

## 深地医学研究进展及构想\*

谢和平<sup>1,2,3</sup>, 刘吉峰<sup>1△</sup>, 高明忠<sup>3</sup>, 万学红<sup>1</sup>, 刘世喜<sup>1</sup>, 邹剑<sup>1</sup>,

吴江<sup>4</sup>, 马腾飞<sup>1</sup>, 刘依琳<sup>1</sup>, 步宏<sup>1</sup>, 李为民<sup>1</sup>

1. 四川大学华西医院 深地医学中心(成都 610041); 2. 深圳大学深地科学与绿色能源研究院(深圳 518060)

3. 四川大学水利水电学院(成都 610065); 4. 四川大学华西基础医学与法医学院(成都 610041)

**【摘要】** 21世纪是开发利用地下空间的世纪,可预见未来人类在地下空间生活与工作占比时间会越来越多,然而地下空间环境对人类健康的影响程度及其机制研究依然空白。本文系统提出深地医学研究的战略构想,以期揭示地下空间环境对生命体生理和病理,以及对人心理的影响及机制,并研究应对策略。本文系统概括了深地医学研究进展及构想,构建的研究方向主要包括:①不同深度地下空间人居环境参数(温度、辐射、气压、围岩性质、微生物等)的模型构建、定量表征及其对人类健康的影响及其机制;②深地环境下生物机体的生理功能改变、稳态维持和生物节律模式;③不同岩层、岩性的物性特征对人类健康的影响及其机制,分析地下区域岩性环境变迁对生物体的生长贡献模式;④地下空间的建造深度、结构类型、物理环境及作业时间与人类心理健康之间的关联关系;⑤深地环境下细胞生长、代谢及能量交换规律、应答反应、生长响应、衰老和适应机制;⑥深地环境下微生物的生理特征、发育变化以及与宿主的相互作用机制;⑦深地模拟舱及深地环境下生物医学技术、设备研发。课题组在岩层覆盖厚度达1470 m地下建成世界上第一个深地医学实验室,并已开展多个不同深度水平深地医学的相关测试与分析。

**【关键词】** 深地 洞穴医疗 深地医学 地下实验室 健康

**The Research Advancement and Conception of the Deep-underground Medicine** XIE He-ping<sup>1,2,3</sup>, LIU Ji-feng<sup>1△</sup>, GAO Ming-zhong<sup>3</sup>, WAN Xue-hong<sup>1</sup>, LIU Shi-xi<sup>1</sup>, ZOU Jian<sup>1</sup>, WU Jiang<sup>4</sup>, MA Teng-fei<sup>1</sup>, LIU Yi-lin<sup>1</sup>, BU Hong<sup>1</sup>, LI Wei-min<sup>1</sup>. 1. West China Hospital, Deep Underground Space Medical Center, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. West China School of Basic Sciences and Forensic Medicine, Sichuan University, Chengdu 610041, China

△ Corresponding author, E-mail: 729122921@qq.com

**【Abstract】** The 21th century is the century of exploring and utilizing the underground space. In the future, more and more people will spend more and more time living or/and working in the underground space. However, we know little about the effect on the health of human caused by the underground environment. Herein, we systematically put forward the strategic conception of the deep-underground medicine, in order to reveal relative effects and mechanism of the potential factors in the deep underground space on human's physiological and psychological healthy, and to work out the corresponding countermeasures. The original deep-underground medicine includes the following items. ① To model different depth of underground environment according to various parameters (such as temperature, radiation, air pressure, rock, microorganism), and to explore their quantitative character and effects on human health and mechanism. ② To study the psychological change, maintenance of homeostasis and biohythm of organism in the deep underground space. ③ To learn the association between psychological healthy of human and the depth, structure, physical environment and working time of underground space. ④ To investigate the effect of different terrane and lithology on healthy of human and to deliberate their contribution on organism growth. ⑤ To research the character and their mechanism of growth, metabolism, exchange of energy, response of growth, aging and adaptation of cells living in deep underground space. ⑥ To explore the physiological feature, growth of microbiome and it's interaction with host in the deep underground space. ⑦ To develop deep-underground simulation space, the biologically medical technology and equipments. As a research basis, a deep-underground medical lab under a rock thickness of about 1470 m has been built, which aims to operate the research of the effect on living organism caused by different depth of underground environment.

**【Key words】** Deep underground space Speleotherapy Deep-underground medicine Underground laboratories Healthy

世界人口增长、浅部资源逐渐枯竭,给人类可持续发展带来前所未有的挑战。因此,世界各国纷纷开始探索地下空间<sup>[1-3]</sup>。1991年,在日本东京举办的第四届 Associated Research Centers for the

\* 四川大学华西医院深地医学建设项目(No. YB2018002),

2018年建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金资助

△ 通信作者, E-mail: 729122921@qq.com

Urban Underground Space (ACUUS) 国际地下空间大会《东京宣言》认为:19 世纪是桥的世纪,20 世纪是高层建筑的世纪,21 世纪是开发利用地下空间的世纪。2016 年,习近平总书记在全国科技创新大会上提出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”这一重要论断;开发深地资源已经成为未来中国科技发展的重要方向<sup>[4]</sup>。国土资源“十三·五”科技创新规划,制定了以向地球深部进军为统领,全面实施深地探测、深海探测、深空对地观测和土地工程科技“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、土地科技水平显著提升的总体目标。无论是深海、深空还是深地领域,其特殊的自然环境必然对在其中活动的人类产生影响。我国航天、航空、航海领域的快速发展,衍生出专门研究相关领域的医学学科,诸如航海、航天、航空医学。深地环境低宇宙辐射、增重、恒温、幽闭、岩石、不同深度气压变化等环境因素必然对人体生理及心理产生相应的影响。然而,目前有关深地这些特殊因素对人和其他生命体的了解甚少,更谈不上相关学科。随着地下空间开发和利用的规模逐渐扩大,更多的人将花更多的时间在地下空间进行活动。而地下环境对人体及其疾病的影响,必将越来越引起人们的重视。本文就这一领域相关的研究进展及未来的发展和研究方向做一构想。

## 1 国内外研究现状

人类开发利用地下空间的目的主要有如下方面:单纯的空间利用、矿产资源开发、科学研究以及从事医疗活动。从地下空间的成因来看,主要有天然的洞穴及人工建造的地下空间(如隧道、矿井等)。从利用地下空间的深度来看,城市建设的深度一般在 30 m 以内,目前城市建设有接近 50~100 m 这一深度的趋势;煤炭开采已达 1 500 m,金属矿开采已超过 4 800 m;地下实验室则从几十米到两千余米;既往从事地下医疗活动多利用现有的山洞或者矿井,深度远不及实验室及矿产开采的深度<sup>[4-8]</sup>。当然,人类利用洞穴/地下空间从事医疗相关的活动由来已久。

### 1.1 地下空间的医学应用

在美国猛犸洞穴的考古发现提示在几千年前印第安人就可能通过服用洞内的芒硝治疗疾病;大约 2 000 年以前,我国医生有使用产自洞穴的“龙骨”作为妇儿和男性补养药物使用的记录;16、17 世纪,欧洲的医生有从洞穴中获取月奶石来给伤病员包扎伤口的记载<sup>[9]</sup>。然而,人类真正的开发利用岩洞/地下环境进行疾病治疗及医学研究的记录在 100 多年

前;相关的学科也被称为洞穴医疗(Speleotherapy)。洞穴医疗从治疗疾病来说始于治疗呼吸道疾病,应用范围目前已扩展到多种疾病;从盛行范围来看,始于东欧,盛行于东欧和中欧<sup>[10]</sup>。经过 100 多年的发展,当前其概念主要是指:利用地下空间/洞穴环境某些固有的特性进行疾病治疗<sup>[11]</sup>。由于治疗机制相同,有些文献也将“Halotherapy”(在我国通常被称为“气溶胶盐疗法”)统称为 Speleotherapy<sup>[12]</sup>。事实上,我们必须认识到,始于 1982 年的气溶胶盐疗法仅指在人造盐矿洞穴或盐疗房中进行疾病治疗的方法。因此,要注意两个概念之间的差别;Speleotherapy 比 Halotherapy 历史更为久远,且涉及的范围更加宽泛<sup>[11]</sup>。

洞穴医疗中起治疗作用的主要是矿井或洞穴环境中的空气、射线、矿物、微生物等因素。洞穴医疗的分类繁杂且无统一标准;按照岩洞成分及性质分为:盐、钾矿和洞,岩溶洞和矿洞;按照温度分为:冷、中、暖三种;按湿度分为:低、正常、高三种;按气压分为:低、中、高三种;按射线的量分为:氡源性高辐射、40 钾源性中度辐射、岩溶洞的正常水平辐射和低辐射的盐矿洞<sup>[10]</sup>。在实践应用中,根据上述不同的组合方式又分为多种。当前洞穴医疗涉及的疾病主要包括呼吸道疾病(如哮喘、慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、急性支气管炎、过敏性鼻炎、急性慢性鼻窦炎、急性慢性扁桃体炎等)、心脑血管系统疾病、皮肤病(如银屑病、过敏、皮肤损伤、痤疮等)、免疫及风湿性疾病(如强直性脊柱炎、关节固定性脊柱炎、风湿性关节炎等)<sup>[11]</sup>。然而,从国际上发表的相关文献来看,有如下特点:呼吸系统疾病居多,研究文献质量不高,发表文献主要是非英文文献,少有高质量的临床试验。2001~2005 年,BEAMON 等<sup>[10]</sup>对洞穴医疗治疗哮喘的文献进行系统评价并持续更新发现:纳入研究 124 个,其中仅一个研究方法可信。2014 年,RASHLEIGH 等<sup>[13]</sup>对 Halotherapy 治疗 COPD 进行系统评价发现:相关的文献多达 151 篇,但仅有 1 篇文献是随机对照,其余文献质量均不高。同年,我国学者李溪等<sup>[11]</sup>检索 1978~2013 年间国外与洞穴医疗相关的文献 78 篇,剔除相关性不大、重复性文献、新闻报道后,仅获得有效研究文献 32 篇;文献经评价后,指出不足之处:现有研究成果还存在数量有限、内容不够全面、研究方法不够丰富、研究成果的地域分布不均衡、理论研究成果较少等。后经我们补充检索,只有 2017 年 BAR-YOSEPH 等<sup>[14]</sup>所报道的有关该疗法治疗儿童哮喘的研究(纳入治疗组 29 例,对照组 26 例),结果显示该疗法可显著改善

患儿的生活质量。有关洞穴/地下环境治疗疾病的确切机制尚不清楚,研究推测可能的因素有:患者初次接触的微生物和过敏原、温度和湿度恒定、射线的改变、洁净的空气、较高的CO<sub>2</sub>含量、富含高负氧离子、气溶胶(包括Na、K、Mg、Ca等元素)等<sup>[11,15]</sup>。

尽管我国岩溶洞穴、矿井资源非常丰富,但至今还无真正意义的洞穴医疗站。1984年,解放军164医院项怀强等<sup>[16]</sup>报道了山洞医院治疗烧伤的疗效观察;1989年,该院史凯等<sup>[17]</sup>对山洞医院的环境设施,以及对收治在洞内进行烧伤患者的治疗经验进行了全面的介绍。随后,该院彭自安等<sup>[18-19]</sup>报道了山洞医院对烧伤患者治疗的临床观察。然而,这些文献均未设临床观察对照,其可信度不高、论证强度差,而此后也无相关的文献报道。1994年,在广西柳州市的响水岩,建立了中国首家洞穴医疗站;由于经济等多方面的因素,这家唯一的洞穴医疗站也“夭折”了。在该领域的理论性研究就更是屈指可数,仅朱德浩、朱其光等学者对该领域进行了一些观测和研究,取得部分成果<sup>[20-21]</sup>。

## 1.2 深地生物医学实验研究

人类开发利用矿井、洞穴等地下空间从事医疗活动,虽然历史久远,但是这些空间多处于地表环境,岩层覆盖较浅;除了岩性化学、相对封闭的空间等因素外,这些空间环境和地面可能相差不大。随着人类向地下空间的进发,掘进的深度会越来越深;在深地环境下有增重效应,同时具有“三无”(无宇宙射线、阳光及氧气)、“三高”(高温、高压、高湿)等环境特征<sup>[4]</sup>。这些因素对人体及地表生物的影响及其程度的研究,目前尚接近空白。地下实验室作为基础研究平台,其初期主要目的在于开展粒子物理学、天体物理学及宇宙学等领域的暗物质探测研究和双β衰变、中微子振荡、质子衰变、岩体力学、地球结构演化、生态学等相关学科的研究。从事上述类似研究的实验室在世界范围内有数十个,实验室表面覆盖岩层厚度从几百米到一千多米不等<sup>[6]</sup>。这些实验室在从事前述基础研究的同时,也为人们探索深地环境对人和生物的影响提供了一个平台,开创了一个全新的研究领域。

在这些实验室中,开展生物医学相关研究的实验室主要有:意大利格兰萨索实验室(Gran Sasso National Laboratory, LNGS)、美国位于卡尔斯巴德核废料储存场地的地下空间(Waste Isolation Pilot Plant, WIPP)、加拿大斯诺实验室(The Sudbury Neutrino Observatory Laboratory, SNOLAB)及法国摩丹地下实验室(Laboratoire

Souterrain de Modane, LSM)。LNGS位于公路隧道中段,岩层覆盖厚度达1400 m,于1995年发表第一篇关于地下环境对生物影响的文献<sup>[22]</sup>;WIPP则位于地下650 m,于2009年开始生物医学相关的实验研究<sup>[23]</sup>;LSM也为公路隧道,于2016年开始发表有关地下环境对生物影响的研究<sup>[24]</sup>。2017年加拿大发表了其依托SNOLAB进行深地环境对生命体影响的研究计划,并将该计划命名为REPAIR<sup>[25]</sup>。我国尚未有公开发表有关地下环境对生物影响的研究。2005年,我国学者郑世英等<sup>[26]</sup>对12名健康男性受试者在半封闭地下环境进行为期6 d的观察试验;对受试人员饮食、饮水、睡眠、排便等基本生活规律及自觉症状进行问卷调查后得出:试者在半密闭地下环境6 d内,机体代偿功能正常,无明显健康变化。该文献成为我们能检索到的国内为数不多阐述地下空间对人影响的研究报道。

当前,地下实验室相关的生物医学研究主要针对低本底辐射环境对细胞的影响。据公开发表的文献,LNGS当属该领域的先驱。LNGS从原生物到哺乳动物细胞系进行了较为长久和系统的研究。1995年,SATTA等<sup>[22]</sup>发表的首个地下低辐射本底环境对草履虫增殖影响的研究提示:在地下环境中草履虫的细胞增殖速度减慢。该实验室的ANTONELLI等<sup>[27]</sup>在地下环境培养中国仓鼠细胞(Chinese hamster fibroblasts, V79)6月后发现其对环己酰亚胺(cycloheximid, CHX)诱导的凋亡活性增加,同时伴有c-myc基因的高表达,p53基因表达无明显改变;同时还发现实验组细胞对突变的诱导更敏感,紫外线暴露下尤为明显。SATTA等<sup>[28]</sup>继续将该细胞株培养到9月,发现如下改变:细胞生长和修复相关的基因表达下调,抗氧化酶的模式发生改变,细胞应对DNA损伤的修复能力下降。FRATINI等<sup>[29]</sup>将该细胞株在地下环境培养10月后再转入地表环境培养6月后发现:细胞的谷胱甘肽过氧化物酶(glutathioneperoxidase, GPX)的活性下降,且其酶的活性转入地表培养后仍不能恢复,同时伴有细胞的自发突变频率增加。CARBONE等<sup>[30]</sup>首次在LNGS培养了人淋巴母细胞株(TK6)6月后发现:地下生长的细胞对射线造成DNA损伤的修复能力下降,对因射线引起的活性氧(reactive oxygen species, ROS)改变的反应性降低。2011年,SMITH等<sup>[23]</sup>发表在WIPP培养细胞的结果显示:耐辐射球菌置于WIPP,并将射线进一步屏蔽后,细菌的生长也受到抑制。此后该实验室CASTILLO等<sup>[31]</sup>将希瓦氏菌(*S. oneidensis*)及耐辐射球菌(*D. radiodurans*)进行培养发现:两种细

菌在剥夺了本底辐射的环境中生长均受到抑制,希瓦氏菌中 *katB*、*recA*、*SOA0154* 基因和耐辐射球菌中 *dnaK* 基因的表达上调。通过上述研究来看,深地的低本底辐射环境可减缓细胞的生长速度,且细胞应对损伤的能力下降,但其确切的机制还需要进一步的研究。

## 2 深地医学研究构建及构想

从洞穴医疗到深地低本底辐射对细胞生长的影响研究进展来看,虽然人类利用矿井、洞穴等地下空间从事医疗活动或研究已经有很长的历史,但是地下空间的医学研究除了前述洞穴医疗存在的问题外,仍有诸多问题。其一,从地下环境对生物的影响到洞穴医疗,看似相互割裂的学科,实际上应该是整体的,其作用的机制都是地下空间的特殊环境导致相应的结果。因此,可将其整合,作为一个系统的学科,我们姑且将其称为地下医学(Underground Medicine)。其二,随着深度的增加,地下空间除了低本底的辐射,还有诸多的因素对生物和人产生影响,诸如重力的改变,地下空间中的岩性、湿度、温度、气压、微生物以及尚未探知的因素等。然而,目前的基础研究主要集中在低本底的辐射方面,其他因素的研究几乎没有涉足。所以,我们应将诸多的因素考虑进来,进行整合研究。其三,术语使用有不妥之处,如:多数文献将 Speleotherapy 译为洞穴医疗。从字面意思看:speleo 为洞穴之意、therapy 为治疗之意,且从内容来看,其核心是利用洞穴或地下空间的天然特性进行疾病的治疗,译为洞穴医疗可能显得内容过于夸大,且表述并不清楚。因此,我们认为译为“洞穴疗法”可能更为合适,且其可归入地下医学的一个分支。

随着人类逐渐向地下要空间的过程中,从事地下活动的人群、活动的时间、所及地下的深度在可预见的将来将是前所未有的。因此,我们认为有必要从整体上、系统地研究地下,特别是深地极端环境对人类的影响及其程度;在此基础上找出有利因素加以利用、发现有害因素并对其做出干预,形成完整的地下医学学科体系。据此,我们设想当下医学研究需要从事和解决的问题主要有如下几个方面:① 探索地下环境不同深度对健康人群的生理和心理的影响,以及其影响程度;鉴定出地下环境适合人类生活、生产以及进行科学研究的安全深度,并从医学的角度对深地进行界定;② 探索从细胞到动物,不同深度地下环境对生命体的生理、病理以及有行为认知能力生物心理的长期影响,并阐明机制,为人类进一步开放利用地下空间奠定理论基础;③ 在现有的

研究基础上,建立模式生物,充分利用已经发现的有益于健康的地下环境因素,在可选择、安全的范围内开展高质量的临床试验及相关的基础研究,充分利用地下空间开展对于人类有利的医疗活动并阐明其机制;④ 通过深地现场研究场所、矿井、隧道等环境数据的采集,在地表进行模拟舱建设并进行验证,定性、定量研究深地相关环境对生命体生理、病理以及对人心理的影响,最终形成成熟的研究方法和完整的学科体系。

## 3 我国深地医学构建

有资料预测,21 世纪末全世界将有  $1/3 \sim 2/3$  的人口在地下空间工作、生活<sup>[32-33]</sup>。当前我国经济快速发展、人口增长迅速、生存空间压力巨大;同时由于产业升级、能源结构调整,将会面临许多矿井的闲置。开发利用地下空间及成功实现当前的矿井转型具有重要的战略意义。结合国情及国际发展需要,我国已经认识到在战略层面开发利用地下空间的重要性。《“十三·五”国家科技创新规划》对地球深部(深地)探测研究已有明确的表述。这表明国家对地球深部探测研究高度重视。2010 年 6 月,中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)的建成并投入使用标志着我国迈出了开展深地科学探索研究具有里程碑意义的一步。2015 年,谢和平院士率先提出在地下空间开展医学研究,并在 2016 年多次论证在开发城市地下空间、矿井资源转型的同时,开展医学研究的可行性及方案,并发表学术论文进行阐述<sup>[34]</sup>。2017 年 6 月,经充分论证后正式发表学术论文探讨深地医学研究领域与方向<sup>[34-35]</sup>,在世界范围内当属先例。鉴于地下医学研究的空白,2016~2017 年,谢和平院士组织国内外相关专家开展多次研讨、论证会后,将深地医学(Deep-underground Medicine, DUM)正式进行定义为:旨在研究地下不同深度赋存环境条件对生命体的生理、病理以及有行为认知能力生物的心理影响及其响应机制;探索有害因素的应对策略,以及安全高效利用地下有益因素服务于人类社会活动的专门学科。2017 年 6~8 月,我们调研包括平煤集团、CJPL、中国黄金集团夹皮沟矿业有限公司、安徽铜陵有色、云南会泽铅锌矿、甘肃金川有色等矿井及地下空间开展深地医学试验的可能性。考虑地质条件等多重复杂因素影响后,最终于 2017 年 8 月初将中国黄金集团夹皮沟矿业有限公司二道沟矿井(Erdaogou Mine, Jiapigou Minerals limited Corporation, China National Gold Group Corporation, CJEM)选做深地医学研究试点。2017

年 8 月中旬开始正式设计试验方案,购置设备,同年 12 月 20 日建成埋深达 1 470 m 的 CJEM 细胞培养室。为保障学科建设健康发展,2018 年 1 月 12 日以四川大学华西医院/临床医学院为依托,整合多个学院资源优势的四川大学深地医学中心(deep underground space medical center, Sichuan university)应运而生。该中心的成立标志着我国在深地探索领域迈出了重要的一步,打破了深地科学研究的传统范畴。深地医学作为一个全新的交叉学科,可以从如下两方面开展深地医学现场实验研究工作。

### 3.1 深地医学实验室

深地医学必须全面、系统地进行地下不同深度的试验探索研究,来获得第一手原始资料,并寻找其规律和机制。目前已选定的 CJEM 岩层覆盖厚 1 470 m(海平面下 780 m),为真正的地下实验室。该矿井目前正在运营,生活配套成熟;间隔 40~50 m 有一个作业中段,具备在不同深度开展研究的条件;经初步测定未发现放射活性物质;在岩层覆盖 1 470 m 中段部分采空区改造成的细胞培养室具备培养细胞条件。因此,可作为我国的第一个深地医学地下实验基地,系统地研究深地环境对生命体的影响,特别是不同深度的影响规律、特征及机制。同时,充分利用我国现有的最深 CJPL 以及关停退出矿井进一步拓展研究场地,开展深地不同深度医学研究并进行数据采集,将 CJEM、CJPL、模拟舱的研究进行验证比对;最终构建地表深地模拟舱、CJEM、CJPL 三地一体的深地医学实验综合创新平台,系统开展如下研究:① 不同深度地下空间人居环境参数(温度、辐射、气压、围岩性质、微生物等)的模型构建、定量表征及其对人类健康的影响及其机制;② 深地环境下生物机体的生理功能改变、稳态维持和生物节律模式;③ 不同岩层、岩性的物性特征对人类健康的影响及其机制,分析地下区域岩性环境变迁对生物体的生长贡献模式;④ 地下空间的建造深度、结构类型、物理环境及作业时间与人类心理健康之间的关联关系;⑤ 深地环境下细胞生长、代谢及能量交换规律、应答反应、生长响应、衰老和适应机制;⑥ 深地环境下微生物的生理特征、发育变化以及与宿主的相互作用机制;⑦ 深地模拟舱及深地环境下生物医学技术、设备研发。

### 3.2 京西煤矿医学再利用

随着我国产能及能源结构调整,将有大量矿井退出历史舞台,这些退出矿井可充分利用作为深地医学研究和探索平台。据估算距离大中城市 50 km 内的煤矿就有 2 000 余座;届时将有大量矿井空置

及大量职工需要分流。以北京市为例,为减少煤炭开采和使用,据新的首都功能定位,北京市明确提出了“十三·五”时期主动引导煤炭产能全部退出北京的目标,将按照“产量逐年递减,矿井逐步停产,分步疏解退出”的原则,实现煤矿全部退出目标。经前期的考察和论证,门头沟煤矿就有千军台、木城涧坑、大台井三个生产坑井,井田面积 63.2 平方公里,最深处地表覆盖岩层及土层超过 1 000 m,距北京市区约 70 km,交通方便,矿井的深度介于 LNGS 与 WIPP 之间,矿井成型,可以快速改造,依托北京市聚集的全国优秀卫生科研人才可筹建成我国另一个深地医学实验室;与 CJEM 实验室及后期的深地模拟舱形成互补,进行生物学基础研究。另外,煤矿井下空间大,可依托北京市的优质医疗资源,选址部分安全矿井开展洞穴疗法。例如北京近年空气污染重,呼吸道疾病患病率高;变应性鼻炎(allergic rhinitis, AR)在我国大陆的患病率高达 4%~38%,北京市也处于高位水平<sup>[36]</sup>。而治疗 AR 最经济、便捷和有效的方法是避免与过敏性鼻炎接触。我们可选取 AR 患者在高发期到空气中过敏原极少的矿井进行治疗,根据疗效逐步进行二期、三期临床试验;有条件扩展到哮喘、COPD 等呼吸系统疾病;同时进行基础研究,阐明机制。这不仅具有医学价值,同时有助于推动煤矿产业转型及职工分流,实现变废为宝,具有良好的经济和社会效益。

## 4 结束语

从国际形势以及我国社会经济发展情况来看,进行地下空间利用、探索和研究具有重大的战略意义;从国家层面来看,我国政府及科学家已经开始着手深地领域的研究并进行了积极的探索和研究工作。目前,我们已经完成了从专家团队到研究基地的建设工作,形成了明确的研究方向,搭建了世界最深的深地医学平台,首次获得了在深地复杂环境下细胞培养及生长数据,为我国乃至世界深地医学研究的开展奠定了初步基础。在人类向深地进军、开展深地探索与研究的同时开展深地医学研究不仅可以使我国在该领域走在世界前列,更为重要的是探索未知领域对人和生物的影响及其机制,充分利用有利因素,规避不利因素,才能更好的体现深地探索和开发的价值。

\* \* \*

致谢 本文撰写过程中,很多学者和单位参与讨论、提出建议并给予极大帮助,特别致谢中国黄金集团夹皮沟矿业有限公司吴枝亮董事长、关洪全总经理、柏广善副总经理、于重远副总经理、谢晓亮副

总经理、单伟部长、马林涛矿长、吴清明副矿长、宋垣彭部长等为本实验提供了井下试验基地,并在设施建设、设备转运、后勤生活上给予了全方位支持和无私的帮助!同时,北京科技大学吴爱祥教授,四川大学华西第二医院/华西妇产儿童医院、华西口腔医学院、华西基础医学与法医学院、华西公共卫生学院、水利水电学院、建筑与环境学院、生命科学院等相关领域的专家在方案论证、学科建设方面提出许多宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索.岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨.深部开采的定量界定与分析.煤炭学报,2015,40(1):1-10.
- [3] 谢和平,侯正猛,高峰,等.煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望.煤炭学报,2015,40(5):965-972.
- [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.四川大学学报(工程科学版),2017,49(1):1-8.
- [5] 李相然.城市地下空间资源的类型与特点.自然资源学报,1996,11(2):193-195.
- [6] 程建平,吴世勇,岳 骞,等.国际地下实验室发展综述.物理,2011,40(3):149-154.
- [7] 胡社荣,彭纪超,黄 灿,等.千米以上深矿井开采研究现状与进展.中国矿业,2011,20(7):105-110.
- [8] XIE H, JU Y, GAO F, *et al.* Groundbreaking theoretical and technical conceptualization of fluidized mining of deep underground solid mineral resources. Tunnelling Underground Space Technol,2017,67:68-70.
- [9] 朱德浩,朱其光.洞穴医疗的现状与前景.全国洞穴学术会议,2007.
- [10] BEAMON S, FALKENBACH A, FAINBURG G, *et al.* Speleotherapy for asthma. Cochrane Database of Systematic Reviews,2001,(2):CD001741.
- [11] 李 溪,杨晓霞,向 旭,等.国外洞穴医疗研究综述.中国岩溶,2014,33(3):379-385.
- [12] CHERVINSKAYA AV, ZILBER NA. Halotherapy for treatment of respiratory diseases. J Aerosol Med,1995,8(3):221-232.
- [13] RASHLEIGH R, SMITH SM, ROBERTS NJ. A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease. Int J Chron Obstruct Pulmon Dis,2014,9:239-246.
- [14] BAR-YOSEPH R, KUGELMAN N, LIVNAT G, *et al.* Halotherapy as asthma treatment in children: a randomized, controlled, prospective pilot study. Pediatr Pulmonol,2017,52(5):580-587.
- [15] NAGY K, KAVASI N, KOVACS T, *et al.* Radon therapy and speleotherapy in Hungary. Press Therm Climat,2008,154:219-225.
- [16] 项怀强,史 凯.10年来山洞医院对烧伤创面愈合过程与疗效调查和观察.华南国防医学杂志,1984(1):35.
- [17] 史 凯,王功鹏,赵 法.利用和开发地下空间的前景-山洞医院卫生学调查.解放军预防医学杂志,1989,7(4):383-387.
- [18] 彭自安,周 胜,谢 明,等.山洞医院烧伤治疗情况观察.华南国防医学杂志,1989(2):21-22.
- [19] 彭自安,周 胜.山洞医院治疗烧伤 122 例报告.人民军医,1990(3):40-41.
- [20] 朱其光,陈华奇.洞穴医疗及柳州响水岩洞穴医疗研究.中国岩溶,1998,17(3):269-277.
- [21] 朱德浩,朱其光.洞穴自然环境系统的观测及研究-以广西柳州响水岩为例.中国岩溶,2005,24(4):318-325.
- [22] SATTI L, AUGUSTI-TOCCO G, CECCARELLI R, *et al.* Low environmental radiation background impairs biological defence of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* to chemical radiomimetic agents. Mutat Res,1995,347(3/4):129-133.
- [23] SMITH GB, GROF Y, NAVARRETTE A, *et al.* Exploring biological effects of low level radiation from the other side of background. Health Phys,2011,100(3):263-265.
- [24] LEUPIN OX, SCHWYN B, BERNIER-LATMANI R, *et al.* Discrete element modeling of a mining-induced rock slide. Nat Commun,2016,5(1):1633.
- [25] THOME C, THARMALINGAM S, PIRKKANEN J, *et al.* The REPAIR Project: Examining the Biological Impacts of Sub-Background Radiation Exposure within SNOLABAB, a Deep Underground Laboratory. Radiation Res,2017,188(4,2):470-474.
- [26] 郑世英,张永良,郑铁钢,等.半密闭地下环境的健康影响.环境与健康杂志,2005,22(4):271-273.
- [27] ANTONELLI F, BELLI M, *et al.* Radiation biophysics at the Gran Sasso laboratory: influence of a low background radiation environment on the adaptive response of living cells. Nuclear Physics B (Proceedings Supplements),2000,87(1):508-509.
- [28] SATTI L, ANTONELLI F, BELLI M, *et al.* Influence of a low background radiation environment on biochemical and biological responses in V79 cells. Radiat Environ Biophys,2002,41(3):217-224.
- [29] FRATINI E, CARBONE C, CAPECE D, *et al.* Low-radiation environment affects the development of protection mechanisms in V79 cells. Radiation and Environmental Biophysics,2015,54(2):183-194.
- [30] CARBONE MC, PINTO M, ANTONELLI F, *et al.* Effects of deprivation of background environmental radiation on cultured human cells. IL Nuovo Cimento,2010,125(4):469-477.
- [31] CASTILLO H, SCHODERBEK D, DULAL S, *et al.* Stress induction in the bacteria *Shewanella oneidensis* and *Deinococcus radiodurans* response to below-background ionizing radiation. Int J Radiation Biol,2015,91(9):749-756.
- [32] 何一民,何永之.加强我国地下空间开发,规划及科学管理-生存空间危机下的选择.西南民族大学学报(人文社科版),2011,32(8):109-114.
- [33] CHEE-KIONG S, CHRISTOPOULOS GI, ROBERTS AC, *et al.* Human-centered development of underground work spaces//International Scientific Conference "underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development" St Petersburg,2016.
- [34] 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.岩石力学与工程学报,2017,36(6):1301-1313.
- [35] 谢和平.深地科学三个颠覆性创新理论与技术构想.北京:地球深部探测中心,2016.
- [36] YUAN Z, LUO Z. Prevalence of Allergic Rhinitis in China. Allergy Asthma Immunol Res,2014,6(2):105-113.