

基于跨尺度仿生思想的地下生态城市构建新范式

韩凯航^{1,2}, 陈湘生^{1,2*}, 江媛³, 苏栋^{1,2}, 包小华^{1,2}, 崔宏志^{1,2}, 陈曦^{1,2}, 范家琳⁴

(1. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东深圳 518060; 2. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 广东深圳 518060; 3. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 4. 深圳大学心理学院, 广东深圳 518060)

摘要: 向地下深部寻求发展空间成为应对土地资源紧张、可持续发展受限背景下的自然选择, 构建地下生态城市受到深地、深空等国家战略的直接牵引, 也与应对极端环境等重大需求相契合; 传统的地下开发模式功能单一、形态僵化、生态循环能力不足, 难以支撑相关新兴需求, 亟待研究新的构建范式及发展路径。本文在系统把握地下生态城市发展背景并辨析研究突破方向的基础上, 基于跨尺度仿生思想提出了地下生态城市构建新范式。精准解析了蚂蚁巢穴的微观几何形态与力学机制并揭示了应力管理、能耗优化、系统协同等方面的卓越机制, 凝练出中观尺度上的韧性、可持续循环、分布式智能等核心设计原则, 进而映射至宏观地下城市的功能拓扑结构与深部应力自适应形态; 以此方法论为指导构建了深度可扩展、形态随深度自适应演变的地下生态城市三维战略蓝图, 依托国内外前沿工程实践作出从生物学智慧到工程现实的路径是畅通的基本判断; 面向未来应用, 阐述了“感知-建模-调控-决策”全链条关键技术、“法制-社会-经济”协同管理等发展要素。相关内容将直接推动地下开发从被动适应到主动塑造的根本性转变, 兼有普适性与良好的可移植性, 为服务深空重大战略、构建地外天体地下栖息地等提供了理论借鉴。

关键词: 地下生态城市; 跨尺度仿生; 深地开发; 地下栖息地; 生态循环; 自适应

中图分类号: TU28 **文献标识码:** A

A New Paradigm for Constructing Underground Eco-cities Based on the Concept of Cross-Scale Bionics

Han Kaihang^{1,2}, Chen Xiangsheng^{1,2*}, Jiang Yuan³, Su Dong^{1,2}, Bao Xiaohua^{1,2},
Cui Hongzhi^{1,2}, Chen Xi^{1,2}, Fan Jialin⁴

(1. Underground Polis Academy of Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 3. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 4. School of Psychology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: Extending urban development underground has become a natural choice in response to land resource constraints and limitations on sustainable development. The construction of underground eco-cities is directly driven by national strategies such as

收稿日期: 2025-11-16; **修回日期:** 2026-01-11

通讯作者: *陈湘生, 深圳大学未来地下城市研究院教授, 中国工程院院士, 研究方向为超大城市地下空间韧性基础理论、地下工程智能建造与运维技术; E-mail: xschen@szu.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(52090084); 中国工程院咨询项目“2025年度中国城市地下空间发展研究”(2025-HZ-08), “特大城市地下空间综合开发、高效利用与数智治理”(2024-JZ-06)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

those for deep-Earth and deep-space exploration, and aligns with major needs such as coping with extreme environments. Conventional underground development models are characterized by single functionality, rigid morphology, and insufficient ecological circulation capacity, making them inadequate to support emerging demands. There is a pressing need to research new paradigms and formulate their development pathways. Based on a systematic understanding of the development context of underground eco-cities and an analysis of key research breakthroughs, this study proposes a new paradigm for constructing underground eco-cities based on the concept of cross-scale bionics. It precisely analyzes the micro-geometric morphology and mechanical mechanisms of ant nests, revealing their excellent mechanisms in stress management, energy consumption optimization, and system synergy. Core design principles at the meso-scale, such as resilience, sustainable circulation, and distributed intelligence, are identified and then mapped onto the macro-scale functional topological structure and deep stress-adaptive morphology of underground cities. Guided by this methodology, a three-dimensional strategic blueprint for a depth-scalable, morphologically adaptive underground eco-city is constructed. Based on cutting-edge engineering practices both in China and abroad, it is preliminarily judged that the pathway from biological wisdom to engineering practices is viable. For future applications, key enabling technologies across the entire chain of “perception–modeling–regulation–decision-making” and developmental elements like synergistic “legal–social–economic” management are elaborated. This study will directly promote a fundamental shift in underground development from passive adaptation to active shaping. The new paradigm proposed possesses both universality and good transferability, providing theoretical references for serving deep space strategies and constructing subsurface habitats on extraterrestrial celestial bodies.

Keywords: underground eco-city; cross-scale bionics; deep underground development; subsurface habitat; ecological circulation; adaptability

一、前言

今后一段时期是我国经济社会高质量发展的战略机遇期，向地球深部、宇宙深空拓展成为把握未来发展主动权、保障战略资源安全、培育新兴产业的核心依托之一。《工业和信息化部等七部门关于推动未来产业创新发展的实施意见》（2024年）提出，面向载人航天、深海深地等重大工程和项目场景，加速探索未来空间方向的成果创新应用，服务国家战略需求。自然资源管理部门提出，展望“十五五”标准化工作方向，加快抢占深海、深地、极地探测等新兴和未来产业的标准化制高点。在此背景下，深地经济作为以地下空间、深部资源开发为核心的新型经济形态得到社会的普遍关注，到2030年我国深地相关产业市场规模有望突破5万亿元^[1]。

得益于国家相关战略部署，发展地下生态城市成为新兴研究热点，受到深地、深空等战略的直接牵引并与应对极端环境等需求相契合。一方面，从深地战略的角度看，向地下深部发展，不仅是缓解地表土地资源约束、开拓城市发展空间的合理选择，而且成为应对极端灾害、保障战略安全、储备关键资源的韧性工程；地下生态城市可为人类提供地表核污染、重大气候灾害、地缘冲突等极端情景下的规模化庇护空间，也具有恒温、恒湿、高隔离的天然特性，适合部署战略能源储备、高安全数据中心、前沿科学设施^[2-4]。另一方面，从深空战略的角度看，月球、火星等地外天体表面环境极端恶

劣，面临宇宙射线、太阳风、微陨石撞击等的常态化威胁，构建位于天体表层之下的封闭式栖息地成为屏蔽辐射、维持热稳定、防护撞击的国际共识方案；在地球上开展地下生态城市的相关研究与实践，可直接为地外基地建设提供“地面验证模型”并储备工程经验。

构建可持续、自循环、高韧性的地下栖息地是贯通深地、深空等战略的核心技术与能力基础^[5-8]。受此驱动，地下生态城市作为连接地球可持续发展和人类星际拓展的关键枢纽而显重大价值，正在从科学构想向现实方案迈进^[9-12]。也要注意，现有的地下生态城市研究多为描绘功能愿景，基本回答了“在何处”布置“何种功能”的疑问，而普遍忽视了对实现功能所需的三维空间形态、结构性体系、内在生态逻辑等的构建方法论。这种形态、功能之间的脱节导致许多构想停留在概念图景，难以转化为可指导工程实践的方案蓝图，成为制约地下生态城市发展理念迈向工程现实的瓶颈因素。可见，传统地下工程的刚性形态与未来城市系统对韧性、循环、智能的复杂需求之间存在着鲜明的“鸿沟”^[13-16]。

本文尝试以跨尺度仿生思想作为核心方法论，提出从被动适应到主动塑造的地下生态城市构建新范式。以在亿万年自然选择中优化形成的蚂蚁巢穴为生物学蓝本，从大自然生物演化结果中获得地下生态城市三维空间形态设计的灵感。系统解析蚂蚁巢穴在应力管理、能耗优化、分布式智能等方面的

机制，据此凝练具有普适性的跨尺度仿生设计原则，涵盖韧性、可持续循环、分布式智能等。提出深度可扩展、形态随深度自适应演变的三维生态蓝图构建方法，阐述支撑地下生态城市发展战略的技术性和管理性要素。

二、地下生态城市的研究基准

（一）地下生态城市的发展背景

在地球上建立地下生态城市，出发点是对人类文明可持续发展面临系统性风险的深刻判断。推动地下生态城市建设，既是缓解当前资源环境矛盾的现实出路，也是防范未来全球性灾难的韧性工程，更是实现深空定居等长远愿景的关键技术阶梯。

1. 突破资源与环境瓶颈

土地资源趋于紧缺（人口密集国家可用于居住和耕作的优质地表空间接近极限），气候变化带来多重胁迫（如海平面上升侵蚀沿海城市，极端热浪、暴雨、干旱频繁冲击地表的基础设施与农业系统），能源与水资源面临持续压力（如传统能源结构转型艰难，地下水资源超采、污染问题突出），构成发展地下生态城市直接且迫切的驱动力。地下空间可以承载居住与生产功能，所具有的天然热稳定性和隔离性也有助于能源高效利用与水循环管理，从而为城市系统提供深层缓冲。向地下“要空间”“要安全”“要资源”成为应对这些确定性危机的必然路径。

2. 承担战略性风险与韧性的储备功能

核冲突可能导致地表长期不宜居、新型病原体可能引发全球封锁与社会停摆、近地小天体撞击一旦发生足以造成人类文明断层，构成了具有高影响、低概率特征的生存性风险。地下生态城市具有岩土覆盖的物理防护、封闭式的生态循环、能源自给等能力，可作为长期抵御外界极端环境的“文明庇护所”“备份节点”。在充当灾难应急空间的基础上，还可作为人类文明的战略资源储备（如种子库、能源库、数据存档）以及维持社会核心功能持续运转的韧性基础设施，为文明存续提供关键冗余。

3. 保障深空探索的必经之路

从人类长期演进的视角看，文明在迈向星际之前需要在地球上全面验证封闭生态系统、能源完全

自给、群体长期隔离生存等技术。地下生态城市是经济可行的深空探索“实验场”，深部环境能够模拟外星基地的封闭、高约束、低外部依赖特征，相应的工程挑战（如地质稳定、空气再生、食物循环、心理支持）与月球/火星基地面临的问题高度同构甚至更为复杂。成功构建并运行规模化的地下宜居系统，将标志人类真正掌握可持续异地生存的技术体系，为成为跨星球物种确立必需的工程与心理基础。

（二）地下生态城市的研究突破方向

目前，“生态圈二号”等地表生态实践已有一定积累^[17-20]，而面向深层地下的生态城市研究仅处于探索阶段。将地下生态城市定义为集居住、工作、科研、医疗、农业以及“能源-水-空气”自循环系统于一体的深层地下综合性宜居空间成为学术界的初步共识，也标志着开发范式从单一功能向全功能城市生态系统的根本性转变。从现有研究^[2-4]来看，竖向分层设计理念具有启发性，描绘了相应的功能愿景，清晰回答了“在何处”布置“何种功能”的疑问，却普遍缺乏对实现这些功能所需的三维空间形态、结构性体系、内在生态逻辑等方面的构建方法论；形态与功能存在脱节，导致许多构想停留在概念图景层次而难以转化为可指导工程实践的蓝图方案。这些构想与实践具有共性的局限：虽然定义了“在何处”布置“何种功能”，却未能答复如何以最优的几何形态、结构体系来构建这些地下空间。

以竖向分层为代表的发展理念为地下空间资源组织提供了基础框架^[2-4]，然而随着压气储能、抽水蓄能、深地实验室、深地医院等新兴功能不断向地下深部延伸，高效连接这些分布在不同深度、承担不同功能的立体空间单元难度较大，成为制约系统效能的关键因素。现有的地下空间形态普遍采用“竖井-平巷”组合模式，在系统集成方面具有局限性：过度依赖竖向通道，火灾时易因烟囱效应加速烟气扩散且通道易失效，导致火灾逃生与安全性不足；直线型平巷与竖井在持续开发、功能衔接时难以实现有机且弹性的拓扑连接，导致可扩展性与灵活性不强。为此，突破传统地下空间形态的局限，构建深度与功能协同、具有三维有机互联特征的地下空间网络，成为推动地下生态城市从概念探

讨走向工程实践的核心议题之一。

积极寻求跨学科的理论创新与方法论，才能支撑突破上述瓶颈。仿生学作为从自然界亿万年进化智慧中获得灵感的交叉学科，被视为解决此类复杂系统构建难题的有效途径之一；解析生物体在复杂环境中通过演化而得到的卓越结构与自适应机制，为工程方案创新提供原理性启示与创意源泉。源于蚁群集体行为的仿生学智能算法即为其中的典型。例如，蚁群优化算法自提出后衍生了蚁群系统、最大-最小蚂蚁系统等改进模型，能够模拟蚁群通过信息素进行局部通信与协同进而自组织地涌现出全局最优路径的能力；在机器人导航、物流调度、网络路由等复杂优化问题上展现出良好的应用效能，验证了蚁群智慧在解决空间布局和路径优化问题上的普适性与鲁棒性^[21-23]。更为深远的是，在构建高效物流、韧性结构、自适应的地下生态城市三维形态时，同样可以超越算法层面，直接借鉴蚂蚁巢穴这一物理原型蕴含的形态生成智慧。蚂蚁巢穴中的螺旋竖井、椭球体洞室及其有机互联的拓扑网络，正是在长期自然选择下优化形成，兼顾力学稳定、能耗节约、功能协同的“三维蓝图”，为破解地下城市形态设计瓶颈提供了仿生学原型与工程启发。

传统的三维形态设计方法在面对未来地下生态城市的复杂需求时暴露出瓶颈。① 空间协同性不足，规划多为刚性功能分区，缺乏动态、弹性的拓扑连接，导致不同深度的空间开发碎片化，难以形成高效协同的整体系统甚至引发设施冲突。② 力学稳定性考虑不够全面，忽略地应力随深度和空间形态的动态变化，缺乏主动的应力管理策略；尤其在深度>500 m时，沿用传统的洞室形态会面临极高的岩爆、塌方风险。③ 能源与环境效率低下，空间形态设计与能源系统（如地热和通风）、环境调控系统脱节，不当的空间形态设计会进一步增加通风、照明等子系统的运营能耗，致使整体运营能耗居高不下。④ 系统韧性薄弱，依赖树状或中心辐射状结构，一旦关键节点受损极易引发局部甚至整体功能瘫痪，缺乏在灾害或故障后快速恢复的冗余与自适应能力。

面向地下生态城市三维形态设计方法论的缺失，根源在于传统工程思维与未来城市系统复杂性要求之间存在“鸿沟”。解决这一核心瓶颈，不应延续现有技术的线性改进，而是亟需从工程思维到

系统思维、从“机械构建”到“有机生长”的范式转变。为此，倡导运用跨尺度仿生理念，作为连接生物学智慧、工程学创新的“桥梁”，为地下生态城市构建研究提供方法论借鉴。

三、基于跨尺度仿生思想的地下生态城市三维形态构建范式

蚁类等地下穴居群体挖掘并管理远大于自身单体的巨型地下空间，蕴含的生物学智慧是高效、可持续、韧性地开发地下空间并有效管理复杂的地下空间系统。相较蜜蜂巢穴的网格结构，蚂蚁巢穴的螺旋形态更适合深地应力管理，也能提供更高的普适性和可移植性。这是本研究提出地下生态城市构建新范式的灵感来源。采用“识别卓越生物原型→解析性能实现机制→凝练普适性设计原则→转化为可实施的工程蓝图”的基本逻辑，完整发展基于跨尺度仿生理念的地下生态城市构建方法论。

（一）生物原型与机制解析：蚂蚁巢穴的深层智慧

自然界中的生物结构经过亿万年的进化与优化，在应力管理、能耗优化、系统协同等方面形成了卓越机制，为人类工程技术创新提供了有用借鉴。蚂蚁构筑的地下巢穴以其复杂的几何形态、优良的结构稳定性，成为地下工程与岩土领域的仿生研究对象。蚂蚁巢穴方面的开创性工作为2004年针对佛罗里达收获蚁巢穴结构的精细化观测与描述^[24]，随后开发了蚂蚁巢穴的石膏铸造技术以更精确地获取复杂地下三维结构^[25]，进一步总结了蚂蚁巢穴的建筑之美与科学原理^[26]。当前的研究前沿转向揭示蚂蚁巢穴稳定性的力学机理并挖掘工程仿生价值。例如，应用原位铸造、三维扫描技术构建了蚂蚁巢穴的数字化模型，发现巢穴主通道的螺旋几何形态可更加有效地分布应力、降低破坏风险，且挖掘能耗低于垂直竖井，为隧道工程断面设计与开挖策略优化提供了启示。还有研究深入到蚂蚁巢穴内部腔室的复杂空间布局及其协同稳定机制^[27]，发现腔室的空间分布能够诱发增强的成拱效应，显著提升整个巢穴系统的宏观力学稳定性^[28]。

本研究选取收获蚁的巢穴作为生物学原型。收获蚁的主井道呈现优化的螺旋形态，这种特定的螺旋几何可发挥“应力屏蔽”效应，高效率地将集中

应力转化为沿骨架连续传递的宏观压应力，进而显著均匀化应力分布并提升结构稳定性。从能量视角看，螺旋路径相较垂直路径可显著降低向上搬运物质的瞬时能耗，体现出自然选择对建造过程能耗、最终结构性能的一体化优化。整体上，从蚂蚁巢穴结构解析到力学模拟再到工程启发的一系列成果，标志着仿生岩土工程逐步从概念观察走向定量分析与实践应用，为开发更节能、更稳定、更智能的地下构筑物提供了方法设计层面的新构思。

（二）核心原则凝练：从生物学智慧到城市哲学

1. 核心原则

在蚂蚁巢穴机制解析的基础上，本研究超越具象的形态模仿，凝练了未来地下生态城市系统构建的核心原则。

（1）韧性设计原则

蚂蚁巢穴在部分被破坏后，蚁群能够迅速修复通道甚至改变网络拓扑，保证巢穴整体功能不瘫痪，这是韧性设计的生物范式。相应仿生采纳点在于，可不再追求工程系统永不损坏的绝对刚性，而是追求损坏后能快速恢复的系统韧性。工程转化路径在于，在城市交通、能源、信息、给排水等“生命线”网络设计中，摒弃单一的树状结构，转而构建具有多重并联回路、备用路径、自适应调度能力的冗余网状系统，模仿生态系统的鲁棒性以从容应对地质灾害、人为事故、突发故障的冲击。

（2）可持续循环原则

自然界中不存在“废物”，一个系统的输出必然是另一个系统的输入。蚂蚁巢穴可通过被动式设计（如蚁丘的烟囱效应）来精密调节巢穴内部的温度和湿度，支持实现极高的能量与物质利用效率，这是可持续循环的生物范式。相应仿生采纳点在于，将城市线性代谢的“资源-产品-废物”模式转变为循环再生的“资源-产品-再生资源”闭环模式。工程转化路径在于，构建城市的新陈代谢系统，高效开展针对废水、废弃物、工业余热等的资源化回收与梯级利用；广泛采用基于自然动力（如温差、气压差）的被动式采光、通风、温控技术，以最大限度地降低建筑运营能耗，趋近蚂蚁巢穴的低能耗稳定状态。

（3）分布式智能原则

大脑没有中央控制器，而是由亿万个神经元通

过局部连接来协同工作，蚁群同样表现出由简单个体通过信息素（局部通信）自组织地涌现的集体智慧，这是分布式智能的生物范式。相应仿生采纳点在于，智能可以且应该源于简单个体基于局部信息和规则的交互，而非依赖全知全能、易出现单点故障的中央控制器。工程转化路径在于，摒弃传统的“中央控制-集中处理”模式，构建去中心化的物联网、智能电网、交通流管理系统，使每个传感器、储能单元、智能家居、车辆都成为具有局部感知、计算、决策能力的智能节点，通过近场通信与协同合作，“自下而上”地涌现出系统全局的高效、弹性与自适应。

2. 新范式特性

本研究的范式突破并非源自对现有理论的线性补充或改进，而是从工程思维到系统思维、从被动适应到主动塑造的根本性转变。

（1）从利用空间到塑造系统

传统范式表现的是机械论、加法式的思维，将地下空间视为需要加固和填充的消极容器，核心是“挖洞”，然后在洞内布置功能。本研究范式表现的是生物论、生成式的思维，将地下空间视为可以“呼吸”“生长”“代谢”的积极生命系统，超越“挖洞”层次，像生物体一样“生长”出结构、能源、物流、生态相集成的有机整体。推动跨尺度仿生思想指导设计的地下生态城市进化出“类人”特征，关键在于整合物理域、信息域、仿真域的协同作用，融合物联网、数字孪生、人工智能等技术，构建“感知-分析-决策-进化”闭环体系，形成具有自主进化能力的地下生态城市系统^[29]。

（2）从形态追随功能到形态追随力学、能量与生态

传统范式遵循形态追随功能，在预先划定功能分区后设计结构形态，往往导致形态特性与地质力学、环境能耗等严重脱节。本研究范式倡导形态追随力学、能量与生态，认为形态设计首先需要考虑主动适应不同深度地应力特征（力学）、最小化运输与调节能耗（能量）、促进资源循环（生态），而功能设计被有机嵌入优化后的物理和生态框架。这意味着城市形态不再是对功能需求的静态妥协，而是对地底环境施加的力学、能量与生态约束进行动态求解后呈现的最优解。

(3) 从中心化控制到分布式智能

传统范式依赖“自上而下”的中心化设计与控制，在面对城市或宏观尺度的地下生态城市时往往引发系统脆弱、适应能力不足。本研究范式借鉴蚁群等自然系统的自组织机制，推崇分布式智能原则，在地下生态城市的不同深度功能分区中部署多个分布式控制器，形成由数量众多的智能单元开展局部交互、“自下而上”涌现全局韧性、具有高效运行特征的整体系统，使城市具备类似生命体的自适应与自修复能力。

(三) 三维战略蓝图：深度可扩展、形态随深度自适应演变的地下生态城市

本研究依托上述生物学智慧、设计原则和既有工程经验，提出了深度可扩展的地下生态城市三维战略蓝图。无需预设固定的深度，而是将仿生形态（螺旋竖井、椭球体洞室）作为深度的函数进行系统性、自适应性应用，以灵活响应不同地层条件（如地应力状态、地热分布具有差异性）。地应力随着赋存深度的增加而显著增大且呈现非线性（对数型）增长趋势^[30]，结构形态也从适应浅层地表功能的过渡形态逐步演进为深部高地应力环境下力学效率最优的形态。螺旋竖井作为贯穿整个系统的“生命线”，用于有机整合不同深度的最优形态单元，实现力学稳定与功能协同（见图1、表1）。

采用缓坡设计的螺旋竖井承担“脊柱”功能，不仅提供力学性能优越的竖向连接，而且显著优化垂直交通能耗、自然形成通风与管线布设的廊道；将各深度区间内形态局部最优的水平洞室整合为力学上稳定、功能上协同、逃生路径安全、具备高度扩展灵活性的三维有机整体。已有研究^[30]发现，深部岩石力学特性表现出显著的深度依赖性，即随着赋存深度的增加，原位应力水平显著升高，导致岩

石强度呈非线性（对数型）增长；岩性、应力状态、峰后行为发生明显转变，岩石表现出脆性向延性转化、泊松比升高、应变硬化、峰后跌落模量下降等特征。为此，可采用“矩形→拱形→椭球体→球体”延深度的演变设计，以获得各深度区间内水平洞室的形态局部最优方案；成功结合了蚂蚁巢穴中体现的生物学智慧与既有工程实践，支持从微观形态仿生到宏观城市系统重构的理念跨越。

值得指出的是，本研究提出的针对宏观尺度的地下生态城市设计理论，与现有针对局部功能的小尺度地下空间设计理论是兼容的，具体工程实践中的小尺度地下空间设计仍应依据特定功能需求与场地条件进行细化处理。相应的仿生形态蓝图可视为参数化生成框架而非固定模板：螺旋竖井的曲率、螺距，椭球体或球体洞室的纵横比、空间拓扑网络等核心参数可以（也应当）与具体场地的地应力场、岩体质量、水文地质条件等建立动态关联，构建“地质-形态”响应模型，应用数值模拟软件进行迭代优化，实现形态对复杂地质条件的自适应调节能力（如在高的各向异性应力场中，调整椭球体长轴方向以匹配主应力方向，优化围岩稳定性）。

(四) 工程实践佐证：从概念到现实可行性验证

地下生态城市的仿生构想源自生物界的现实原型，关键环节的初步可行性验证可参照国内外的前沿工程实践，从生物学智慧到工程现实的路径是畅通的。

1. 北山地下实验室——螺旋隧道掘进技术突破
 位于甘肃省的北山地下实验室是国家“十三五”重大科技基础设施，也是世界上规模最大、功能最全的地下实验室之一，在建设过程中成功应用了自主研发的大规模螺旋隧道硬岩掘进机（TBM）^[31-33]，突破了在极硬岩地层中构建大型螺旋结构的世界性

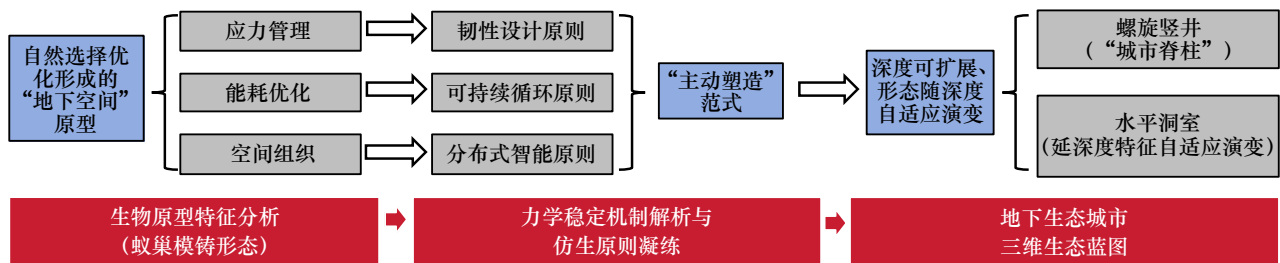


图1 基于跨尺度仿生思想的地下生态城市构建新范式

表1 地下生态城市三维生态蓝图核心要点

深度区间	功能定位	仿生形态	战略价值	核心挑战	蓝图示意
浅层融合层 (0~50 m)	城市交通枢纽、商业活力中心、应急避难所，快速连接与服务于地表城市	螺旋竖井（主入口与垂直干线）+部分采用矩形/拱形大断面洞室	实现地上地下功能无缝衔接，缓解地表压力	在城市建成区实施时有效控制地面交通、建筑的影响	
宜居生活层 (50~100 m)	社区居住、公共休闲、医疗养护，营造舒适、健康、无压抑感的长期居住环境	螺旋竖井（社区光庭与中心）+广泛采用椭球体大断面洞室	提供高质量的地下居住空间，证明地下宜居性	“仿生阳光”模拟系统的能耗与心理接受度，超大空间声学与导向性	
生态储备层 (100~500 m)	垂直农业、战略资源储备、高安全数据中心，利用深部恒温恒湿、高稳定性与隔离性	螺旋竖井（物资运输与通风主干）+优先采用球体断面洞室	保障城市基本“生命线”，提升城市功能韧性	岩爆与高地应力的实时监测与主动防控，球形储库的长期密封性	
能源生产层 (500~2000 m)	增强型地热系统、抽水蓄能、大型能源站，规模化开发与储存深地能源	螺旋竖井（能量与物质传输“动脉”）+全面采用球体断面洞室	实现能源自给与输出，保障城市持续可靠运行	高温（>150℃）、高压环境下材料耐久性、施工技术与经济性	
前沿科研层 (2000~2500 m)	前沿物理实验、深地医学、极端环境资源流态化开采试验，利用无阳光、无干扰、微振动的极端条件	螺旋竖井（通往科学前沿的“终极通道”）+极致化应用球体断面	成为国家和世界级的基础科学研究平台	人类可达性极低而依赖远程作业与自治机器人，极端条件下的设备可靠性，工程伦理与安全规制	

技术难题，验证了深地螺旋通道工程的可行性（见图2）。北山地下实验室的工程实践表明，构建大型深地螺旋交通与结构网络在工程技术上是完全可行的，为本研究提出的螺旋竖井仿生形态构建提供了直接的技术借鉴和有利的工程信心。

2. 芬兰 Callio FutureMINE——深地空间多功能利用的范式雏形

芬兰皮海湖地区的地下矿井是欧洲最深的地下矿井，在停止采矿后转型为深地技术试验场 Callio FutureMINE（见图3）。利用深度1500 m的极端地下环境，提供了面向下一代采矿、自动化、安全、数据中心等的测试和验证平台^[34,35]。将单一的深地工业空间转型为多功能、高附加值的综合开发利用，验证了深地空间在隔离、安全、恒温恒湿等方面的独特价值，成为深地空间多功能利用的范式雏形，也为本研究规划的生态储备层、前沿科研层等深地功能提供了直接的运营模式借鉴。

（五）仿生构建新范式：尺度、目标和原理跨越

本研究的新颖之处在于超越单一尺度、单一结

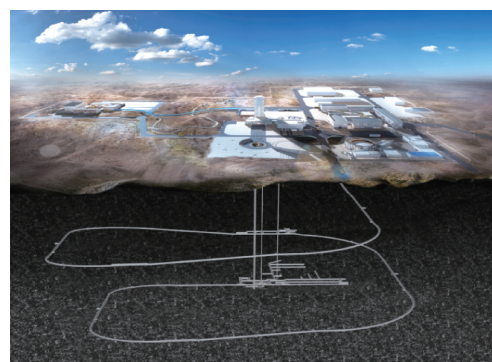


图2 北山地下实验室空间示意图



图3 芬兰 Callio FutureMINE 深地技术试验场

构、单一算法层面的“模仿”，追求从使用仿生学转向系统性地使用仿生学，将生物学智慧应用于复杂巨系统构建，建立了从自然原型中提取跨尺度、普适性设计原则并转化为可指导行星尺度工程设计方案的方法论。以蚂蚁巢穴为方法论构建的生物学蓝本，并非直接提供一种规则且标准的工程设计方案，而是提出从生物学智慧中提取普适性设计方法论的范式。跨尺度仿生系统构建方法论是开放和可扩展的，以此为“元规则”，未来可吸纳更多种生物原型（如鼯鼠巢穴、植物根系、蜜蜂巢穴）的智慧，持续丰富未来地下城市的设计灵感。

实现了从微观几何到宏观拓扑的尺度跨越。传统的仿生工程通常聚焦单一尺度，如模仿荷叶表面的微观结构制造超疏水材料、参考蜜蜂巢穴的介观结构制造轻质夹层板。本研究构思了从微观的几何形态（如螺旋通道的曲率、椭球体的曲率半径）到介观的结构体系（如腔室群的联合拱效应）再到宏观的城市拓扑网络（如贯穿2500 m深度的螺旋脊柱与分布式洞室网络）的全尺度贯通，超越了模仿“零部件”的仿生层次，提出了将“零部件”组装成“生命体”的仿生蓝图和准则。

实现了从结构仿生到系统仿生的原理跨越。传统的仿生工程集中于结构/材料仿生（如仿生复合材料）、信息/算法仿生（如蚁群算法用于路径优化）。本研究将仿生对象从静态结构提升到动态生命系统，认为蚂蚁巢穴不仅是建筑，更是具备代谢（通风和温湿调节）、循环（物质运输）、神经（分布式智能）等维度要素的生命系统；在对这个生命系统进行核心特征抽象后有机应用于城市系统，提炼出韧性、可持续循环、分布式智能等未来地下生态城市系统构建的核心原则。

实现了从地球到地外的目标跨越。传统的仿生工程应用目标与解决方案多聚焦地球环境，致力于解决重力、大气、温度、压力等地球常态条件下的特定功能问题，本质上是带有鲜明的“地球依赖性”的设计范式。本研究提出的仿生框架具有普适性与可移植性，将源于地球生物的基本原理拓展运用到解决地球（深地）、地外（深空）的极端环境居住问题，从而将地球与地外挑战应对统一到同一个仿生框架下。

四、地下生态城市仿生构建发展要素

一方面，构建地下生态城市是一项远超传统土木工程的复杂系统科学，核心挑战是在千米级深地与全封闭条件下创造稳定、高效、宜居且能自我持续的生命支撑系统，需要突破传统技术范式，构建贯通“感知-建模-调控-决策”全生命周期的下一代关键技术生态系统。另一方面，构建地下生态城市并非单纯的工程技术课题，面临着一系列复杂、交织的管理性挑战，如经济可行性、社会接受度、治理有效性，需要构建与之适配的综合性管理框架，与技术性要素共同支撑地下生态城市蓝图从愿景走向现实。当然，技术性、管理性两类要素是深度耦合、互为前提的辩证统一体。地下生态城市仿生构建追求分布式智能，要求管理框架去中心化并保持韧性；可持续循环原则也需要与之适配的循环经济模式与绿色金融工具。推动地下生态城市建设，需要采用“技术-社会-法制”协同设计，使技术创新与制度创新同步演进，确保宏大系统的稳健构建与长期繁荣。

（一）技术性要素

1. 深层探测与透视感知技术

作为蓝图实施的“眼睛”，该技术旨在破除地下空间的“黑箱”状态。传统的地球物理方法在感知深部复杂地质体的分辨率与精度上存在局限性。需要引入以缪子成像为代表的革命性非侵入探测技术，可利用宇宙射线穿透千米级岩层，实现对大型空洞、裂缝、密度异常体的“透视”^[36-41]。结合人工智能增强的深地地球物理勘探（如高精度地震波层析成像）与钻探验证，构建多尺度、多维度的地下数字地质模型^[42,43]。这些举措相当于对千米级深度的地下结构进行大范围、高分辨率的“计算机断层扫描”，为城市选址规避地质风险、优化洞室布局提供“透明化”的地质视野，促成地下生态城市的精准布局与设计。

2. 智能建造与柔性支护技术

作为蓝图实施的“双手”，该技术事关构想物理成型的可行性。传统的掘进与支护技术难以适应深部高地应力、复杂水文条件、仿生螺旋/球体等非标形态。需要发展具有地质自适应能力的智能掘进装备，实时感知围岩变化并动态调整掘进参数，

以最小损伤、最高精度“雕刻”出复杂的仿生结构网络。支护体系也需从被动承载转向主动适应与自我修复。发展基于微生物矿化、微胶囊自修复剂的智能材料，赋予混凝土结构在出现微裂缝时的自主愈合能力^[44-46]。研发集成传感器、作动器的柔性支护系统（如智能锚杆），可根据应力变化进行支护力的主动调节^[47,48]。以具有“智慧生长”特质的新一代建造体系保障地下生态城市工程建造的长期本质安全与韧性。

3. 深地环境智能调控技术

作为宜居与循环的“肺腑”，该技术用于模拟并优化封闭生态系统的代谢过程。深地环境缺乏自然阳光与空气对流，而传统的环境控制能耗极高。需要融合被动式设计 with 主动式调控：模仿蚂蚁巢穴的烟囱效应与热质交换原理，通过仿生形态设计来优化自然通风与热循环路径，最大限度地降低基础能耗；构建分布式智能环境调控网络，通过广泛分布的传感器与执行器（智能代理），对温度和湿度、空气质量、全光谱动态光照（模拟昼夜节律）等进行精细化、协同化管控^[49-51]。耦合应用地热能、农业光生物技术等主动能源，创建低能耗、高舒适度、稳定农业生产的类地生态环境^[2]。

4. 数字孪生与全生命周期管理平台

作为城市运行的“神经中枢”“决策大脑”，该平台支持深层探测与透视感知、智能建造与柔性支护、深地环境智能调控等技术部署，成为技术协同与系统级智能的载体。需要构建与物理城市同步生成、实时映射、双向交互的高保真数字孪生体，融合源自建筑信息模型、地理信息系统、物联网的海量数据流，嵌入人工智能分析与预测模型^[52-54]。在规划阶段进行多方案模拟推演，在建造阶段执行进度、质量、安全方面的数字管控，在运营阶段开展能源流、物质流、信息流的实时监控与机器学习以支持故障预测、能效优化、应急指挥、资源自适应调度，最终实现地下生态城市的全生命周期闭环管理。该平台既是城市系统运维工具，更是支撑分布式智能管控、保障自主优化与持续进化的核心基础设施。

（二）管理性要素

1. 构建“地表-地下”一体化的空间治理新模式
地下生态城市构建将催生全新的立体化社会空

间，对现行法律与管理框架构成冲击，以空间权属的界定为核心挑战。当前的法律体系对地下空间深度的使用权界定模糊，需要探索和创立适用于纵深千米级的空间分层确权制度，逐步明确国家、地方、开发主体、公众的权利与义务。地下生态城市涉及国土、能源、住建、交通、国防、应急、生态环保等管理部门职责，也需构建“国家主导、部际协同、央地联动”的管理框架。可探索设立地下生态城市开发与管理统筹协调机构，建立创新激励导向的监管沙盒机制，在保障安全底线的前提下为新技术和新业态的创新、试错、示范等提供具有弹性的政策空间。也应超越地上、地下二元分治的传统管理思维，探索构建“地表-地下”一体化的协同管理新框架，如建立跨部门、跨层级的地下城市管理机构，制定专门的地下城市安全法规、环境标准、数据主权级网络安全法案。最终形成确保地下城系统高效安全运行、激发社会内生活力的现代化管理体系。

2. 前瞻应对“地下文明”社会心理学实验

将大规模人口迁入长期与地表隔离的深层地下环境，必然是一场前所未有的社会心理学实验，涉及人类对封闭空间、缺乏自然昼夜节律、远离天空的深层心理适应问题。需要前瞻性、持续性地研究长期地下生活对社会群体结构、文化心理、身份认同、哲学观念等可能产生的影响，如在缺乏自然阳光和开阔视野的环境中预防并缓解群体性心理压抑，积极演变地下社会的文化符号、艺术表达和节日庆典等。应当超前研究并适时制定面向地下城市生活的社会适应指南、心理支持预案、文化建设战略，适度开展公众科普与体验式营销，逐步培育社会心理认同。也应建立审慎的伦理规范，明确极端情况下资源分配的优先次序、个人自由与集体安全的边界等核心伦理准则，确保技术进步始终服务于人的福祉与发展。

3. 探索创新发展机制与价值评估体系

推动地下生态城市建设，超长周期、超大规模的投资特性与传统商业模式存在矛盾是直接挑战之一。单个地下城市项目投资为千亿元级、回报周期为数十年，远超常规市场主体的承受能力，需要在投融资模式等方面探索创新发展机制。设计“国家队引领、社会资本共担、长期资金护航”的混合型融资结构，综合运用开发性金融、绿色债券、不动

产投资信托基金以及专门针对未来产业的主权财富基金等多元金融工具。突破传统基建项目的经济评价框架，建立涵盖战略安全、能源自主、碳排放权、空间价值、科技创新溢出效应等的综合效益评估体系，将地下城市的正外部性内部化，以真实反映此类项目的全生命周期价值，进而吸引多元化的社会投资。

五、结语

本文关注和倡导的地下生态城市构建范式转型，并不是单纯的技术迭代，而是面向认知革命与文明转型，从工业文明时代“征服自然”的机械论思维转向生态文明背景下“与自然协同”的有机生成论思维。不再将地下空间视为需要被“对抗”“填充”的消极客体，而是将之作为能够“呼吸”“生长”“共生”的生命系统来进行主动塑造。这种塑造而非利用的新范式，显现了对构建未来宜居地球与地外家园的哲学思考，代表了人类从星球的“寄居者”向“悉心营造者”角色的转变。本研究提出的战略框架、三维蓝图、技术与管理体系，体现出系统思维、自然启发、智能赋能的融合，为破解超大城市发展困境、拓展人类生存疆域等研究提供了新思路；不仅是地下城市建设的技术蓝图，而且是更加智慧且可持续地与地球、地外环境和合共生的发展构想。

推动地下生态城市相关的技术与产业发展，宜采取“技术攻关—集成示范—全面构建”的渐进式路径，制定阶段性发展目标。在10年周期内，聚焦仿生TBM、闭环生态系统等开展技术原理突破与模块化验证，依托既有的深地实验室建立地下生态城市概念验证区。在进一步的15年周期内，在超大城市建设功能复合的中等深度（500~1000 m）先导示范区，实施能源、生态、居住等子系统的集成运营；在更进一步的25年周期内，建设大深度（2500 m）、全尺度的地下生态城市，形成可拓展至月球、火星的标准化技术包与建设模式。为此，建议在4个方面采取积极行动。① 设立“深地生态城市系统”前沿导向或重点专项，纳入国家科技与空间规划顶层设计，合力攻关仿生TBM、深地闭环生态系统、数字孪生平台等核心技术。② 依托超大城市或国家级深地实验室，启动地下生态城市概念

验证区或先导示范区建设，在实践中检验、优化并完善理论方法。③ 设立“深地科学与仿生工程”交叉学科，促进土木工程、生物学、人工智能、材料科学、环境工程、社会科学的深度融合，培养具备系统思维和创新能力的复合型科技人才。④ 将地下生态城市构建范式纳入国家深空探测的中长期规划，开展地外天体地下栖息地的预先研究；在国际合作框架下推动深地开发的国际标准与规则制定。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 16, 2025; **Revised date:** January 11, 2026

Corresponding author: Chen Xiangsheng is a professor from Underground Polis Academy of Shenzhen University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include the fundamental theories of resilience in underground spaces of megacities, and intelligent construction and operation-maintenance technologies for underground engineering. E-mail: xschen@szu.edu.cn

Funding project: National Natural Science Fund Project (52090084); Chinese Academy of Engineering project “2025 Annual Research on China’s Urban Underground Space Development” (2025-HZ-08), “Comprehensive Development, Efficient Utilization, and Digital Intelligence Governance of Underground Space in Megacities” (2024-JZ-06)

参考文献

- [1] 央广网. 深地经济概念活跃 新经济带来哪些板块新热点 [EB/OL]. (2025-09-17)[2026-01-15]. <https://www.cnr.cn/2025-09-17>. China National Radio. Active deep earth economy concept: What new hotspots does the new economy bring [EB/OL]. (2025-09-17)[2026-01-15]. <https://www.cnr.cn/2025-09-17>.
- [2] 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 H P, Gao M Z, Zhang R, 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.
- [3] 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 H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1-8.
- [4] Xie H P, Zhang Y H, Chen Y Y, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103651.
- [5] Soureshjani O K, Massumi A, Nouri G. Sustainable colonization of Mars using shape optimized structures and in situ concrete [J].

- Scientific Reports, 2023, 13: 15747.
- [6] Feng Y J, Pan P Z, Tang X H, et al. A comprehensive review of lunar lava tube base construction and field research on a potential earth test site [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(9): 1201–1216.
- [7] Carrer L, Bruzzone L, Bosch J J, et al. Radar evidence of an accessible cave conduit on the moon [J]. *Nature Astronomy*, 2024, 8(8): 995–1002.
- [8] 梁乐. 火星上建基地, 如何就地取材 [N]. *科技日报*, 2024-10-24 (06).
Liang L. How to build a base on mars using local materials [N]. *Science and Technology Daily*, 2024-10-24 (06).
- [9] Fishman C. Everyone wants a piece of the moon—What could go wrong [EB/OL]. (2025-08-18)[2026-01-15]. <https://www.nationalgeographic.com/science/graphics/moon-base-exploration-lunar-surface>.
- [10] 刘霞. 合成生物学能将火星打造成宜居家园吗 [N]. *科技日报*, 2025-05-12 (04).
Liu X. Can synthetic biology turn mars into a habitable home? [N]. *Science and Technology Daily*, 2025-05-12 (04).
- [11] Zhou C, Cheng S S, Gao Y Y, et al. Zhuque base for martian habitation: Conceptual design and performance analysis of cave dwellings and in situ construction [J]. *Research*, 2025, 8: 0849.
- [12] Xia Y F, Gao Y Y, Han W B, et al. Lunar base infrastructure construction: Challenges and future directions [J]. *Automation in Construction*, 2025, 176: 106251.
- [13] von der Tann L, Sterling R, Zhou Y X, et al. Systems approaches to urban underground space planning and management—A review [J]. *Underground Space*, 2020, 5(2): 144–166.
- [14] von der Tann L, Ritter S, Hale S, et al. From urban underground space (UUS) to sustainable underground urbanism (SUU): Shifting the focus in urban underground scholarship [J]. *Land Use Policy*, 2021, 109: 105650.
- [15] Peng F L, Dong Y H, Wang W X, et al. The next frontier: Data-driven urban underground space planning orienting multiple development concepts [J]. *Smart Construction and Sustainable Cities*, 2023, 1(1): 3.
- [16] Peng F L, Wang W X, Qiao Y K, et al. Review on data-informed planning for underground space [J]. *Underground Space*, 2026, 26: 257–281.
- [17] Dempster W F. Biosphere 2 engineering design [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 13(1/2/3/4): 31–42.
- [18] Nelson M. Biosphere 2's lessons about living on earth and in space [J]. *Space: Science & Technology*, 2021: 8067539.
- [19] Allen J P, Nelson M, Alling A. The legacy of biosphere 2 for the study of biospherics and closed ecological systems [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(7): 1629–1639.
- [20] Dinell H, Mathis K, Bronstein J. Biosphere 2 reexamined: Ant species composition within a human-constructed ecosystem [J]. *The Southwestern Naturalist*, 2023, 68(2): 150.
- [21] Dorigo M, Stützle T. *Ant colony optimization* [M]. Cambridge: MIT Press, 2004.
- [22] Dorigo M, Birattari M, Blum C, et al. *Ant colony optimization and swarm intelligence* [R]. Brussels: The 6th International Workshop, ANTS 2008, 2008.
- [23] Liu M J, Li Y H, Li A, et al. A slime mold-ant colony fusion algorithm for solving traveling salesman problem [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 202508–202521.
- [24] Tschinkel W R. The nest architecture of the Florida harvester ant, *Pogonomyrmex badius* [J]. *Journal of Insect Science*, 2004, 4: 21.
- [25] Tschinkel W R. Methods for casting subterranean ant nests [J]. *Journal of Insect Science*, 2010, 10: 88.
- [26] Tschinkel W R. *Ant architecture: The wonder, beauty, and science of underground nests* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2021.
- [27] Belachew M, Yamamoto K, Nichols E, et al. Ant nest geometry, stability, and excavation—inspiration for tunneling [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(3): 1295–1313.
- [28] Belachew M, Arson C, Frost J D. Insights from studies on the spatial distribution of chambers in ant nests [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, 1480(1): 012100.
- [29] 韩凯航, 黎俊轩, 陈湘生, 等. 超大城市地下空间系统智慧韧性发展策略研究 [J]. *中国工程科学*, 2025, 27(4): 95–105.
Han K H, Li J X, Chen X S, et al. Development strategy for intelligent resilience of underground space system in megacities [J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(4): 95–105.
- [30] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(2): 217–232.
Xie H P, Li C B, Gao M Z, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 217–232.
- [31] 王驹, 云龙. 高放废物地质处置地下实验室的定义、分类和功能以及我国北山下实验室的科研规划 [J]. *物探与化探*, 2024, 48(6): 1507–1518.
Wang J, Yun L. Definition, classification, and functions of underground research laboratories for the geological disposal of high-level radioactive waste and the scientific research plan of Beishan underground research laboratory [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(6): 1507–1518.
- [32] 云龙, 王驹, 杨晓平, 等. 高放废物处置地下实验室结构稳定性评价方法 [J]. *世界核地质科学*, 2025, 42(1): 110–122.
Yun L, Wang J, Yang X P, et al. Structural stability evaluation method of underground research laboratory (URL) for geological disposal of high-level radioactive waste in China [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2025, 42(1): 110–122.
- [33] 云龙, 陈苏, 傅磊, 等. 高放废物北山地下实验室洞室群地震动反应特征研究 [J]. *物探与化探*, 2024, 48(6): 1519–1529.
Yun L, Chen S, Fu L, et al. Seismic response characteristics of the cavern group of the Beishan underground research laboratory for the geological disposal of high-level radioactive waste [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(6): 1519–1529.
- [34] Joutsenvaara J, Puputti J, Holma M, et al. Callio lab: An underground and above ground, laboratory—Overview and prospects for high energy and applied physics [J]. *Frontiers in Physics*, 2024, 12: 1317659.
- [35] Joutsenvaara J, Aittola M, Holma M, et al. The deep underground Callio SpaceLab, Finland—Sustainable living, sustaining life [R]. Online: EGU General Assembly Conference, 2021.
- [36] Saracino G, Amato L, Ambrosino F, et al. Imaging of

- underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples) [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1181.
- [37] Benhammou Y, Weissbein A, Zolkin I. First demonstration of underground muon imaging at an archaeological site in ancient Jerusalem [J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(8): 084504.
- [38] 张双全. 二维大地电磁各向异性理论与反演 [D]. 长春: 吉林大学(硕士学位论文), 2021.
- Zhang S Q. Theoretical and inversion research of magnetotelluric fields in two-dimensional anisotropic media [D]. Changchun: Jilin University (Master's thesis), 2021.
- [39] 肖万成, 罗思远, 何列, 等. 基于缪子成像技术对浅层与深层地质结构的模拟研究 [J]. *核技术*, 2024, 47(9): 090201.
- Xiao W C, Luo S Y, He L, et al. Simulation study on shallow and deep geological structures based on muon imaging technology [J]. *Nuclear Techniques*, 2024, 47(9): 090201.
- [40] 黄力平, 雷江松, 宋天田, 等. 高能宇宙线缪子成像技术在盾构隧道中的应用 [J]. *现代隧道技术*, 2025, 62(5): 251-258.
- Huang L P, Lei J S, Song T T, et al. Application of high-energy cosmic ray muon imaging technology in shield tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2025, 62(5): 251-258.
- [41] 姚凯强, 苏宝鹏, 李卓岱, 等. 宇宙射线缪子成像技术在中国的研究进展 [J]. *中国无机分析化学*, 2024, 14(6): 715-731.
- Yao K Q, Su B P, Li Z D, et al. Research progress of muography in China [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2024, 14(6): 715-731.
- [42] 王明超, 刘宝鸿, 张斌, 等. 利用高分辨率波阻抗反演技术预测薄储层——以辽河坳陷牛居地区为例 [J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 186-190.
- Wang M C, Liu B H, Zhang B, et al. Thin bed prediction with high-resolution impedance inversion: A case study of Niuju Area, Liaohe Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 186-190.
- [43] 王华, 张雨顺. 测井资料人工智能处理解释的现状与展望 [J]. *测井技术*, 2021, 45(4): 345-356.
- Wang H, Zhang Y S. Research status and prospect of artificial intelligence in logging data processing and interpretation [J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45(4): 345-356.
- [44] 李根生, 宋先知, 田守嵘. 智能钻井技术研究现状及发展趋势 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 1-8.
- Li G S, Song X Z, Tian S C. Intelligent drilling technology research status and development trends [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 1-8.
- [45] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用 [J]. *煤炭学报*, 2007, 32(12): 1233-1238.
- Kang H P, Wang J H, Lin J. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [46] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 1977-1987.
- Kang H P, Niu D L, Zhang Z, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [47] 许益民, 刘占鹏, 高猛, 等. 9000 m 智能钻机关键技术 [J]. *石油机械*, 2019, 47(9): 57-62.
- Xu Y M, Liu Z P, Gao M, et al. Key technology of 9000 m intelligent drilling rig [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(9): 57-62.
- [48] 洪开荣. 超长深埋高地应力TBM隧道修建关键技术 [J]. *铁道学报*, 2022, 44(3): 1-23.
- Hong K R. Key technology for construction of ultra-long and deep-buried TBM tunnels with high geostress [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(3): 1-23.
- [49] 马健. 植物照明LED光源光度系统与光量子系统转化系数的计算和应用 [J]. *照明工程学报*, 2022, 33(5): 110-114.
- Ma J. Calculation and application of conversion coefficient between photometric system and light quantity subsystem of LED light source for plant lighting [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2022, 33(5): 110-114.
- [50] 李阳. 中科生物植物工厂关键技术科技创新和产业化 [J]. *中国农村科技*, 2023 (2): 6-10.
- Li Y. Scientific and technological innovation and industrialization of key technologies of zhongke biological plant factory [J]. *China Rural Science & Technology*, 2023 (2): 6-10.
- [51] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2377-2393.
- He M C, Guo P Y. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2377-2393.
- [52] Zhao Y M, Han Y, Kou Y Y, et al. Three-dimensional, real-time, and intelligent data acquisition of large deformation in deep tunnels [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021 (1): 6671118.
- [53] Tan C H, Ng M, Shaiful D S B, et al. A smart unmanned aerial vehicle (UAV) based imaging system for inspection of deep hazardous tunnels [J]. *Water Practice and Technology*, 2018, 13(4): 991-1000.
- [54] 唐宇译, 叶春丽. 中国科学院智能导钻系统在塔里木盆地6000 m超深井成功完成多项实钻试验 [J]. *测井技术*, 2023, 47(1): 6.
- Tang Y Y, Ye C L. The intelligent pilot drilling system of China Academy of Sciences has successfully completed a number of practical drilling tests in the 6000 m ultra-deep well in Tarim Basin [J]. *Well Logging Technology*, 2023, 47(1): 6.