

“双碳”目标下地质勘查技术发展趋势

李潇，严翔，王振虎，王海军，陈有祥
青海煤炭地质—0五勘探队，青海 西宁 810007
DOI: 10.61369/ERA.12281

摘要： 在全球积极推进“双碳”目标的大背景下，地质勘查技术迎来了全新的发展契机与变革需求。本文深入剖析“双碳”目标对地质勘查行业的深远影响，详细阐述地质勘查技术在清洁能源勘查开发、碳源碳汇调查监测、碳捕集利用与封存以及深部储能等关键领域的发展趋势，旨在为地质勘查行业适应“双碳”时代需求，实现技术创新与产业升级提供理论支撑与实践指导，助力全球“双碳”目标的顺利达成。

关键词： 双碳目标；地质勘查技术；清洁能源；碳汇；碳捕集与封存

Development Trends of Geological Exploration Technology Under the "Dual Carbon" Goals

Li Xiao, Yan Xiang, Wang Zhenhu, Wang Haijun, Chen Youxiang
Qinghai Coal Geology 105 Exploration Team, Xining, Qinghai 810007

Abstract: In the context of global efforts to advance the "dual carbon" goals, geological exploration technology has embraced new development opportunities and transformational needs. This article deeply analyzes the profound impact of the "dual carbon" goals on the geological exploration industry and elaborates on the development trends of geological exploration technology in key areas such as clean energy exploration and development, carbon source and carbon sink survey and monitoring, carbon capture, utilization, and storage, as well as deep energy storage. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for the geological exploration industry to adapt to the needs of the "dual carbon" era, achieve technological innovation and industrial upgrading, and contribute to the smooth achievement of the global "dual carbon" goals.

Keywords: dual carbon goals; geological exploration technology; clean energy; carbon sink; carbon capture and storage

随着全球气候变化问题日益严峻，“双碳”目标，即二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和，已成为全球共识和应对气候变化的关键举措。地质勘查作为资源开发与环境保护的基础性工作，在“双碳”目标实现过程中扮演着举足轻重的角色。一方面，地质勘查技术的创新发展能够为清洁能源的高效勘查开发提供有力支撑，助力能源结构的清洁低碳转型；另一方面，通过对碳源碳汇的精准调查监测以及碳捕集利用与封存（CCS）技术的研发应用，能够有效降低碳排放，提升生态系统碳汇能力。因此，深入研究“双碳”目标下地质勘查技术的发展趋势具有重要的现实意义和战略价值。

一、“双碳”目标对地质勘查行业的影响

（一）能源结构调整驱动勘查方向转变

为实现“双碳”目标，能源结构需从以化石能源为主向清洁能源、可再生能源转型。这促使地质勘查工作重点从传统化石能源勘查向天然气、页岩气、地热能（浅层地温、地热温泉、干热岩等）、铀矿资源等低碳无碳绿色能源勘查转移。例如，随着全球对清洁能源需求的激增，地热能作为一种清洁、可再生的能源，其勘查开发成为地质勘查领域的新热点。地质勘查技术需针对地热能资源的赋存特点，开发更精准、高效的勘查方法，以满足地热能大规模开发利用的需求。^[1]

（二）生态保护需求拓展勘查业务范畴

在“双碳”目标下，生态系统碳汇功能的提升至关重要。地质勘查工作不再局限于资源勘查，还需拓展到碳源碳汇调查监测、生态保护修复等领域。通过综合运用地球物理、地球化学、遥感等技术手段，开展自然资源生态系统中自然碳汇综合调查和潜力评价，探索不同人工干预对自然生态系统碳循环的影响过程和机理。如利用卫星遥感技术监测森林、草原等植被覆盖变化，评估其碳汇能力的动态变化，为生态保护修复和碳汇提升提供科学依据。

（三）技术创新要求推动勘查技术升级

“双碳”目标的实现依赖于一系列先进技术的支撑，对地质勘查技术的精度、效率和环保性提出了更高要求。传统地质勘查

技术在应对复杂地质条件和高精度勘查任务时存在一定局限性，迫切需要通过技术创新实现升级。在碳捕集利用与封存领域，需要研发高精度的地下空间探测技术，确保二氧化碳封存的安全性和稳定性；在清洁能源勘查中，需运用大数据、人工智能等新技术，提高勘查数据处理与分析效率，优化勘查方案。^[2]

二、“双碳”目标下地质勘查技术发展趋势

（一）清洁能源勘查技术的深化与拓展

1. 多技术融合的精细勘查技术

在天然气、页岩气等能源勘查中，将地球物理、地球化学、地质分析等技术深度融合。利用地震勘探技术精确绘制地下地质构造，通过地球化学方法检测烃类微渗漏，结合地质分析确定储层特征，实现对目标能源的精细勘查。如在页岩气勘查中，采用三维地震成像技术，能够清晰呈现页岩层的分布和结构，配合地球化学分析页岩的含气性，极大提高了页岩气勘查的准确性和成功率。进一步发展多技术协同的智能化勘查平台，通过实时数据融合与分析，实现对勘查过程的动态优化。例如，在地震勘探过程中，利用无人机搭载地球化学探测设备同步采集数据，将地震数据与地球化学数据实时传输至勘查平台进行联合分析，及时调整勘探方案，提高勘查效率。^[3]

2. 深部地热资源勘查技术突破

针对深部干热岩等地热资源，研发耐高温、高压的勘查设备和技术。如超深钻探技术，可钻至数千米甚至更深地层获取地热信息；利用电磁法、重力法等地球物理手段，探测深部地热异常区，确定地热资源的分布范围和潜力。通过这些技术突破，为深部地热资源的大规模开发利用奠定基础，有效增加清洁能源供给。同时，开展深部地热资源勘查与开发一体化技术研究，将勘查过程中获取的地质信息与地热发电系统设计相结合，实现地热资源的高效开发。例如，基于勘查数据优化地热井的布局和深度，提高地热发电系统的热能采集效率。

3. 清洁能源勘查信息化与智能化

借助大数据、云计算、人工智能等信息技术，构建清洁能源勘查数据管理与分析平台。通过对海量勘查数据的实时处理和智能分析，能够快速筛选有利勘查区域，预测能源储量和分布，优化勘查方案。例如，利用机器学习算法对地质数据进行分析，可自动识别潜在的能源储层，提高勘查效率和决策科学性。进一步发展虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术在清洁能源勘查中的应用，通过构建虚拟地质模型，让勘查人员能够沉浸式地分析地质构造和能源分布，更直观地制定勘查计划，提高勘查决策的准确性。^[4]

（二）碳源碳汇调查监测技术的创新发展

1. 空-天-地一体化监测技术体系

整合卫星遥感、航空物探、地面监测等技术，构建全方位、立体式的碳源碳汇监测体系。卫星遥感可获取大面积、长时间序列的植被覆盖、土地利用变化等信息，用于估算生态系统碳汇；航空物探能够快速探测地下碳储存结构和地质构造；地面监测站

点则对局部区域的碳排放、碳吸收进行实时监测。通过多源数据融合与分析，实现对碳源碳汇的精准监测与评估。如利用高分辨率卫星影像监测森林砍伐和造林情况，结合地面通量观测站数据，准确计算森林生态系统的碳收支。在海洋碳汇监测方面，结合卫星遥感海面叶绿素浓度数据、航空物探海底地形地貌数据以及海洋浮标监测的海水碳化学参数，构建海洋碳汇综合监测体系，全面评估海洋生态系统的碳汇能力及其动态变化。

2. 同位素示踪与地球化学监测技术应用

运用同位素示踪技术，追踪碳元素在生态系统中的迁移转化路径，了解碳源碳汇过程。通过分析土壤、水体、大气中碳同位素组成，确定碳的来源和去向，评估不同生态系统的碳循环机制。地球化学监测技术则用于分析土壤、岩石等介质中的有机碳、无机碳含量及其变化，为碳源碳汇调查提供重要数据支持。例如，利用碳-14同位素示踪技术研究土壤有机碳的周转，明确土壤碳汇的形成与变化规律。在岩溶地区，通过地球化学监测岩溶作用对碳循环的影响，分析土壤、水体、岩石中碳的迁移转化过程，为岩溶生态系统碳汇潜力评估提供科学依据。^[5]

3. 动态监测与模拟预测技术发展

建立碳源碳汇动态监测网络，实时获取碳循环相关数据，并利用数学模型对未来碳源碳汇变化进行模拟预测。通过不断优化模型参数，提高模拟预测的准确性，为制定科学的碳减排和碳汇提升策略提供依据。如基于生态系统过程模型，结合气候变化情景，预测不同区域森林、湿地等生态系统碳汇在未来几十年的变化趋势，为生态保护和修复规划提供参考。进一步发展耦合多学科的动态监测与模拟预测系统，将地质、生态、气候等多学科数据进行融合分析，提高对碳源碳汇复杂过程的模拟精度，为“双碳”目标下的政策制定提供更可靠的科学支撑。

（三）碳捕集利用与封存（CCS）勘查技术的强化发展

1. 地下封存空间精细勘查技术

采用高精度地球物理勘查技术，如三维地震成像、可控源音频大地电磁法等，对地下封存空间进行精细勘查。详细查明地层结构、岩性分布、断层构造等地质信息，评估封存空间的密封性和稳定性，确定二氧化碳的最佳注入位置和注入量。在选址阶段，通过对多个潜在封存区域的勘查对比，选择最适宜的封存场地，确保二氧化碳长期安全封存。在深层咸水层封存二氧化碳的勘查中，利用三维地震成像技术精确绘制咸水层的分布范围和厚度，结合岩心分析确定咸水层的渗透率和孔隙度，评估其封存二氧化碳的能力。同时，运用数值模拟方法预测二氧化碳在咸水层中的运移路径和分布特征，为封存方案的设计提供科学依据。^[6]

2. 注入过程监测与评估技术

在二氧化碳注入过程中，运用多种监测技术实时跟踪注入效果。利用地震监测技术监测注入引起的地层微变形，通过地球化学方法分析注入二氧化碳在地下的运移路径和化学反应，借助压力监测系统掌握注入压力变化。根据监测数据及时调整注入参数，评估封存效果，保障CCS项目的安全高效运行。例如，通过定期监测注入区域地下水化学组成变化，判断二氧化碳是否发生泄漏。在监测技术发展方面，研发高灵敏度的二氧化碳泄漏监测

传感器,结合分布式光纤传感技术,实现对注入区域的全方位、实时监测,及时发现并预警二氧化碳泄漏风险。^[7]

3. 二氧化碳地质封存与资源化利用协同勘查技术

探索二氧化碳地质封存与资源化利用相结合的勘查技术,如在富含镁、钙等金属离子的地层中,研究二氧化碳与地层矿物发生化学反应生成碳酸盐矿物的可行性。通过勘查确定适宜进行二氧化碳矿化利用的地层区域,实现二氧化碳的永久封存与资源回收利用的协同发展,提高 CCS 项目的经济效益和环境效益。在玄武岩地层中,开展二氧化碳矿化反应的勘查研究,利用地球化学分析确定玄武岩中镁、钙等金属元素含量及其赋存状态,通过模拟实验研究二氧化碳与玄武岩矿物的反应动力学过程,评估二氧化碳矿化利用的潜力。同时,研发适用于二氧化碳矿化勘查的地球物理技术,如利用电磁法探测地层中碳酸盐矿物的形成与分布,为二氧化碳地质封存与资源化利用协同发展提供技术支持。^[8]

(四) 深部储能勘查技术的探索与发展

1. 深部地下空间勘查技术创新

研发适用于深部地下空间勘查的新技术、新装备。如采用超长距离水平钻探技术,对深部地下空间进行水平方向的探测,获取更全面的空间结构信息;利用瞬变电磁法、地质雷达等地球物理技术,探测深部岩体的完整性和空洞分布,评估地下空间的稳定性。通过这些技术创新,为深部储能设施的建设提供准确的地质资料。在深部盐穴储能勘查中,利用三维地震成像技术结合声波测井,精确确定盐岩的厚度、连续性以及内部结构,评估盐穴的稳定性和密封性。同时,研发深部地下空间可视化勘查技术,通过构建三维地质模型,直观展示地下空间的形态和特征,为深部储能工程设计提供直观依据。^[9]

2. 深部储能介质特性勘查技术

针对深部天然气、石油、氢能、氦气等储能介质,研究其在不同地质条件下的赋存特性和运移规律。运用地球化学分析技术,测定储能介质的成分和性质;通过数值模拟方法,模拟储能介质在地下空间的存储和释放过程,为深部储能系统的设计和优化提供科学依据。例如,研究深部盐穴储油的可行性,需对盐岩的力学性质、渗透性等进行详细勘查和分析。在深部氢能储能勘查中,利用地球化学方法检测地下水中氢同位素组成,分析深部储氢的可能性,同时运用数值模拟研究氢气在地下岩石孔隙中的吸附、解吸过程,为深部氢能储能系统的设计提供关键参数。

3. 深部储能与地质环境相互作用监测技术

建立深部储能与地质环境相互作用的长期监测体系,监测储能过程中地下水位、地层压力、地质构造等变化。运用光纤传感、微震监测等技术,实时获取监测数据,评估深部储能对地质环境的影响,及时发现并解决潜在的地质灾害风险,保障深部储能设施的安全运行和地质环境稳定。如通过微震监测系统,及时发现深部储能引起的地层微破裂,采取相应措施进行处理。在深部天然气储能项目中,利用分布式光纤压力传感器监测储气库周边地层压力变化,结合地下水位监测数据,评估天然气存储对周边地质环境的影响,确保项目安全稳定运行。^[10]

三、结论

“双碳”目标为地质勘查技术发展带来了前所未有的机遇与挑战。在能源结构调整、生态保护强化以及技术创新需求的驱动下,地质勘查技术在清洁能源勘查开发、碳源碳汇调查监测、碳捕集利用与封存以及深部储能等领域呈现出多技术融合、智能化、精细化等发展趋势。通过不断推进地质勘查技术创新,能够为“双碳”目标的实现提供坚实的技术支撑,促进能源绿色转型、生态系统碳汇提升以及碳排放有效控制。未来,地质勘查行业应紧密围绕“双碳”目标,加大技术研发投入,加强跨学科合作,培养高素质专业人才,积极应对新挑战,开拓新领域,为全球气候变化应对和可持续发展贡献地质力量。随着技术的持续进步和应用实践的不断深入,地质勘查技术将在“双碳”时代发挥更为重要的作用,推动人类社会向绿色低碳未来迈进。

参考文献

- [1] 李明,王宇,赵越.清洁能源勘查技术在“双碳”背景下的创新与应用[J].能源勘探与开发,2020(05):34-41.
- [2] 张华,刘畅,等.碳源碳汇调查监测技术进展及在“双碳”目标中的应用[J].地球科学进展,2021(08):789-801.
- [3] 陈晨,王强,等.碳捕集利用与封存(CCS)勘查技术研究进展[J].地质科技情报,2022(02):111-118.
- [4] 赵刚,孙悦,等.深部储能勘查技术的现状与未来发展趋势[J].储能科学与技术,2020(04):1023-1030.
- [5] 钱进,周伟,等.多技术融合在清洁能源精细勘查中的应用实例[J].石油与天然气地质,2019(03):678-686.
- [6] 李华,张宁,等.同位素示踪技术在碳源碳汇监测中的应用研究[J].地球化学,2022(01):45-56.
- [7] 王宁,李强,等.动态监测与模拟预测技术在生态系统碳汇评估中的应用[J].生态学报,2021(15):6034-6045.
- [8] 张涛,陈宇,等.地下封存空间精细勘查技术在 CCS 项目中的应用[J].煤炭学报,2020(06):2204-2212.
- [9] 刘辉,王萌,等.二氧化碳地质封存与资源化利用协同勘查技术研究[J].化工进展,2022(03):1437-1446.
- [10] 杨波,赵阳,等.深部地下空间勘查技术创新及在储能工程中的应用[J].岩土工程学报,2021(09):1651-1659.