~ 12 月全国煤矿生产能力情况相关数据,汇总出截至 2016 年底全国生产煤矿现状,详见表 2。

由表 2 可知,截至 2016 年底,全国生产煤矿数量共计 4 562 个,规模共计 345 863 万 t/a。其中 60.83% 集中在 30 万 t/a 以下,数量合计 2 775 个,规模合计 36 103 万 t/a,占全国规模总量的 40%。其中,生产煤矿数量占前 3 位的分别是:山西省 581 个,贵州省 572 个,黑龙江省 560 个,分别占全国生产煤矿总量的 12.74%, 12.54%, 12.28%。山西省生产煤矿规模合计 94 120 万 t/a 居于首位,占全国规模总量的 27.21%。居于次位的是内蒙古自治区,规模合计 78 339 万 t/a,占全国规模总量的 22.65%。居于第 3 位的是陕西省,规模合计 37 674 万 t/a,占全国规模总量的 10.89%。

根据煤矿规模与其井巷可利用地下空间量的比例系数,估算出各省现有生产煤矿井巷可利用地下空间量总计约 5.84 亿 m<sup>3</sup>,其分布情况如图 1 所示。

按小型矿井井巷平均断面 10 m<sup>3</sup>、中型矿井井巷平均断面 14 m<sup>3</sup>、大型矿井井巷平均断面 16 m<sup>3</sup>、特大

型矿井井巷平均断面 18 m<sup>3</sup> 估算,可利用井巷长度共约 40 167 km。占前三位的分别是山西省 13 444 万 m<sup>3</sup>,内蒙古自治区 11 986 万 m<sup>3</sup>,陕西省 6 359 万 m<sup>3</sup>,分别占全国生产煤矿总地下空间量的 23.01%, 20.51%, 10.88%。

表 1 全国煤矿规模与其井巷可利用的地下空间量的比例系数

Table 1 Total amount of coal mines and ratios of underground space available in tunnels

省份	煤矿规模/(万 t·a <sup>-1</sup> )				
	(0, 30]	(30, 120]	(120, 500]	(500, 1 000]	(1 000, 2 000]
北京	—	0.20	0.16	—	—
河北	0.18	0.16	0.15	—	—
山西	0.19	0.16	0.14	0.13	0.12
内蒙古	0.20	0.17	0.15	0.15	0.12
辽宁	0.16	0.14	0.10	—	—
吉林	0.17	0.13	0.11	—	—
黑龙江	0.17	0.14	0.13	—	—
江苏	0.21	0.17	0.15	—	—
安徽	0.22	0.20	0.18	—	—
福建	0.24	0.21	—	—	—
江西	0.26	0.24	—	—	—
山东	0.21	0.19	0.17	0.15	—
河南	0.28	0.26	0.25	—	—
湖北	0.26	—	—	—	—
湖南	0.22	0.12	—	—	—
广东	—	—	0.26	—	—
广西	0.26	0.25	0.25	—	—
重庆	0.25	0.30	0.27	—	—
四川	0.26	0.30	0.26	—	—
贵州	0.29	0.30	0.26	—	—
云南	0.32	0.31	0.28	0	—
陕西	0.21	0.19	0.18	0.15	0.15
甘肃	0.20	0.21	0.17	0.20	—
青海	0.13	0.08	0.06	—	—
宁夏	0.19	0.15	0.14	0.11	—
新疆	0.17	0.14	0.21	0.15	—

(2)“十三五”期间全国有序退出煤矿井巷可利用地下空间量预测。

《国务院关于煤炭行业化解过剩规模实现脱困发展的意见》(国发[2016]7号文)明确指出,全国煤炭行业改革的工作目标是,在近年来淘汰落后煤炭规模的基础上,从 2016 年开始,用 3 至 5 年的时间,再退出规模 5 亿 t 左右、减量重组 5 亿 t 左右,较大幅度压缩煤炭规模,适度减少煤矿数量。预计十三五期间全国即将有序退出煤矿数量、规模及分布,详见表 3。

表 2 截至 2016 年底全国煤矿可利用井巷地下空间量分总量

Table 2 Total amount of underground space available in coal mines by the end of 2016

省份	煤矿规模/(万 t·a <sup>-1</sup> )					省合计	占全国百分比
	(0,30]	(30,120]	(120,500]	(500,1000]	(1000,2000]		
北京	0/0/0*	1/100/20	2/320/51	0/0/0	0/0/0	3/420/71	0.07%/0.12%/0.12%
河北	16/400/71	21/1 542/246	26/6 423/963	0/0/0	0/0/0	63/8 364/1 282	1.38%/2.42%/2.19%
山西	11/330/63	289/22 090/3 535	262/52 400/7 336	19/19 300/2 510	0/0/0	581/94 120/13 442	12.74%/27.21%/23.01%
内蒙	36/1 073/214	145/9 157/1 557	164/34 630/5 194	20/33 480/5 021	0/0/0	365/78 338/11 988	8.00%/22.65%/20.52%
辽宁	21/370/60	9/569/80	16/3 806/381	0/0/0	0/0/0	46/4 746/519	1.01%/1.37%/0.89%
吉林	34/569/96	10/702/92	6/1 200/132	0/0/0	0/0/0	50/2 471/320	1.10%/0.71%/0.55%
黑龙江	511/3 750/638	24/1 676/235	25/4 869/633	0/0/0	0/0/0	560/10 295/1 505	12.28%/2.98%/2.58%
江苏	1/18/4	1/45/7	6/1 330/199	0/0/0	0/0/0	8/1 393/211	0.18%/0.40%/0.36%
安徽	0/0/0	9/621/124	36/10 081/1 814	5/4 360/0	0/0/0	50/15 062/1 939	1.10%/4.35%/3.32%
福建	88/900/215	3/132/27	0/0/0	0/0/0	0/0/0	91/1 032/244	1.99%/0.30%/0.42%
江西	233/1 225/319	5/304/73	0/0/0	0/0/0	0/0/0	238/1 529/392	5.22%/0.44%/0.67%
山东	26/823/173	51/3 500/665	38/8 074/1 373	5/3 489/524	0/0/0	120/15 886/2 733	2.63%/4.59%/4.68%
河南	144/3 039/851	60/3 907/1 015	43/9 177/2 294	0/0/0	0/0/0	247/16 125/4 162	5.41%/4.66%/7.12%
湖北	71/531/138	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	71/531/138	1.56%/0.15%/0.24%
湖南	327/2 677/589	3/165/20	0/0/0	0/0/0	0/0/0	330/2 843/608	7.23%/0.82%/1.04%
广西	18/275/71	4/300/75	1/150/38	0/0/0	0/0/0	23/724/183	0.50%/0.21%/0.31%
重庆	38/727/182	12/767/230	4/589/160	0/0/0	0/0/0	54/2 083/571	1.18%/0.60%/0.98%
四川	359/4 811/1 251	20/1 029/308	10/1 367/355	0/0/0	0/0/0	389/7 206/1 914	8.53%/2.08%/3.28%
贵州	455/8 779/2 545	100/5 224/1 567	17/3 212/835	0/0/0	0/0/0	572/17 213/4 948	12.54%/4.98%/8.47%
云南	203/2 462/788	13/780/242	4/810/227	1/1 000/0	0/0/0	221/5 052/1 256	4.84%/1.46%/2.15%
陕西	95/1 924/404	90/6 045/1 149	54/11 675/2 101	6/5 200/780	8/12 830/1 925	253/37 674/6 358	5.55%/10.89%/10.88%
甘肃	28/517/104	13/782/164	17/3 524/599	1/600/120	0/0/0	59/5 423/987	1.29%/1.57%/1.69%
青海	14/187/24	5/348/27	2/240/14	0/0/0	0/0/0	21/775/67	0.46%/0.22%/0.11%
宁夏	19/387/74	13/845/127	12/3 948/552	3/3 000/330	0/0/0	47/8 180	1.03%/2.37%/1.85%
新疆	27/332/56	50/3 407/477	23/4 640/975	0/0/0	0/0/0	100/8 380/1 508	2.19%/2.42%/2.58%
合计	2 775/36 102/8 931	951/64 036/12 063	768/162 465/26 227	60/70 429/9 285	8/12 830/1 925	4 562/345 863/58 430	100%

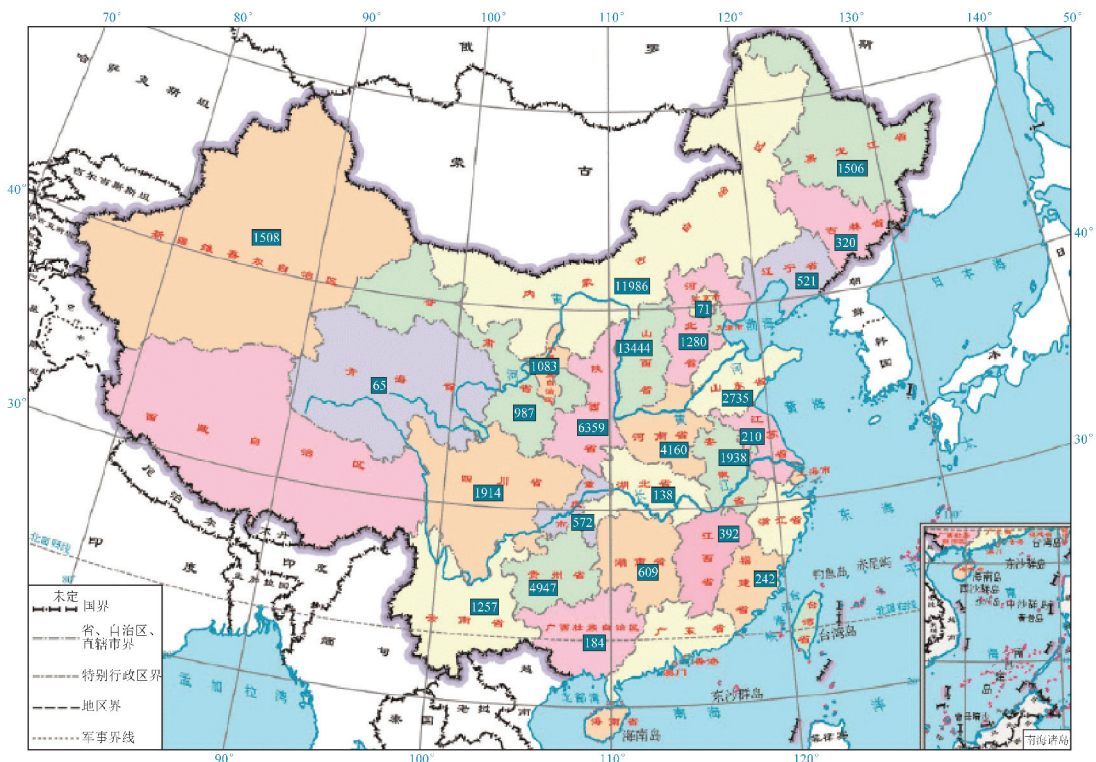
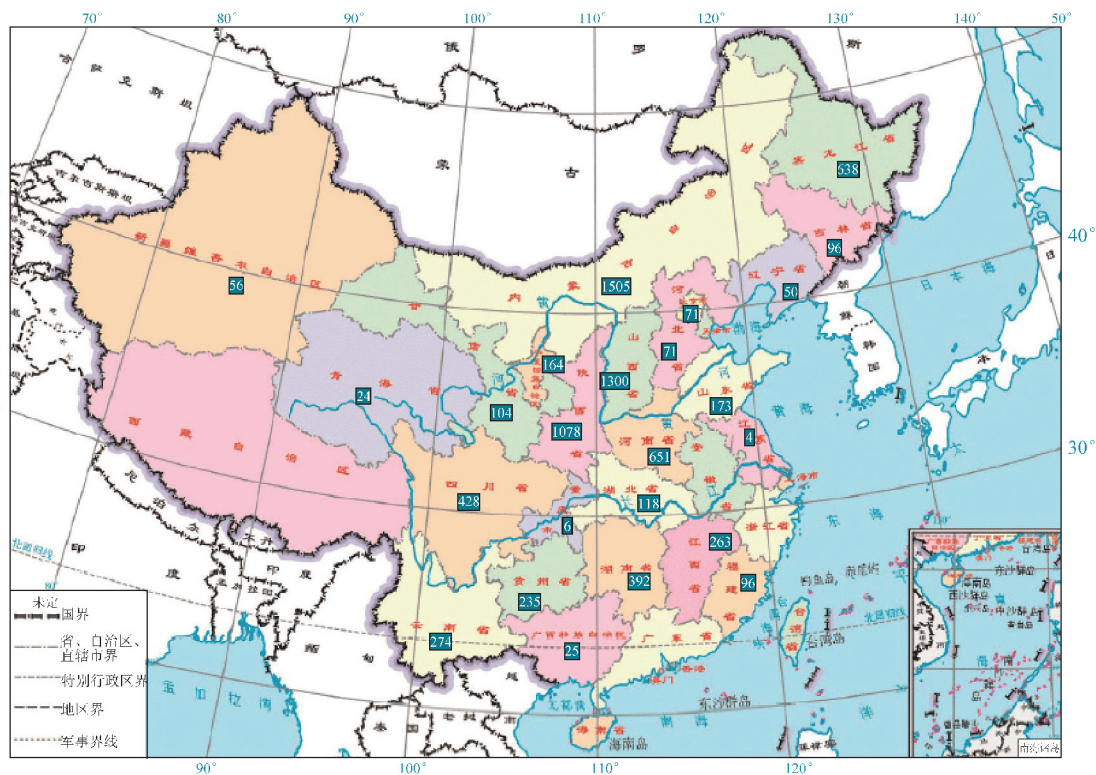
注: \*表示数量(个)/规模(万 t/a)/可利用空间(万 m<sup>3</sup>)。图 1 截至 2016 年底全国生产煤矿井下可利用地下空间分布(万 m<sup>3</sup>)Fig. 1 Distribution of underground space available in producing coal mines by the end of 2016(unit:10 000 m<sup>3</sup>)

表 3 “十三五”期间有序退出的煤矿情况

Table 3 Coal mines closed in process of the 13th five-year plan

60 万 t/a 以下或全部退出产能	山西	内蒙古	陕西	宁夏	北京	—	—	—	—	—	合计
数量/个	127	151	155	28	3	—	—	—	—	—	464
规模/(万 t·a <sup>-1</sup> )	6 840	7 523	5 229	865	420	—	—	—	—	—	20 877
地下空间/万 m <sup>3</sup>	1 300	1 505	1 098	164	71	—	—	—	—	—	4 138
30 万 t/a 以下	河北	辽宁	吉林	黑龙江	江苏	山东	河南	甘肃	青海	新疆	合计
数量/个	16	21	34	511	1	26	144	28	14	27	822
规模/(万 t·a <sup>-1</sup> )	400	370	569	3 750	18	823	3 039	517	187	332	10 004
地下空间/万 m <sup>3</sup>	71	60	96	638	4	173	851	104	24	56	2 077
9 万 t/a 以下	福建	江西	湖北	湖南	广西	重庆	四川	贵州	云南	—	合计
数量/个	61	224	66	277	10	3	177	85	116	—	1 019
规模/(万 t·a <sup>-1</sup> )	401	1 011	454	1 780	95	23	1 615	808	855	—	7 043
地下空间/万 m <sup>3</sup>	96	263	118	392	25	6	420	235	274	—	1 827

图 2 十三五期间全国煤矿有序退出井巷可利用地下空间分布(万 m<sup>3</sup>)Fig. 2 Distribution of underground space available in coal mines closed in process of the 13th five-year plan(unit:10 000 m<sup>3</sup>)

由表 3 可知,“十三五”期间,晋、蒙、陕、宁等 4 个地区,60 万 t/a 以下即将退出煤矿和北京市全部退出的煤矿数量合计 464 个,规模合计 20 877 万 t/a;冀、辽、吉、黑、苏、皖、鲁、豫、甘、青、新等 11 个地区,30 万 t/a 以下即将退出煤矿数量合计 822 个,规模合计 10 004 万 t/a;其他地区,9 万 t/a 以下即将退出煤矿数量合计 1 019 个,规模合计 7 043 万 t/a。合计,十三五期间全国煤矿有序退出将产生煤矿井巷可利用地下空间量总计约 0.8 亿 m<sup>3</sup>,其分布情况如图 2

所示,按小型矿井井巷平均断面 10 m<sup>3</sup>、中型矿井井巷平均断面 14 m<sup>3</sup>、大型矿井井巷平均断面 16 m<sup>3</sup>、特大型矿井井巷平均断面 18 m<sup>3</sup> 估算,可利用井巷长度共约 7 274 km。

(3) 距离地级市 50 km 以内的煤矿情况统计。

考虑到地下空间利用的便利,利用地理信息系统进行分析,将位于地级市 50 km 以内(直线距离)的煤矿进行统计,结果如图 3 所示。

截至 2016 年底,全国距离地级市 50 km 以内的

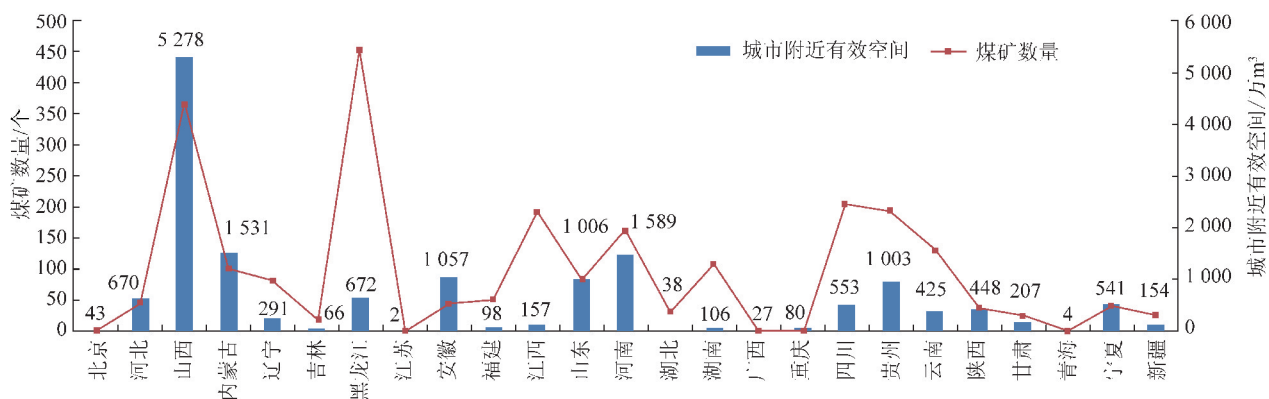


图3 距地级市中心 50 km 范围内井巷可利用空间分布柱状折线

Fig. 3 Diagram of underground space available in coal mines within 50 km far from prefecture-level cities

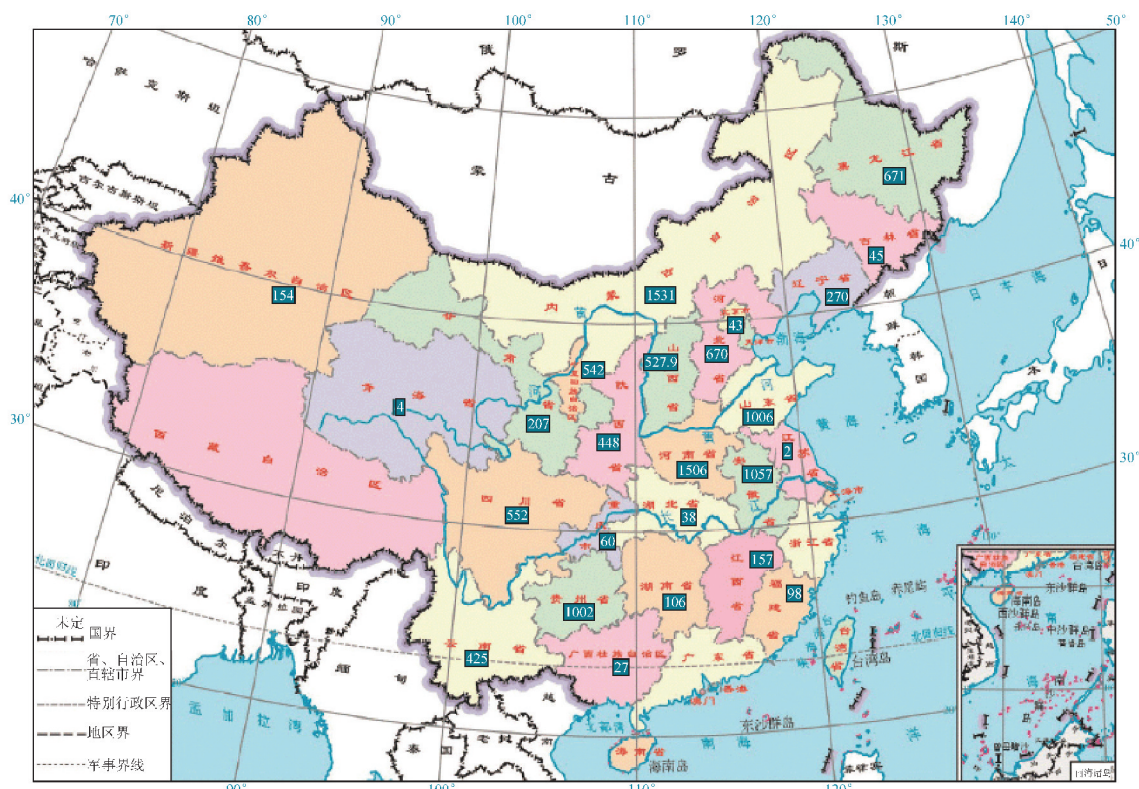


图4 距地级市 50 km 内煤矿可有效利用的地下空间分布(万 m³)

Fig. 4 Distribution of underground space available in coal mines within 50 km far from prefecture-level cities(unit:10 000 m³)

煤矿数量共计 2 469 个,规模共计 163 046 万 t/a,存在煤矿井巷可利用空间量共计 26 607 万 m³,其分布详如图 4 所示。

按煤矿关停后井巷可利用地下空间量中 60% 以上可以有效利用估算,全国距离地级市 50 km 以内的煤矿井巷可利用地下空间量 15 964 万 m³,约 1.6 亿 m³。其中,山西省范围内距离地级市 50 km 以内的煤矿数量达 370 个,产能合计 62 070 万 t/a,井巷可利用地下空间量 5 279 万 m³;内蒙古自治区距离地级市 50 km 以内的煤矿数量达 106 个,产能合计 17 578 万 t/a,井巷可利用地下空间

量 1 531 万 m³;河南省距离地级市 50 km 以内的煤矿数量达 164 个,产能合计 9 695 万 t/a,井巷可利用地下空间量 1 508 万 m³;安徽省距离地级市 50 km 以内的煤矿数量达 47 个,产能合计 13 122 万 t/a,井巷可利用地下空间量 1 057 万 m³。另外,北京市 2020 年前将退出全部煤炭产能,试点条件优良。因此,未来煤矿井巷地下空间利用的试点区域宜优先考虑上述省市。

上述估算方法主要数据来源采用国家能源局产能公告平台数据,考虑到该平台数据统计的煤矿均为具备煤矿安全生产许可证、采矿许可证等

证照齐全的生产煤矿,未包括违规建设、因资源整合、停产整顿等原因证照不全、新建、改扩建过程中的煤矿。因此,结合相关组织或研究机构发布数据,采用1.2倍的扩大系数将上述数据估算结果进行适度修正,即全国距离地级市50 km以内的煤矿井巷可利用地下空间量约1.9亿 $\text{m}^3$ ,估算井巷长度约1.5万 km。

### 2.2.2 煤矿采空区可利用地下空间估算

煤炭采出体积 $V$ 、地表下沉盆地体积 $V_1$ 、岩石卸压膨胀体积 $V_2$ 及工作面采空区地下空间 $V_3$ 存在如下关系

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1)$$

则煤矿工作面采空区地下空间 $V_3 = V - V_1 - V_2$ 。煤炭采出体积 $V$ 根据每年煤炭产量除以平均密度计算;地表下沉盆地体积 $V_1$ 可根据下沉系数 $\eta$ 计算,岩石卸压膨胀体积(未破坏) $V_2$ 可按照地下空间总量与膨胀系数 $K$ 计算。

从1949—2016年68 a间,累计生产原煤745.01亿 $\text{t}^{[7]}$ 。根据1949—2016年各区域煤炭统计产量,按照煤炭容重为 $1.35 \text{ t/m}^3$ ,计算采出煤炭体积,据此得出1949—2016年各大区煤炭产量及采出煤炭体积(井工开采量占92%计算)详见表4。

表4 按距离分类的煤矿地下空间体积统计

Table 4 Volumes of underground space subjected to distance from cities

产煤区	1949—2016年煤炭采出体积/亿 $\text{m}^3$	下沉系数	1949—2016年煤炭开采形成地下空间体积/亿 $\text{m}^3$	分类	占比/%	地下空间距离分类体积/亿 $\text{m}^3$
晋陕蒙宁甘	261.03	0.70	71.19	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	16	11.39
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	85	60.51
华东	109.32	0.74	25.84	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	20	5.17
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	80	20.67
东北	38.93	0.73	9.56	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	24	2.29
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	76	7.26
华南	77.56	0.63	26.09	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	25	6.52
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	75	19.57
新青	20.86	0.70	5.69	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	16	0.91
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	84	4.78
总计	507.70	—	138.36	城市周边( $\leq 50 \text{ km}$ )	—	26.28
				偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )	—	112.79

由表4可知,井工煤矿1949—2016年形成的采空区地下空间共计138.36亿 $\text{m}^3$ ,其中晋、陕、蒙、宁、甘区域最多,为71.19亿 $\text{m}^3$ ;按位于城市距离计算时,位于城镇周边( $\leq 50 \text{ km}$ )以及偏远地区( $> 50 \text{ km}$ )的采空区地下空间分别为26.28以及112.79亿 $\text{m}^3$ 。

从2017年到2030年按照每年煤炭产量平均34亿 $\text{t}$ 预计,则14 a合计采煤476亿 $\text{t}$ ,按照煤炭容重为 $1.35 \text{ t/m}^3$ ,计算采出煤炭体积352.59亿 $\text{m}^3$ ,预计还要形成采空区地下空间约96.16亿 $\text{m}^3$ 。则合计到2030年我国将形成煤矿采空区地下空间约234.52亿 $\text{m}^3$ ,煤矿井下采空区利用前景广阔。

通过以上分析,可估算出煤矿地下空间体积:

(1)根据煤矿规模与中利用系数,估算“十三五”期间全国煤矿有序退出将产生煤矿井巷可利用地下空间量总计约0.8亿 $\text{m}^3$ ;估算出各省现有生产煤矿井巷可利用地下空间量总计约5.84亿 $\text{m}^3$ ,其中距离地级市50 km以内的煤矿井巷可利用地下空间量约1.9亿 $\text{m}^3$ 。

(2)根据建国以来采出的煤炭总量,估算截止到

2016年底煤矿采空区地下空间约为138.36亿 $\text{m}^3$ ;按照2030年每年平均开采34亿 $\text{t}$ 计算,估算截止到2030年煤矿采空区地下空间约为234.52亿 $\text{m}^3$ 。合计煤矿地下空间体积约241.11亿 $\text{m}^3$ 。如果折算成断面 $5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的巷道,截止2016年底煤矿地下空间的长度约为88万 km,可绕赤道22圈;预计到2030年煤矿地下空间约258.62亿 $\text{m}^3$ ,约长160万 km,可绕赤道40圈。

## 3 煤矿地下空间开发利用适建性研究

### 3.1 地下空间岩石特性及功能分类

煤矿地下空间的综合利用必须考虑围岩岩性的影响,其是否适合开发利用即适建性与岩性密切相关。地下空间功能不同,对岩性的需求也有所不同。目前,国内外对废弃矿井地下空间的功能开发主要为以下几大类:地下实验室、能源储库、地下医学与康复、地下旅游、地下博物馆、地下景观、地下农业以及地热利用等(表5)<sup>[8-24]</sup>。

表 5 煤矿地下空间岩石特性分析及功能分类

Table 5 Rock characteristics and function classification of underground space in coal mines

空间综合利用功能	适建性要求	案例
地下实验室	围岩强度高、无断层节理、低本底等	美国明尼苏达州苏丹地下实验室
能源储库,包括压缩空气储能	围岩致密、低孔隙率、低渗透率	美国 1963 年利用科罗拉多州一废弃煤矿建成了世界首座废弃矿井地下储气库,储存能力 1.4 亿 $m^3$ ;比利时 SA 燃气供应公司 1975 年和 1982 年分别在 Anderlues 和 Peronnes 先后建成了两座废弃煤矿天然气地下储存库并投入使用,储存能力分别为 1.8 亿 $m^3$ 和 1.2 亿 $m^3$
地下旅游	围岩稳定	开滦国家矿山公园,利用废旧煤矿建立集体验、展示、休闲三大功能于一体的“井下探秘游”地下景观游览区
地下博物馆	围岩稳定	德国鲁尔区关停煤矿,以矿工用品、采矿器械、矿井生产系统为展览主题的矿业博物馆;芬兰奥陶克恩普废弃煤矿,建立了地下矿井博物馆和地下儿童乐园,实地表演采矿作业,展示采矿器具
地热利用	埋藏较深、含水层	德国劳西茨县从废弃煤矿邻近地区的河流里抽水注入废矿坑,把废矿区变成一个总面积约 70 $km^2$ 的湖泊群,并开发成以生态和工业文化为主题的旅游景点;荷兰林堡省海尔伦建成利用废弃煤矿地热资源的新型地热发电站,从地下 800 m 处泵出热水产生蒸汽,推动涡轮机转动发电,并将热水输往附近 300 多处民宅、商店、图书馆和大型办公楼以调解室温,待水冷却后再输回矿井深处以循环加热
地下养殖	围岩稳定、恒温恒湿	我国京煤集团在废弃的煤矿巷道内养殖蘑菇,利用旧有的矿车和铁轨运输蘑菇生长所需物料,采摘的蘑菇也利用旧轨运出

### 3.2 人与地下空间相互作用关系分析

煤矿地下空间综合利用中,人与地下空间围岩相互作用过程最应受到关注<sup>[25]</sup>。总体而言,地下空间的一些特殊环境对人体是有利的,例如:低噪声、恒温恒湿、热稳定性以及环境参数可调等。人类利用洞穴/地下空间从事有益于人类的活动由来已久<sup>[26-29]</sup>。井下环境温度适宜、空气质量优良、部分矿井甚至含有有益于人体的物质,因此我们可以对一些矿井进行甄别,并加以利用。煤矿多位于北方,而北方又是呼吸系统疾病及过敏性疾病高发区域,充分利用矿井的有益因素,可以在安全、交通便捷的区域开展疗养院。从患者的角度来看,可以为患者治疗疾病提供便捷,也为家庭和社会节省大量的开支;从矿产企业的角度来看,还有助于推动煤矿产业转型、变废为宝、分流并安置职工等功能,具有多重的经济和社会效益。

## 4 煤矿地下空间开发利用设计原则和设计理念

煤矿地下空间形态各异,所处的地理环境、人文环境差异很大,其开发利用应因地制宜,充分考虑地面资源与地下空间的协同利用、工业遗产保护与空间创新利用协调发展、地下空间同步构建自循环生态圈、地下空间系统化立体开发、地下空间可持续发展等开发利用原则,实现经济、文化、环境等共同协调发展;其设计应提前谋划、未雨绸缪,体现本质安全、以人为本、可扩展、可持续、资源开发与空间利用协同规划、差异化超前设计理念,确保煤矿地下空间充分、合

理、安全利用。

### 4.1 煤矿地下空间开发利用的设计原则

综合作者提出的关停矿井地下空间开发利用的原则<sup>[2]</sup>以及一般地下空间开发利用原则<sup>[1]</sup>,本文提出煤矿地下空间开发利用的六大原则,即:① 地下空间与地面资源协同开发利用原则。对煤矿地面资源、地下空间进行整体规划、科学利用,既可以避免煤矿采空区被充填造成的极大地下空间浪费,也可以缓解地面城市发展面临的人口增加、土地紧缺、住房紧张等突出问题;② 工业遗产保护、创新利用与开发原则。在进行煤矿地下空间规划设计时,应首先考虑其潜在的使用价值,不能盲目拆除和重建,在保持原有结构、设施基础上进行相应功能的开发利用,实现遗产保护和创新利用的社会经济效益最大化;③ 同步构建自循环生态圈的原则。生态功能是地下城市中重要的组成部分,也是提升城市生活质量重要一环,构建以空气、阳光、洁净水、生态植被组成的生态圈是人类地下生存、休闲的先决条件;④ 煤矿地下空间系统化立体开发原则。将地下空间纵向布局和横向设计进行统筹规划、立体布局,集成物料运输、能源供应、污水处理、垃圾清除、地下管廊等功能建设,实现综合性、高效性、科学化开发利用;⑤ 煤矿地下空间服务于国家战略安全原则。兼顾民生工程的生活需求与临战临灾的特殊需要,在进行地下旅游观光、休闲、探险、教育、体验采矿和农产品种植等生活休养以及医疗疗养开发的同时,构建必要的储油库、储冷库、储热库等能源储库,既解决平时地下、地面城市日常

生活物源的补充供应问题,又为战时、灾时做准备;⑥远期与近期呼应,可持续发展的原则。煤矿地下空间作为一种不可逆的自然资源,一旦开发,便不可复原,因此开发时既要有近期规划,更要有远期考虑,贯彻全链条、全领域、全寿命周期的绿色化、信息化、智能化发展,最终实现可持续性发展。

#### 4.2 煤矿地下空间开发利用的设计理念

煤矿地下空间开发利用工程设计,分为狭义设计和广义设计,狭义设计是针对已经形成的地下空间进行的开发利用设计,广义的设计则还包括空间形成之前对地下采掘活动的设计和对预形成的空间进行的规划设计,确保矿产资源和空间资源双回收利用。煤矿地下空间开发利用工程在设计中要始终贯彻安全和谐、弹性化协调设计的理念。

##### 4.2.1 本质安全设计的理念

安全是煤矿地下空间开发利用的前提和基础,既包括空间的外部安全,也包括空间的内部安全,外部安全是保障,内部安全是基础。

(1)煤矿地下空间的设计利用要因地制宜,制定精准利用方向的设计理念。煤矿地下空间的形成是由资源的开采形成,不同资源由于其形成和赋存的时期不同而依存于不同的水文地质、工程地质和环境地质,从而开采资源形成的空间形态也有所区别。因此,应根据空间的具体特征设计制定精准的利用方向,否则不仅造成空间的浪费,重要的是会对空间的安全使用造成威胁。确定精准的利用方向是空间利用安全设计的首要考量。

(2)满足地下空间时空长久性使用的的设计理念。煤矿地下空间的利用是立体式全方位,具有不可逆的特征,因此在设计上要求其服务时间和空间应能够满足空间利用领域内长时间安全使用,在安全保障上需要能够满足空间使用的年限和广度要求,空间利用的各个系统设计应能够保障安全,这是空间利用安全设计的核心要素。

(3)重视超大空间的结构安全设计理念。煤矿地下空间的利用一般要求可利用的空间超大,或者具有区域密闭性和局部耐极端环境条件,但地下空间的环境物质的隐蔽性和复杂性均远大于地面,不良环境现象极多。因此,要以空间的结构安全稳定设计为重,加强空间的互相渗透与层次设计,这是煤矿地下空间安全设计的重点。

##### 4.2.2 以人为本的和谐、文明设计理念

(1)煤矿地下空间领域内跨学科合作的设计理念。煤矿地下空间的设计首先是以人为本的设计,应能够满足多领域人的需求和不同领域各不相同的安

全等级和空间要求。因此,地下空间的设计一定是需要多学科、跨专业甚至跨界的融合设计。

(2)以人为本满足煤矿地下空间生存的生理和心理环境需求理念。未来煤矿地下空间的利用方向将更多的是满足人们对安全生活和便利舒适生活的需求。因此,应贯穿以人为本的设计理念,使煤矿地下空间与人和谐共处,满足人类对生理环境与心理环境的需求,创新地下空间文明和谐设计理念,重构地下人类生存秩序。

##### 4.2.3 弹性化设计理念

(1)煤矿地下空间功能立体化多用途,设施关联化设计理念。煤矿地下空间不仅能够满足正常使用,还要合理接受使用过程中有变化的外部环境影响(作用)、使用形态上的改变,能适宜地修改功能及所要求的性能,实现功能的深度互联和互通运营,保证空间资源的永续利用。

(2)可扩展可延续设计理念。煤矿地下空间开发利用应增强全周期多维动态可视设计,使设计范围内的设计信息、地理信息、时间信息透彻感知,全景式剖析,全面掌握空间情况。这可确保监测跟踪长久化、智能化,并高清互联,由此延伸设计边界,使地下空间的设计有理论、有技术、有装备,实现智能设计和灾害防控的一体化。

(3)煤矿地下空间自循环系统最大化理念。煤矿地下空间利用是一个复杂的系统工程,是一个全新的尝试。随着煤矿地下空间利用的扩大化,煤矿地下空间的自维持生态循环将进一步扩大活动范围,也会随着人居要求,进一步将地下空间作为人居空间,深度扩展空间利用方向。因此,煤矿地下空间的设计要能够使人居生存生态圈的外部循环和内部自循环互通互联,自动切换,这是未来煤矿地下空间开发利用设计的方向。

##### 4.2.4 资源开发与煤矿地下空间利用协同设计的理念

(1)煤矿地下空间的保护性设计理念。煤矿地下空间的形成是伴随着区域发展而产生的,是地方发展文明的见证,是真实的历史文化遗存。因此,设计要能够确保对现有空间的保护,以代价小的设计满足空间的利用,创新应用小微集约型装备,在空间利用中的结构、功能、环境设计上实现保护性设计。

(2)资源开发中后期与煤矿地下空间利用初期协调设计理念。地下资源的开发一般在数十年至上百年,一般分阶段分水平进行,初期完成后利用空间已经形成,在后期的接续工程设计中就应及时考虑对形成的地下空间再利用,使两者充分结合。空间可利用的设施设计既要满足生产需要,又要为后期空间再

利用留有余地,在空间、结构的设计上统筹兼顾,做到前期运营与后期利用相协调统一。

(3)差异化超前设计理念。人类对能源的需求伴随着地下空间的产生,对空间的利用是被动的,要改变这种被动局面就要提前做好整体规划,开展全局差异化设计,转换用空间浪费交换能源的思维,采用新技术新设备,创新设计理论与技术,设计初期就要为后期利用工程预留建设空间,实现空间的被动利用变为主动利用。

## 5 煤矿地下空间开发利用的方向、技术及构想

笔者已经提出了地下生态城市、地下生态景观、地下疗养院、地下农业发展、地下井筒式停车库、井下抽水蓄能发电以及深地科学探索等方面的前沿开发利用构想与关键技术<sup>[1-4]</sup>,系统提出了深地医学研究的战略构想及研究进展<sup>[30]</sup>。本文进一步提出地下矿产资源再利用、地热资源开发利用、地下太空科学模拟探索、地下空间心理学科学探索等方面构想,为煤矿地下空间开发利用提出了未来发展构想。

### 5.1 矿产资源再利用探索构想

目前,地下矿产资源开采主要以地下开采为主,且多数矿井以一种或几种矿物为主采资源。主要可采资源的安全和经济开采结束后,矿井达到闭坑状态。但是,这些矿井还有一些在现有技术条件下不能实现安全或经济开采的资源,包括遗留主采资源(如煤炭薄煤层、煤柱等)、不可采资源或者伴生的稀缺微量元素等。通过新技术的研发可以实现这些遗留资源的有效开发,例如,利用煤炭流态化开采技术高效安全地开采薄煤层<sup>[31]</sup>。利用地球深部某些特殊类型的微生物,经过基因改造通过钻孔将其送达矿体中,经过漫长时间,微生物逐渐将矿物转化<sup>[32]</sup>,最终将这些转化的矿物提升到地面,实现矿物的生物开采。

### 5.2 地热资源利用探索构想

利用相较于地面以上大气环境的昼夜温差和季节温差,煤矿地下空间围岩体是具有大规模跨时域、跨季节性长期储存能力的天然蓄能体,为地下蓄能应用提供了有效途径和媒介,也为巨大的余热资源(发电、石化、冶炼等)、太阳能等可再生能源和自然冷源的跨时域再利用开辟了发展空间<sup>[33]</sup>。事实上,地源热泵在运行供冷或供热工况的同时,也伴随着热量或冷量交替的地下存储,间接地完成着热量和冷量的跨季节性地下存储,实现能源的循环再利用,使地下岩土不仅作为能量的源,更成为热量或冷量的存储库<sup>[34]</sup>。复杂的地下换热结构体热扩散和热传输的有

序控制将决定能量利用的有效性和合理性,解决目前面对大型地能利用系统高效利用束手无策的问题,充分发挥主动性,发挥出能量存储—传输—控制的巨大潜力和优势。

例如,加拿大萨塞克斯市计划于2020年启动的利用废弃矿井水开发地热能项目,将带动一些新生行业并产生可观的经济效益,使城镇重新焕发生机<sup>[35]</sup>。加拿大利用废弃矿井水开发地热资源的经验对我国具有一定的借鉴价值。

### 5.3 太空科学模拟探索构想

地球以外的宇宙空间探索是人类历史上最为复杂的系统工程,影响着整个现代科学技术领域的发展,对现代科学技术的各个领域提出了新的要求<sup>[36]</sup>。星体环境模拟是进行外太空科学探索的基础工作。煤矿地下空间具有深埋地下、无自然光、近于封闭的环境特点,经过改造后的煤矿地下空间可以进行太空科学模拟试验以及构造星体环境相似模拟试验。例如,金星是地球的姊妹星,从结构上看,和地球有不少相似之处。但是金星表面温度很高,无液态水,大气压力极高,且大气中二氧化碳占97%以上、严重缺氧,自然条件极其残酷。因此,符合条件的煤矿地下空间经改造后可以作为行星环境模拟场所。

探索外太空人居可能性已经势在必行,符合人类生命保障的人工闭合生态系统的研究迫在眉睫。北京航空航天大学建立了36 m<sup>2</sup>空间的“月宫一号”,进行了为期105 d的科学试验获得成功,开拓了我国人造封闭生态系统构建技术的先河<sup>[37]</sup>。不难发现,采用目前国内外相关技术建立的生态系统,仍然不具备自循环自我修复功能,达不到物质流和信息流的完全循环,并且能量流得不到充分利用。

我国有数量、规模庞大的关停、废弃矿井等煤矿地下空间资源,急需综合升级利用,同时可利用这些得天独厚的空间资源进行地下重构封闭生态圈的研究,研究成果将为未来人类拓展地球或外星球地下宜居生存环境打下理论和实践基础。

### 5.4 煤矿地下空间心理学科学探索构想

相比于一般地上空间,煤矿地下空间往往位于地表以下数百米乃至数千米,并为岩石所包围,封闭性较强。在实践中发现,人处在相对特殊的地下空间环境中可能会产生心理问题<sup>[38]</sup>。因此,探索煤矿地下空间环境对人的行为心理健康及职业安全的影响,对煤矿地下空间综合利用战略构想具有重要意义。煤矿地下空间环境特性对人的行为心理与职业安全影响,可从其光环境、声环境、热环境、空气环境、心理环境等方面进行科学探索。

## 6 京西煤矿地下空间开发利用典型案例构想

北京京煤集团有限责任公司响应国家有关产能过剩退出政策,京西矿区现有的生产煤矿将相继在2020年前关闭退出。京西矿区位于北京西山生态涵养区内<sup>[39]</sup>,紧邻首都中心城区,具有得天独厚的地理位置和交通优势。科学开发利用京西关停矿井资源,保持生态、人文和谐发展,对于推动京西矿区转型升级发展和关停矿井开发利用示范工程具有重要意义。

### 6.1 京西煤矿现状及可利用空间分析

京西矿区尚有木城涧煤矿(含千军台井)、大安山煤矿和大台煤矿3对矿井在生产,按北京市煤炭产能退出计划,三座煤矿将分别于2018年、2019年和2020年退出煤炭生产。届时京西矿区可利用巷道长度约70 000 m,可利用地下空间71万m<sup>3</sup>、地下巷道工程原产值高达944亿元,可利用地面面积77.4万m<sup>2</sup>(表6)。

表6 京西关停煤矿地面地下空间统计

Table 6 Ground and underground space of closed coal mines in Western Beijing

煤矿名称	退出年份	井下水平数	可利用地下空间/ 万m <sup>3</sup>	地面工业广场面积/ 万m <sup>2</sup>
木城涧煤矿	木城涧井	2018	3	10.3
	千军台井	2016	3	9.9
大安山煤矿		2019	11	19.2
大台煤矿		2020	6	38

### 6.2 京西煤矿地下空间综合利用途径

(1)京西矿区地下井筒式停车库。利用大台煤矿立井修建井筒式地下停车库,在节约土地资源的同时使得地下空间利用最大化。建成的井筒式地下停车库在承担城市静态交通设施功能的同时,还将有效地衔接地面交通与地下悬挂式胶囊型轨道交通。

(2)京西矿区地下生态圈试验区。依托京西矿区地下得天独厚的空间资源,模拟最具有活力的地表生态圈的各种因素。在京西矿区地下环境仿造地球生态圈,将地下矿井资源变废为宝,打造地下健康稳定的生态及宜居环境,为未来扩展地球、外星球移居、地球地下生态城市的构建奠定基础。

(3)京西矿区地下农业种植区。构建京西矿区陆生(农业)生态系统,创新煤矿地下空间农业试验示范生产技术体系,为地下城市人居提供食物及生态要素。

(4)京西矿区地下医学关键技术探索区。京西矿区地下医学实验室可以开展细胞及动物实验,研究细胞及一些常见病、多发病的动物模型在地下环境的生长发育规律,为充分开发利用地下空间提供健康保障与理论支持,同时,建立我国第一个地下气道疗养研究所,对过敏性气道疾病、慢性气管支气管炎等呼吸系统疾病的治疗进行临床观察治疗及机制相关的基础研究。

(5)京西矿区深部基础理论科学探索区。在京西矿区开展前瞻性深部科学探索,为人类走向深部、更好的开发利用地下空间奠定理论基础;探索建立深地数据中心,充分利用地下蓄水和蓄热的环境,将数据中心运行过程中产生的大量热量利用起来,在保障数据中心稳定运行的同时降低净能耗,而且可以提高数据中心的安全性和隐秘性。

(6)战略能源/资源储备试验区。利用京西关停矿井的岩石巷道,探讨煤矿岩巷中储备战略能源/资源的基础科学问题和关键技术难题,建成关停矿山战略能源/资源储备库,不仅可实现即将关停的京西煤矿资源利用,而且可为我国战略能源/资源储备探索一条新的途径。

### 6.3 京西煤矿地面地下一体化空间开发利用方案

#### 6.3.1 京西关停矿井开发利用总体目标

通过京西关停矿井的地面地下资源和空间一体化开发利用,利用国家重大科技项目、安全生产预防及应急专项等资金,建设国家灾害预控与应急处置技术研发实训基地、地下矿山博物馆、地下城市,开展包括地下生态圈试验区、地下农业种植区、地下医学关键技术探索区、深部基础理论科学探索区和战略能源/资源储备试验区、深部固体矿产资源流态化开采、地下生态圈、地下水库等建设研究工作,进一步盘活紧邻首都的京西矿区闲置浪费的宝贵资源和井上下空间,从而创建一个集教学科研、工程实验、实训演练、地下存储、旅游度假、疗养娱乐等为一体的高科技研发基地和新型地下城市生态示范区,为广大煤矿关闭转型升级提供新的可持续发展模式,同时为安全与应急管理人才培养、灾害防治、减灾救灾技术装备研发与实训演练提供可靠的基地,为国家深地科学探测和资源开发提供实验研究示范区。

#### 6.3.2 京西关停矿井开发利用技术路线

结合煤矿关停顺序以及井下空间利用的难易性、维护成本,初步确定京西矿区的开发利用总体思路是:从千军台井启动,以木城涧煤矿工业广场为中心,向大安山煤矿和大台煤矿即东西二翼拓展,先浅层后深部,先易后难,依托关停煤矿的地面地下资源,先以

科研基地、矿业博物馆、科普基地等直接或改扩建利用为主,后延伸扩展到地下生态圈构建实验研究,地下城市及公共功能示范工程,最后服务于社会民众参与式的集合教育休闲旅游等综合性科研、教育、文化、旅游基地。

前期直接利用已关停的千军台井部分地面设施和部分地下巷道建立国家灾害预控与应急处置技术研发实训基地,以此为核心,建设安全与应急实训演

练基地、地矿类大学生实习实训基地;随着其他矿井的退出,同步推动以安全与应急科技研发为支撑,文旅休闲为特色的绿色、安全、生态基地。随后建设国家地质公园、矿业遗址主题公园、安全与应急生产科普和宣教基地、深地科学研究重大专项实验研究与工程示范基地。最后,建成全国关停矿山转型升级示范区。京西煤矿地下空间利用与转型升级实践技术路线如图 5 所示。

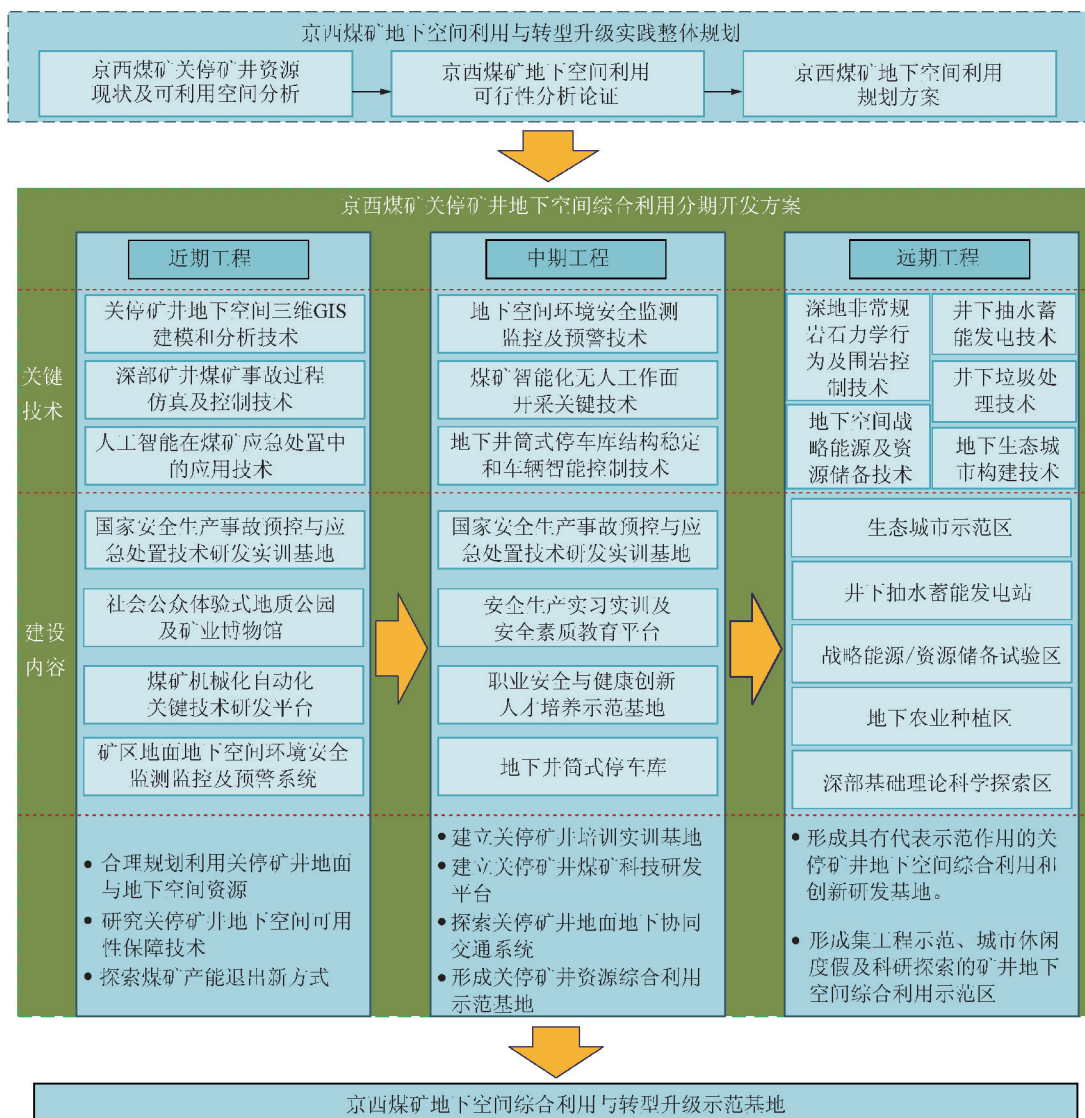


图 5 京西煤矿地下空间利用与转型升级实践技术路线

Fig. 5 Technical route of underground space utilization and transformation of coal mines in Western Beijing

### 6.3.3 国家灾害预控与应急处置技术研发实训基地建设方案

按照京西关停矿井开发利用总体规划,利用已关停的千军台井部分地面设施和部分地下巷道建立研发基地,以此为核心,建设矿井水、火、瓦斯、顶板、采煤等事故灾难,地面建筑火灾,城市轨道交通等安全与应急技术装备研发、灾害救援演练、防灾减灾救灾

相关专业师生实验实践科研实训基地,同时在井下预留一定空间为后续工程留有空间。

近期工程主要利用千军台井地面土地 10 万 m<sup>2</sup>、建构筑物 3 万 m<sup>2</sup>,改造形成 200 名科研人员和 300 名学生实训的综合科研、后勤保障能力。千军台井地面建构筑物现状如图 6 所示。改造后整体效果及各建构筑物编号如图 7 所示、功能见表 7。千军台井井下



向地下要空间成为我国城市可持续发展的必然选择。当前煤炭资源开采持续发展而形成的闲置地下空间在进一步增多和加大,并呈快速增长态势,如何有效利用不断产生的大量煤矿地下空间并实现资源枯竭型城市转型升级是目前亟待解决的问题。

本文在广泛调研我国煤矿地下空间容量基础上,首次形成了煤矿地下空间的判识和估算方法,进行了不同开发利用功能的围岩适建性研究,系统地提出了煤矿地下空间综合利用的六大设计原则和四大设计理念,并进一步提出了煤矿地下空间开发利用的科学构想。

通过本文研究,可得到如下结论:

(1)根据建国以来采出的煤炭总量,估算截止到2016年煤矿采空区地下空间约为138.36亿 $m^3$ ;估算截止到2030年煤矿采空区地下空间约为234.52亿 $m^3$ 。合计煤矿地下空间体积约241.11亿 $m^3$ 。折算成断面5m $\times$ 3m的巷道,截止2016年,煤矿地下空间的长度约为88万km,可绕赤道22圈;预计到2030年煤矿地下空间约258.62亿 $m^3$ ,约长160万km,可绕赤道40圈。

(2)在已提出的地下生态城市、地下生态景观、地下疗养院、地下农业发展、地下井筒式停车库、井下抽水蓄能发电以及深地科学探索等前沿构想基础上,进一步提出煤矿地下空间矿产资源再利用、地热资源开发利用、地下太空科学模拟探索、地下空间心理学探索等四个方面的科学构想,更加完善了煤矿地下空间开发利用方式。

(3)估算得出至2020年京西矿井可利用地下空间容量为71万 $m^3$ 、可利用地面面积77.4万 $m^2$ ,结合矿井关停顺序和建设条件提出了京西煤矿地面地下一体化空间开发利用总体目标、技术路线以及建设方案,为我国煤矿地下空间开发利用提供了典型示范。

**致谢** 本文撰写过程中任世华、鞠杨、赵路正、赵家巍、李玉谨、阚兴、朱建波、崔永国、李学彬、赵玉栋、范志忠、姜明、崔锋等参与讨论并提出建设性意见,中国煤炭学会、中国煤炭工业协会、中国矿业大学(北京)等单位的许多专家也为成果的形成作出了重要贡献,在此一并表示感谢。

## 参考文献 (References):

[1] 谢和平,高明忠,张茹,等. 地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(6):1301-1313.

XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. The subversive idea and its key technical prospect on underground ecological city

and ecosystem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(6):1301-1313.

[2] 谢和平,高明忠,高峰,等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报,2017,42(6):1355-1365.

XIE Heping, GAO Mingzhong, GAO Mingzhong, et al. Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shutdown coal mines[J]. Journal of China Coal Sciences, 2017,42(6):1355-1365.

[3] 杜青松,武法东,张志光. 煤矿类矿山公园地质灾害防治与地质环境保护对策探讨——以唐山开滦为例[J]. 资源与产业,2011,13(4):127-132.

DU Qingsong, WU Fadong, ZHANG Zhiguang. A case study on kai-luan coal mine: Approaches to geological disasters and protection of geological environment in coal mine parks[J]. Resources and Industries,2011,13(4):127-132.

[4] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术,2017,49(1):1-8.

XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(1):1-8.

[5] 郭广礼,席京德,邓喀中. 柱式开采老采空区覆岩稳定性分析[J]. 矿山测量,2001(S1):118-121.

GUO Guangli, XI Jingde, ZHENG Kazhong. Analysis on the stability of overlying rock in the old mining area of column mining [J]. Mine Surveying,2001(S1):118-121.

[6] 巩明强. 城市地下空间开发影响因素研究[D]. 天津:天津大学,2007.

[7] 王广德. 中国煤炭工业统计资料汇编(1949-2009)[M]. 北京:煤炭工业出版社,2011.

[8] 毕忠伟,丁德馨,张新华,等. 地下采空区合理利用综述[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(7):1080-1083.

BI Zhongwei, DING Dexin, ZHANG Xinhua, et al. A review of the utilization of mined area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2005,1(7):1080-1083.

[9] 段宗银. 采空区处理的探讨和实践[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2001,17(2):3-4.

DUAN Zongyin. Exploration investigation and practice of abandoned well treatment[J]. Journal of Kunming Metallurgy College,2001,17(2):3-4.

[10] 奥塞拉E,杨培章. 从矿山开采到地下空间利用[J]. 国外金属矿山,1994(7):27-30.

AOSAILA E, YANG Peizhang. From mining to underground use of space[J]. Foreign Metal Mine,1994(7):27-30.

[11] 梅尔尼科夫 H H,曹玉宏. 地下采空区其开发的效益和问题[J]. 国外金属矿山,1999(2):24-28.

MEIERNIKEFU H H, CAO Yuhong. The Benefits and problems of development of underground Mining goaf [J]. Foreign Metal Mine,1999(2):24-28.

[12] 冉丽娜,郭凯,王立献,等. 全球地下储气库发展现状及未来发展趋势[A]. 首届地下储库科技创新与智能发展国际会议[C]. 廊坊,2016.

LAN Lina, GUO Kai, WANG Li, et al. Development status and future trend of global underground gas storage[A]. The First Interna-

- tional Conference on Scientific and Technological Innovation and Intelligent Development of Underground Storage [ C ]. Langfang, 2016.
- [ 13 ] 李俊平,冯长根,曾庆轩.采空场应用综述[ J ].金属矿山,2002,316(10):4-6.  
LI Junping, FENG Changgen, ZENG Qingxuan. Summary of the application of mining goaf [ J ]. Metal Mine Mountain, 2002, 316 ( 10 ): 4-6.
- [ 14 ] 张立俊.衰老矿井地下设施资源开发利用研究[ J ].山东煤炭科技,2011(5):146-147.  
ZHANG Lijun. Research on the exploitation and utilization of underground facilities in senescent mines [ J ]. Shandong Coal Technology, 2011 ( 5 ): 146-147.
- [ 15 ] 郑敏,赵军伟.废弃矿坑综合利用新途径[ J ].矿产保护与利用,2003(3):49-53.  
ZHENG Min, ZHAO Junwei. A new comprehensive utilization way of abolished mining pits [ J ]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2003 ( 3 ): 49-53.
- [ 16 ] 苏欣,张琳,李岳.国内外地下储气库现状及发展趋势[ J ].天然气与石油,2007,25(4):1-4.  
SU Xin, ZHANG Lin, LI Yue. Current situation and development trend of underground gas storage at home and abroad [ J ]. Natural Gas and Oil, 2007, 25 ( 4 ): 1-4.
- [ 17 ] 侯万荣.略论矿业遗迹的开发和矿山公园的建设[ J ].中国国土资源经济,2005,18(10):37-38.  
HOU Wanrong. Discussion on the development of mining remains and the construction of mine park [ J ]. Natural Resources Economy of China, 2005, 18 ( 10 ): 37-38.
- [ 18 ] BODEUX S, PUJADES E, ORBAN P, et al. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach [ J ]. Engineering Geology, 2017, 217: 71-80.
- [ 19 ] HOWLADER H O R, FURUKAKOI M, MATAYOSHI H, et al. Duck curve problem solving strategies with thermal unit commitment by introducing pumped storage hydroelectricity & renewable energy [ A ]. Power Electronics and Drive Systems ( PEDS ), 2017 IEEE 12th International Conference on [ C ]. IEEE. USA, Hawaii, 2017.
- [ 20 ] LIU W, JIANG D, CHEN J, et al. Comprehensive feasibility study of two-well-horizontal caverns for natural gas storage in thinly-bedded salt rocks in China [ J ]. Energy, 2018, 143: 1006-1019.
- [ 21 ] ZHOU H W, WANG C P, HAN B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48 ( 1 ): 116-121.
- [ 22 ] 丁国生,李文阳.国内外地下储气库现状与发展趋势[ J ].国际石油经济,2002,10(6):23-26.  
DING Guosheng, LI Wenyang. Current situation and development trend of underground gas storage at home and abroad [ J ]. International Petroleum Economics, 2002, 10 ( 6 ): 23-26.
- [ 23 ] 余霖森,袁士宝.油田废弃井和闲置井封堵要求与监管——兼谈美国加利福尼亚州经验[ J ].国际石油经济,2017,25(1):78-84.  
YU Binsen, YUAN Shibao. Requirement and regulation of idle and abandoned wells' plugging—A case study of California's experience [ J ]. International Petroleum Economics, 2017, 25 ( 1 ): 78-84.
- [ 24 ] 张金山.国外工业遗产旅游的经验借鉴[ N ].中国旅游报,2006-05-29(04).
- [ 25 ] 沈志敏.地下工程心理环境和生理环境的改善[ J ].地下空间与工程学报,1992,12(4):302-305.  
SHEN Zhimin. Improvement of psychological environment and physiological environment in underground engineering [ J ]. Underground Space, 1992, 12 ( 4 ): 302-305.
- [ 26 ] 朱其光,陈华奇.洞穴医疗及柳州响水岩洞穴医疗研究[ J ].中国岩溶,1998,17(3):269-277.  
ZHU Qiguang, CHEN Huaqi. Cavernous medicine and medical research on Xiangshuiyan caves in Liuzhou [ J ]. Carsologic Sinica, 1998, 17 ( 3 ): 269-277.
- [ 27 ] 李丽慧,杨志法,岳中琦.浙江大型古地下工程洞室群的科学研究与启示[ J ].工程地质学报,2018,26(1):73-84.  
LI Lihui, YANG Zhifa, YUE Zhongqi. Scientific researches of large ancient rock underground openings in Zhejiang province and their inspirations [ J ]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26 ( 1 ): 73-84.
- [ 28 ] 李爱民.常见病与自然疗法系列(六)奇特的岩洞疗法[ J ].健康人生,2015(4):38-39.  
LI Aimin. common diseases and natural therapy series ( VI ) strange caverns therapy [ J ]. Healthy Life, 2015 ( 4 ): 38-39.
- [ 29 ] 李溪,杨晓霞,向旭,等.国外洞穴医疗研究综述[ J ].中国岩溶,2014,33(3):379-385.  
LI Xi, YANG Xiaoxia, XIANG Xu, et al. Overview of foreign cave medical research [ J ]. Carsologic Sinica, 2014, 33 ( 3 ): 379-385.
- [ 30 ] 谢和平,刘吉峰,高明忠,等.深地医学研究进展及构想[ J ].四川大学学报(医学版),2018,49(2):163-168.  
XIE Heping, LIU Jifeng, GAO Mingzhong, et al. The research advancement and conception of the deep-underground medicine [ J ]. Journal of Sichuan University ( Medicine Science Edition ), 2018, 49 ( 2 ): 163-168.
- [ 31 ] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[ J ].煤炭学报,2017,42(3):547-556.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological deep conception of the fluidization mining for coal resources [ J ]. Journal of China Coal Sciences, 2017, 42 ( 3 ): 547-556.
- [ 32 ] 姜岩,张晓华,梁新元,等.生物法在油田地面处理及地下开采系统中的应用[ J ].化工进展,2016,35(11):3383-3391.  
JIANG Yan, ZHANG Xiaohua, LIANG Xinyuan, et al. Biotechnological application to ground processing and underground mining in oil field [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35 ( 11 ): 3383-3391.
- [ 33 ] 齐子姝.地能利用热泵系统能量多样化机制及其效能[ D ].吉林:吉林大学,2012.
- [ 34 ] 江彦,高青,李明,等.地下蓄能热扩散和传输的能流密度描述[ J ].吉林大学学报(工学版),2009,39(5):1142-1145.

- JIANG Yan, GAO Qing, LI Ming, et al. Description of energy flux on thermal diffusion and transport in underground thermal energy storage[J]. Journal of Jilin University( Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1142-1145.
- [35] 路璐瑶, 黄少鹏. 变废弃矿井为开发地热资源的聚宝盆[N]. 中国科学报, 2018-04-12(06).
- [36] 马勉军, 陈焘, 雷军刚, 等. 大型低地球轨道空间等离子体环境模拟实验系统设计[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(6): 680-685.
- MA Mianjun, CHEN Tao, LEI Jungang, et al. Design of large-sized space plasma simulation system for low earth orbit environment [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(6): 680-685.
- [37] 郑永龙, 司思. “月宫365”计划在北京航空航天大学月宫一号实验室正式启动 [EB/OL]. [http://cn.chinadaily.com.cn/2017-05/10/content\\_29280852.htm](http://cn.chinadaily.com.cn/2017-05/10/content_29280852.htm), 2017-05-10.
- [38] 束昱, 彭方乐. 地下空间研究的新领域: 地下环境心理学[J]. 地下空间, 1990, 10(3): 205-209.
- SHU Yu, PENG Fangle. The new field of underground space research: The psychology of underground environment, underground space, 1990, 10(3): 205-209.
- [39] 北京市人民政府. 北京城市总体规划(2016年-2035年)[Z], 2017.