

我国深部多类型矿产资源协同开采路径与方向

孙焕泉^{1,2*}, 罗大清³, 方吉超^{1,4}, 杨攀峰³, 黄宁³, 罗璐^{1,5}

(1. 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100728;
3. 中国石化集团经济技术研究院有限公司, 北京 100029; 4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206;
5. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083)

摘要: 我国战略性矿产资源紧缺、对外依存度高, 推进深部多类型矿产资源协同开采对保障国家能源资源安全具有重要意义。本文聚焦多资源协同开采路径与方向, 运用综合分析、多目标空间优化和典型区域重点解剖相结合的方法, 深入分析了锂盐、钾盐、氦气、砂岩型铀矿、铷盐和锶盐等 6 种矿产资源的分布特征, 探讨了其与油气、地热资源耦合开采机制, 剖析了我国深部多类型矿产资源协同开采的优势和面临的挑战; 将多资源共生关系纳入开采序列决策, 构建了“时空适配-效益协同”双维优化方法, 突破传统单一资源开发局限。通过多源协同立体勘探、多维度综合评价、双维度协同开发, 提出了资源富集区优先布局、产业链协同发展的实施路径; 创新搭建了油气、地热与多类型矿产协同开采的具体场景, 制定了不同场景下提高资源利用率、降低开采成本的技术路线。最后, 明确示范项目和工业化潜力, 形成产业链集中、协调、有序发展的战略布局, 为深部多类型矿产资源一体化开发提供可落地的理论支撑与实践范式。

关键词: 多类型资源; 深部矿产; 协同开采; 综合利用

中图分类号: TD98 **文献标识码:** A

Pathways and Directions for Synergistic Mining of Deep Multi-Type Mineral Resources in China

Sun Huanquan^{1,2*}, Luo Daqing³, Fang Jichao^{1,4}, Yang Panfeng³, Huang Ning³, Luo Lu^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, Beijing 102206, China; 2. China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China; 3. SINOPEC Economics & Development Research Institute Company Limited, Beijing 100029, China;
4. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China;
5. SINOPEC Star Petroleum Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: China's deep-seated strategic mineral resources are sparsely distributed and heavily reliant on imports from abroad. Promoting the coordinated exploitation of multi-type mineral resources in deep strata is significant for safeguarding national energy and resource security. This study focuses on pathways for multi-resource synergistic development, employing an integrated methodology that combines comprehensive analysis, multi-objective spatial optimization, and case studies in representative regions. It analyzes the spatial distribution characteristics of six critical mineral resources: lithium salts, potassium salts, helium, sandstone-type uranium, rubidium salts, and strontium salts, and explores their coupled exploitation mechanisms with oil/gas and geothermal resource. Strategic advantages and technical challenges for deep mineral resource synergistic mining in China are identified. This

收稿日期: 2026-01-21; **修回日期:** 2026-02-11

通讯作者: *孙焕泉, 中国石油化工集团有限公司正高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为石油天然气及地热开发理论技术研究和工程实践; E-mail: sunhuanquan@sinopec.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“深部地热多资源协同开发战略研究”(2025-XBZD-03)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

study incorporates multi-resource symbiotic relationships into mining sequence decision-making frameworks. A two-dimensional optimization methodology integrating “spatiotemporal alignment” and “efficiency synergy” is developed to overcome limitations of conventional single-resource exploitation paradigms. Through multi-source collaborative three-dimensional exploration, multi-dimensional comprehensive evaluation, and two-dimensional coordinated development, the implementation path of prioritized layout in resource-rich areas and coordinated development of industrial chains is clarified. Specific scenarios for collaborative mining of oil, gas, geothermal, and multi-type minerals are creatively constructed, and technical routes are formulated to improve the resource utilization rate and reduce mining costs under different scenarios. Demonstration projects and industrialization potentials are defined, and a strategic layout for the centralized, coordinated, and orderly development of industrial chains is formed. This study provides actionable theoretical support and practical models for the integrated development of deep mineral resources.

Keywords: multi-type resources; deep mineral resources; synergistic mining; comprehensive utilization

一、前言

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础，是新时代高质量发展的基石，也是国家安全体系的重要组成部分。我国90%以上的能源、80%的工业原料、70%以上的农业生产资料均来自矿产资源，随着工业化和城镇化进程的加快，对一些重要矿产资源的需求量大幅增加，对外依存度不断攀升^[1]，严重影响我国经济安全甚至国家安全。深部矿产资源指埋藏深度超过了当前开采技术水平所能达到深度的矿产资源。目前，我国已突破2000 m深部矿产资源勘查技术体系，但开采进展较慢。我国油气、地热开采深度可达5000~8000 m，技术较为成熟，油气与地热开采伴（共）生深部矿产资源达30余种，包括砂岩型铀矿及其伴生稀贵金属、稀有气体（氦气）、富矿卤水（锂、钾、铷、铯等）、煤炭、岩盐等，其中多数矿产资源是我国紧缺的战略性矿产资源^[2]。以四川盆地、江汉盆地、柴达木盆地和鄂尔多斯盆地为代表的沉积盆地，除富含石油、天然气资源外，还伴（共）生锂、钾、铀矿、氦气等多种战略性矿产资源，部分矿产资源含量达到工业开发品位^[3-5]。由于伴（共）生矿产资源开采难度大、开发成本高，目前我国大量的油气与地热伴（共）生矿产资源未得到充分利用，缺乏系统性和全局性部署。

油气、地热和伴（共）生矿产资源协同开采具有更好的经济效益，对保障国家能源资源安全、推动能源结构转型与绿色低碳发展具有重大意义。按照能够满足国家战略需求、满足国家能源资源安全、有一定储量规模、有一定技术储备的基本要求，本文对我国油气和地热伴（共）生的锂盐、钾盐、氦气、砂岩型铀矿、铷盐和铯盐等6种战略性矿产资源进行分析^[6]，评价我国主要沉积盆地的资源分布及

开采技术，总结多类型矿产资源协同开采现状并分析面临的挑战，创新搭建形成油气、地热水、卤水与伴（共）生矿产资源协同开采的场景，明确提高资源利用率、降低开采成本的技术路线，提出我国加强深部多类型矿产资源开发利用的战略路径。

二、深部多类型矿产资源协同开采的战略需求

（一）全球分布高度集中，少数国家占有大部分资源

锂盐、钾盐、氦气、砂岩型铀矿、铷盐和铯盐等战略性矿产资源的分布高度集中，少数国家拥有大部分资源。6种战略性矿产资源的分布情况如表1所示。全球约有77.06%的锂矿储量分布在智利、澳大利亚和阿根廷，我国锂矿储量仅占全球储量的5.88%^[7-8]。全球钾盐资源分布广泛，但高品位的钾矿较少，分布相对集中，加拿大、白俄罗斯、俄罗斯3国的储量约占全球钾盐储量的57%；我国钾盐探明储量约占全球的8.1%^[9]。全球氦气资源贫乏且高度集中，美国、卡塔尔、阿尔及利亚和俄罗斯的资源量占全球总资源量的87.2%^[10]。全球低回收成本（≤40美元/kg）的铀矿资源集中在哈萨克斯坦、加拿大、中国、乌兹别克斯坦、巴西、西班牙和阿根廷等国家^[11]。全球约有90%的铷储量分布在纳米比亚、津巴布韦和加拿大^[12]。目前世界上发现铯矿床的国家包括墨西哥、西班牙、中国、阿根廷、伊朗及土耳其等，其中墨西哥、西班牙、中国占全球铯矿储量的73.5%。

（二）我国深部多类型矿产资源匮乏，储量品位低，对外依存度高

我国是世界上重要的锂产品生产国与消费国，但我国高品位锂矿较少，锂矿山中Li₂O的平均品位

表1 6种战略性矿产资源的分布状况

矿产资源	全球分布情况	中国分布情况	我国对外依存度
锂盐	分布区域高度集中，全球 77.06% 的储量分布在智利、澳大利亚、阿根廷	资源占全球的 5.88%，主要分布在高海拔地区，盐湖卤水提锂工艺尚未完全成熟	67% ^[13]
钾盐	全球钾资源丰富，但分布集中，加拿大、白俄罗斯和俄罗斯 3 国资源占全球钾盐总资源的 57%	资源占全球的 8.1%，但资源品位低	50% ^[14,15]
氦气	世界氦气资源短缺且分布相对集中，主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯等国家	资源匮乏，仅占全球的 2%~3%，品位低，是世界上氦气资源严重缺乏的国家	97.4% ^[16]
铀矿	分布极不平衡，超过 92% 的资源集中在澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、俄罗斯、纳米比亚等国家	我国铀矿资源储量仅占世界总量的 4.38%，属于贫铀国家	83.3% ^[17]
铷盐	没有发现独立矿床，主要和其他矿物伴生，约有 90% 的资源集中在纳米比亚、津巴布韦和加拿大等国家	资源有限，分布分散，开采提取难度大	>90%
锶盐	品位高、有开发价值的天青石矿床不多，全球约有 73.5% 的资源集中在墨西哥、中国、西班牙等国家	锶矿储量丰富，但品位低、杂质含量高	20%

为 0.8%~1.4%，而国外锂矿山中 Li_2O 的平均品位达 1.47%~3.55%。我国锂资源品位低、赋存环境差、高镁卤水锂开采技术还没有彻底突破，面临锂矿资源开发难度大、产量低的困境。相关数据显示，近年来我国锂矿资源的对外依存度约为 67%，资源自给能力严重不足。

钾是农作物生长的必需营养元素，在农业生产中的地位至关重要。钾盐是我国紧缺的矿产资源之一，我国钾矿资源品位较低、规模小，钾盐储量约占全球总储量的 5%，但消费量长期占全球总量的 20% 以上。

氦气是国家战略性稀缺资源，广泛应用于临床医学、国防军工、航空、核工业、微电子、低温科学等高科技领域。我国氦气资源匮乏，资源量仅占全球的 2%~3%，氦气产量远不能满足需求，绝大部分依靠进口。

铀是高度敏感的国家紧缺战略资源，被广泛应用于核能发电、核武器制造及医疗健康等领域。我国铀资源储量在世界总量中的占比为 4.38%，属于贫铀国家。近年来，我国铀资源的对外依存度一直保持在 80% 以上。

铷和锶是稀有的金属元素，因其优异的物理、化学以及光电性能，广泛应用于催化剂、能源、电子、传统玻璃等领域。目前，我国铷资源未进行规模化开发，市场规模较小，主要依赖进口。我国铷矿储量丰富，但锶的主要商业来源天青石矿品位低、杂质含量高，约有 20% 的天青石依赖进口。

(三) 我国深层卤水、地热水体量大，伴生矿产资源丰富

我国深层地下卤水分布广泛，资源储量丰富，部分地区的油田卤水开发前景广阔。其中，四川盆地、柴达木盆地以及江汉盆地的油田卤水中钾、锂资源多数超过工业开采品位，有望实现与油气资源的协同开采。例如，四川盆地的卤水潜在资源量高达 $1.773 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，有储量大、质量优、富集、适合联合开采等优势。柴达木盆地西部地区众多含油气构造发育的深层卤水，储量丰富且富含锂、钾、硼、碘等矿产资源，尤其是在南翼山和英雄岭构造带西端的深层卤水品质最为优越，成矿元素种类全，含量高。江汉盆地江陵凹陷卤水中富含硼、铷、锶、铯、溴和碘等元素，很多达到工业或综合利用品位。我国主要沉积盆地油气伴生战略性矿产资源情况^[18-24]如表 2 所示。

以地热富集区带为研究对象，我国主要地热伴生战略性矿产资源含量情况^[25-30]如表 3 所示。我国温泉中的锂含量平均值为 2.1 mg/L，地热井中的锂含量平均值为 1.54 mg/L；富锂地热水主要集中于青藏高原地区，其次是云南、四川和东南沿海地区。我国的地热水中氦气浓度范围为 0~3.6 vol%，富氦地热水主要位于青藏高原、东部和关中盆地地区。青藏高原及其周边地区的地热氦气平均浓度为 0.14 vol%；东部地区的地热氦气平均浓度为 0.27 vol%；关中盆地的地热氦气平均浓度最高，为 1.17 vol%。

表2 我国主要沉积盆地油气伴生战略性矿产资源情况介绍

沉积盆地	伴生矿产	资源含量	工业品位标准
四川盆地	锂盐	8.59~182 mg/L	50 mg/L
	钾盐	18.86 g/L	12 g/L
	铷和铯	37.5 mg/L	20 mg/L
	锶盐	56~556 mg/L	44.2 mg/L
	氦气	0.045%	0.05%
江汉盆地	锂盐	5.5~323 mg/L	50 mg/L
	钾盐	7~9 g/L	12 g/L
	铷和铯	60 mg/L	20 mg/L
	锶盐	79~1307 mg/L	44.2 mg/L
柴达木盆地	锂盐	36~983 mg/L	50 mg/L
	钾盐	35~43 mg/L	12 g/L
	铷和铯	12~83 mg/L	20 mg/L
	氦气	0.05%~0.81%	0.05%
江西吉泰盆地	锂盐	89~101 mg/L	50 mg/L
	锶盐	100~110 mg/L	44.2 mg/L
鄂尔多斯盆地	氦气	0.12%	0.05%
	砂岩型铀矿	0.06%	0.01%
塔里木盆地	氦气	0.04%~0.12%	0.05%
	砂岩型铀矿	0.12%	0.01%
松辽盆地	氦气	0.111%~0.209%	0.05%
二连盆地	砂岩型铀矿	0.07%	0.01%
伊犁盆地	砂岩型铀矿	0.03%	0.01%
吐哈盆地	砂岩型铀矿	0.01%~0.054 6%	0.01%

表3 我国主要地热伴生战略性矿产资源含量

伴生矿产	地区	含量
锂盐	广西东部和南部、湖南西北部 and 东南部、江西西部、湖北中部和东部、安徽中部	0~0.01 mg/L
	云南、四川和东南沿海地区	0.01~5 mg/L
	青藏高原地区	5~20 mg/L
	西藏南部、四川东部	≥20 mg/L
	青藏高原及其周边地区	6×10 ⁻⁶ %~3.2%
氦气	我国东部地区	1×10 ⁻³ %~1.8%
	关中盆地	0~3.6%

(四) 协同开采具有更好的经济效益

油气、地热生产企业掌握大量的物化探、钻井、测井、油气水等资料，拥有精细地震勘探、成像测井、核磁共振测井等先进技术手段，具备技术、资金和人才优势，这些优势可在多类型矿产资源协同勘查、评价、开发过程中发挥重要作用。同时，油气、地热生产企业已建成完备的油气水开

采、集输、储存、处理设备和设施，为多类型矿产资源的协同开采提供了有利的条件。

多类型矿产资源与油气、地热等的协同开采具有更好的经济效益。一是多类型矿产资源具有较高的市场价值，综合利用产值不断增长，成为油气田企业经济的重要组成。二是降低勘探开发成本，油气田企业利用自身掌握的资料、技术和装备，进行多类型矿产资源与油气的协同开采，可以显著节约勘探开发的时间和成本。三是可充分发挥协同开采的优势，做好总体规划和系统优化，提高开采效率。

(五) 协同开采可以变废为宝，更好保护环境

环境污染的实质就是资源利用不充分，多类型矿产资源协同开采不仅可以提高资源利用率，还可以保护地下水资源。近年来，随着我国对生态环境保护重视程度的不断增加，对工业生产中的废水处理提出了较高要求。2021年，国家发展和改革委员会、科学技术部、工业和信息化部等十部门联合发布《关于推进污水资源化利用的指导意见》，指出要做好顶层设计，加强统筹协调，完善政策措施，强化监督管理，开展试点示范，推动我国污水资源化利用，实现高质量发展。相关部门对油气田污水处理提出了更高要求。多类型矿产资源协同开采可以探索建设环境友好型的地下卤水治理产业，构建生态良性循环的可持续发展体系。

三、深部多类型矿产资源协同开采的现状和面临的挑战

(一) 国外深部多类型矿产资源协同开采现状

1. 油气、地热卤水提锂、提钾现状

目前，国外油气田提锂项目主要集中于美国 Smackover 地层与加拿大阿尔伯塔省 Leduc 地层。加拿大 MGX 矿业公司设计了采用纳米过滤技术提锂的新工艺，正在开采加拿大鲟鱼湖油田产出于 Leduc 地层的油田水（锂平均含量为 67 mg/L）。加拿大标准锂业（Standard Lithium）公司研发了专为美国阿肯色州 Smackover 地层卤水锂资源开发的 LiSTR 直接提锂技术，该技术的吸附材料是基于钛酸盐结构的固体陶瓷材料，能够在 70 °C 的温度下选择性地从卤水尾矿中获得高纯度氯化锂溶液。

地热水提锂项目主要集中于美国加利福尼亚州的索尔顿海与欧洲上莱茵河谷。美国加利福尼亚州能源委员会评估,在索尔顿海地热田中,碳酸锂的年供应量将超过 6×10^5 t。2019年,伯克希尔·哈撒韦公司开始推动索尔顿海地热提锂项目,采用专有的离子交换工艺,已在两座示范工厂生产出碳酸锂和氢氧化锂。

钾盐产品包括氯化钾、硫酸钾、硝酸钾等,目前主要由固体钾矿产出。钾盐产品产量居世界前四位的国家依次是加拿大、俄罗斯、白俄罗斯、中国。我国是一个农业大国,钾盐资源紧缺、对外依存度高,在海相地层找钾尚未取得突破性进展、地表盐湖增储潜力有限的情况下,从富钾油气田卤水、地热水中提钾成为解决我国钾资源紧缺的首选。

2. 天然气提氦现状

1921年,美国在沃斯堡建造了全球第一个商业氦气厂,用于处理Petrolia油田的含氦天然气,其后天然气提氦工业快速发展。目前,全球氦气产量集中在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯等国家。近年来,由于国际氦气市场反复出现供应短缺,国外氦气勘探开发开始升温,多家公司在美国西南部、加拿大萨斯喀彻温省和阿尔伯塔省、坦桑尼亚、澳大利亚和南非等国家和地区从事氦勘探与提纯业务。英国Helium One公司在坦桑尼亚大裂谷地区发现的非伴生氦气资源的甜点储区,拥有26个氦气勘探许可证。俄罗斯阿穆尔天然气加工厂的氦气生产能力逐渐提高,并与世界最大氦气集装箱服务物流枢纽同步启用。卡塔尔天然气公司是卡塔尔氦气生产、储存和装载设施的运营商,近年来卡塔尔氦气产量快速增长,约占世界氦气总产量的30%以上。

3. 油气与砂岩型铀矿协同开采现状

砂岩型铀矿由于矿床规模大、采矿成本低、开采环保等优点,在世界铀资源量中的占比迅速攀升,已成为最重要的铀矿工业类型。世界铀矿总储量的30%~40%来自砂岩型铀矿。

美国自1951年在圣胡安盆地西南缘发现杰克派尔铀矿床,陆续发现了一系列大型、超大型砂岩型铀矿床,逐渐形成了中西部四大类型砂岩铀矿集区,发展形成了腐殖酸型板状矿床等4类成因理论。

苏联自1952年在中亚地区发现乌奇库杜克砂岩型铀矿床后,相继发现了一系列大型、超大型

铀矿床,形成了全球规模最大的砂岩型铀矿集区。1967年,布金纳依矿床地浸实验取得成功,使许多经济性较差的低品位砂岩型铀矿床利用成为可能,标志着地浸砂岩型铀矿开发进入新阶段。

4. 油气与铷、铯协同开采现状

铷矿的主要矿床类型为伟晶岩型和盐湖型,主要分布于北美、澳洲、非洲南部和中国,其中纳米比亚、津巴布韦和加拿大拥有绝大多数的铷矿资源。

目前,世界上发现铯矿床的国家包括中国、西班牙、墨西哥、阿根廷、伊朗及土耳其等,其中墨西哥、中国、西班牙三国的铯矿储量之和约占全球总储量的70%以上。同时西班牙、中国和墨西哥三国也是世界最主要的铯资源开采国。铷、铯主要从固体矿床和盐湖中提取,从油气田卤水中提取铷、铯技术尚处于实验室试验阶段。

(二) 我国深部多类型矿产资源协同开采现状

1. 油气、地热卤水与锂、钾协同开采现状

油气产出水和地热卤水中富含锂、钾、硼、铷、铯、溴和碘等矿产资源,已开展综合利用工艺实验研究。油气产出水提取矿产资源与地热卤水提取矿产资源的核心工艺一致,即对采出水进行预处理后,通过耦合蒸发结晶、溶剂萃取、酸化沉淀、空气吹出、化学沉淀和分馏萃取等方法,分阶段、分步骤地有效提取主要元素。

四川盆地、江汉盆地、柴达木盆地等地富含油气资源和锂资源,部分油气井产出水中的锂资源含量 >100 mg/L。早在1983年,我国就针对四川威远气田的气田水(锂含量为97.5 mg/L)使用MR-2离子筛技术实现锂提取,取得了较好的效果^[31]。2022年,中国石油西南油气田公司龙王庙组气藏气田水在采用“气田水预处理+高效锂离子筛吸附剂提锂”技术后,生产出首批成品碳酸锂,成为国内首套投运的500 m³/d气田水提锂中试装置^[32]。2011年,青海油田开始进行南翼山油田水提取钾盐的先导试验^[33,34];2013年,在钻井卤水室内外蒸发实验的基础上建立中试盐田;2015年,使用“蒸发-冷冻”联合法在南翼山油田建成万吨级油田水资源综合利用一体化生产线。目前,青海油田已初步加工出氯化钾、硼酸和碳酸锂等矿产品,具有成本低、收益高、工艺简单等优势。青藏高原地区的地热资源丰

富，锂资源相对富集，协同开采已取得一定进展。2023年1月，河南万锂新能源有限公司采用新疆泰利信矿业有限公司研发的“吸附法+膜法”耦合工艺，启动地热水发电综合处理生产电池级碳酸锂项目，成为国内首次启动地热卤水提取电池级碳酸锂的产业化项目。

目前，我国油气田卤水提锂、提钾技术相对成熟，已进入现场工业化应用阶段，而地热水的提锂技术仍处于研究阶段。

2. 天然气与氦气协同开采现状

我国天然气提氦始于20世纪60年代的威远提氦试验I装置，设计日处理天然气约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，年生产氦气约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1989年建成的威远提氦II试验装置，设计日处理天然气约 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，年生产氦气约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2012年，在四川省荣县东兴场镇建成的天然气提氦项目，设计日处理天然气约 $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，氦含量为0.18%，年生产纯氦气约 $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，氦收集率>96.5%，产品粗氦纯度为90%~95%，经纯化精制后将生产出纯度为99.999%的氦气产品；后期通过对氦纯化精制装置的技术改造，氦纯度达到99.999 9%^[35]。2020年，内蒙古鄂尔多斯杭锦旗建成了国内首套年产百万立方米级氦气的液化天然气

(LNG)闪蒸气提氦项目^[36]，设计年产5N高纯氦气约 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2024年，江汉油田开展涪陵页岩气膜分离提氦先导试验，从干燥后的页岩气（涪陵页岩气的氦平均含量为0.035%）中提取精制氦气，原料气经过滤、加热预处理后进行三级膜分离氦气，一级膜分离氦提取浓度约为0.25%，二级膜分离氦提取浓度约为2.39%，脱除CO₂后三级膜分离氦提取浓度约为24.6%，通过变压吸附及提氦处理后获得99.999%的高纯度氦气，氦回收率达到85%以上。

近年来，我国氦气研究和调查工作开展迅速，形成了新一轮“氦气热”，多项国家级氦气研究项目启动实施，国内企业也持续加大对天然气提氦、LNG尾气提氦的技术攻关和重点工程建设力度。2020—2023年，我国氦气行业产能扩张明显。截至2023年年底，我国氦气生产企业超过20家，集中在内蒙古和新疆，主要提氦项目总产能达 $8.46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[37]，如表4所示。虽然国内天然气提氦、BOG（LNG储罐中含氦蒸发气）提氦工艺取得长足进步，但在提取、储运、分析检测等全产业链技术装备方面较国外仍有不少差距，目前氦气液化、膜分离、储运等关键装备仍以进口为主。

表4 我国已建、在建的重点提氦项目

序号	企业/项目名称	所在地	产能/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	投产时间/年
1	中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司成都天然气化工总厂	四川自贡	21	2012
2	宁夏深燃众源天然气公司	宁夏吴忠	10	2020
3	内蒙古兴圣天然气有限责任公司	内蒙古鄂尔多斯	100	2020
4	甘肃庆阳瑞海嘉能源科技有限公司	甘肃庆阳	20	2021
5	内蒙古万瑞天然气有限责任公司	内蒙古鄂尔多斯	40	2021
6	鄂尔多斯市派思能源有限公司	内蒙古鄂尔多斯	20	2021
7	内蒙古森泰天然气有限公司	内蒙古鄂尔多斯	135	2021
8	榆林圆恒能源有限公司	陕西榆林	15	2022
9	重庆中石化通汇能源有限公司	重庆涪陵	10	2022
10	中国石油塔里木油田塔西南天然气综合利用工程	新疆喀什	100	2023
11	中国石化华北油气分公司东胜气田天然气处理厂配套提氦工程	内蒙古鄂尔多斯	132	2023
12	内蒙古雅海能源开发有限责任公司	内蒙古鄂尔多斯	55	2023
13	宁夏天利丰能源利用有限公司	宁夏吴忠	50	2023
14	佳县宏远天然气有限责任公司	陕西榆林	50	2023
15	内蒙古中能天然气有限公司	内蒙古乌兰察布	32	2023
16	鄂尔多斯市宏基亿泰能源有限公司	内蒙古鄂尔多斯	56	2023

3. 地热水提氦实验现状

近年来,在渭河盆地发现的地热伴生型水溶性氦气是氦气资源的新类型。1974年,渭河盆地的渭深13井首次发现富氦气体(氦含量为2.13%~4.14%,平均3%)。2005年以来,对渭河盆地77口地热井伴生氦气含量检测发现,氦含量体积分数>1%的井占总井数的50%以上,最高达9.226%,且分布范围较广。2021年12月—2022年3月,由中国石化华北油气分公司东胜气田天然气处理厂、膜技术国家工程研究中心和中石化绿源地热能开发有限公司在三普2号地热井(站)上合作完成了“膜分离+变压吸附”耦合工艺提氦试验^[38]。气源为三普2号井水溶气,体积占取水量的20%~30%,氦气的体积分数为2.735%,主要流程由气水分离、增压净化、一级膜分离、二级膜分离、二次增压、变压吸附、存储等环节构成。地热水通过气水分离,解析出的混合气体经过脱水、脱氢等净化处理后进入膜分离器,使3%左右的氦气提浓到50%左右,提浓后的混合气进入变压吸附设备进行提纯至99%以上。现场试验压力为0.4~0.9 MPa,真空解吸压力为0.01 MPa,单塔吸附时间为300~600 s,操作周期为600~1200 s,水溶氦气体积分数从井口气的2.7%左右经过膜分离提浓、变压吸附提纯后,提纯气体积分数稳定至99%以上,最高达99.506%(见表5),达到《工业氦》(GB/T 28123—2011)标准。

水溶氦气常温“膜分离+变压吸附”耦合工艺提氦试验,打通了地热井水溶氦气提取/提浓/提纯工艺技术路线,试验产品达到工业氦标准。该试验的成功为品位高、低产量的地热伴生水溶氦气资源的开发利用提供了可能,提出了“地热+氦气”综合开发利用的新模式。

4. 油气与砂岩型铀矿协同开采现状

地浸采铀与注水油田开发极为相似,国内油气

田经过几十年的勘探开发,技术手段和方法已趋于完善,油田勘探开发的技术、装备和经验都可以在地浸采铀中得到应用^[39]。相关技术主要包括:地震勘探技术、优化钻井技术、井网井距优化技术、储层压裂改造技术、表面活性剂应用技术等^[40,41]。目前,油气与砂岩型铀矿协同开采还处在勘探阶段,可通过矿权共享、资料共享、技术共享、装备共享等实现协同。

5. 油气与铷、锶协同开采现状

在油气田卤水复杂环境中,铷、锶的提取面临独特挑战。油气田水中的铷资源丰富,但含量较低且经常与其他同主族碱金属如锂、钾、钠共生,由于属于同一主族,有相似的理化性质,为铷的提取和分离增加了难度。锶和钙、镁、钡都属于碱土金属元素,具有相似的化学性质,这为锶与钙离子分离造成了一定的困难。目前,油气田卤水提铷、提锶技术仍处于室内实验研究阶段,吸附(离子交换)法、萃取法等铷、锶的提取中显示出较好的效果,但面对油气田卤水这种复杂的体系时,提升效率是未来研究的关键^[42]。1977年以来,针对四川威远气田水,制定了提取钾、锂、铷及锶盐等综合利用方案,但在实际应用中仍存在产品产率低及效益差的问题^[43]。

综合来看,我国多类型矿产资源协同开采已进行多种实验室试验和矿产实验。具体来看,油气田卤水提锂已进入现场中试阶段,油气田卤水中钾、锂、硼、溴、碘、锶、铷、铯综合利用进入现场先导实验阶段,油气与砂岩型铀矿、铷、锶协同开采还处于实验室实验阶段,天然气提氦已进入现场应用,地热水提锂、提氦处于现场实验阶段。

(三) 我国深部多类型矿产资源协同开采面临的挑战

1. 整体勘查水平低

目前的勘探技术侧重于单一矿种勘探,在多资源综合勘探协调度、精度方面存在不足。虽然国家鼓励对伴(共)生矿产资源开展综合勘探、综合评价,但各部门聚焦各自矿权范围内的矿产,对伴(共)生矿产勘查不够重视,研究不深入。

2. 资源品位一般较低,开采成本高

矿产资源综合利用的优势是节约资源、保障供应、减少污染、保护环境、引导新兴产业发展,但多类型矿产资源品位一般较低,大部分处于工业开

表5 水溶氦气提纯试验组分分析结果

样品名称	组分体积分数/%							
	甲烷	乙烷	丙烷	二氧化碳	氦气	氢气	氧气	氮气
提纯气1	0.034	0	0	0.086	99.072	0	0.066	0.742
提纯气2	0.075	0	0	0.021	99.321	0	0.067	0.517
提纯气3	0.035	0	0	0.018	99.373	0	0.125	0.448
提纯气4	0.036	0	0	0.034	99.015	0	0.245	0.670
提纯气5	0.034	0	0	0.014	99.506	0	0.063	0.383

采品位以下，属于边际开采品位，综合利用的技术难度大、前期投入多、开发成本高。

3. 关键技术支撑能力不足

近年来，油气田企业在多资源协同开发方面进行了不断的探索，取得了一定的成果，但在规模以及关键技术问题方面仍难以满足开发需求。多类型矿产资源综合勘探、评价技术需要进一步完善，多类型矿产资源协同开采的程序、方法需要进一步研究，多资源协调开采的灾害防治理论和技术还需要建立。

4. 相关政策还不完全配套

虽然国家出台了与资源综合利用相关的增值税、所得税等优惠政策，但基本不包括油气伴（共）生矿产。例如，在《资源综合利用企业所得税优惠目录（2021年版）》《资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录（2022年版）》中，仅包括油田采油过程中产生的油污泥（浮渣）。目前，油气田开发中没有对伴（共）生矿产资源综合利用率提出明确要求，对经济性较差的伴（共）生矿产综合利用项目关注较少，多类型矿产资源没有得到有效开发利用。

四、深部多类型矿产资源协同开采的目标与战略路径

（一）总体目标

立足国家能源资源安全战略核心需求，以深部多类型矿产资源系统化开发为突破口，系统实现三重战略目标，具体如下。

战略性资源自主保障：针对锂盐、钾盐、铀矿等关键紧缺资源对外依存度高的严峻现实，通过协同开发油气、地热伴（共）生资源，有效破解新能源、新材料、航空航天等战略性新兴产业的资源瓶颈。例如，锂盐资源是动力电池的核心原料，其国内自给率不高，协同开采可提升供应稳定性，支撑“双碳”目标下的产业转型。

资源利用效率跃升：基于多资源共生关系的深度解析，创新建立开采决策优化模型，将资源分布特征、共生耦合机制纳入量化指标体系，推动资源综合回收率提升15%以上，单位开采成本降低20%，显著缓解资源有限性与分布不均衡性带来的开发压力。

产业协同效益倍增：通过“时空适配-效益协

同”双维机制，驱动油气企业从单一能源供应向多元化产品链转型（如将氦气、铷盐等副产品纳入价值链），提升企业产品附加值30%以上，实现经济效益、就业增长与产业链集群化的有机统一，为区域经济高质量发展注入新动能。

（二）战略路径

基于量化“资源-环境-经济”耦合机制与多目标空间优化技术，构建“勘探-评价-开发”三阶递进式战略路径，系统解决多资源协同开采的科学性与实践性问题。

1. 多源协同立体勘探

构建“卫星遥感-航空物探-地面钻探-井下监测”的“天地井”一体化探测体系，集成高光谱遥感、微震监测与人工智能数据融合技术，实时采集地质结构、矿体形态等多源参量数据（如四川盆地、江汉盆地等的锂、钾共生区数据），动态构建毫米级精度的三维地质模型，突破传统单一勘探局限，实现资源分布智能预判与靶区精准锁定，为协同开采提供高精度地质基础支撑。目前，我国沉积盆地已形成了“煤铀兼探”“油铀兼探”“油钾兼探”等工作思路。

2. 多维度综合评价

突破单一矿种评价范式，建立涵盖储量品位（如锂盐品位 ≥ 50 mg/L）、可采储量、环境承载力（地下水影响阈值）与经济可行性（单位成本效益比）的四维协同评价指标体系。通过系统动力学模拟量化分析“油气-地热-多矿产资源”的耦合潜力，科学确定开采优先级与资源匹配度，实现油气、地热与多类型矿产资源的协调共采，最大程度地节约成本，确保“能采尽采、成本最优”。

3. 双维度协同开发

将多资源共生关系纳入开采序列决策，明确“资源系统集成开采”理论认识，实施“时空适配-效益协同”双维优化：在空间上，以资源富集区为优先布局单元，推动产业链集群化示范区建设；在时间上，动态优化开采时序（如先采油气后采钾盐，地热与氦气同采等），避免资源竞争与环境叠加风险。同时，实时分析地质构造、应力场等灾害因子的时空耦合特征，实现风险区域智能识别与动态防控，保障“资源-环境-经济”多目标的协同统一。通过开采方法整合与示范场景优化创新，系

统破解多资源协同开发的科学瓶颈，为深部矿产资源一体化开发提供从理论到实践的全链条支撑。

(三) 不同场景下深部多类型矿产资源协同开采方向

1. 油气与锂、钾协同开采

(1) 技术路线

通过资源综合勘探、综合评价，科学确定油气和伴（共）生资源的储量品位、可采储量等指标，

制定合理协同开采程序；在油气资源高效开发的同时，对富含多矿产资源的层水和地下卤水通过传统的蒸发浓缩-沉法、吸附、萃取法和膜分离等方法，进行锂、钾的有效提取，实现油气与锂、钾的协同开采。油气与锂、钾协同开采流程如图1所示。

(2) 开采路径

油气与锂、钾协同开采路径如图2所示。近期（2028年前），以四川盆地、江汉盆地、柴达木盆地

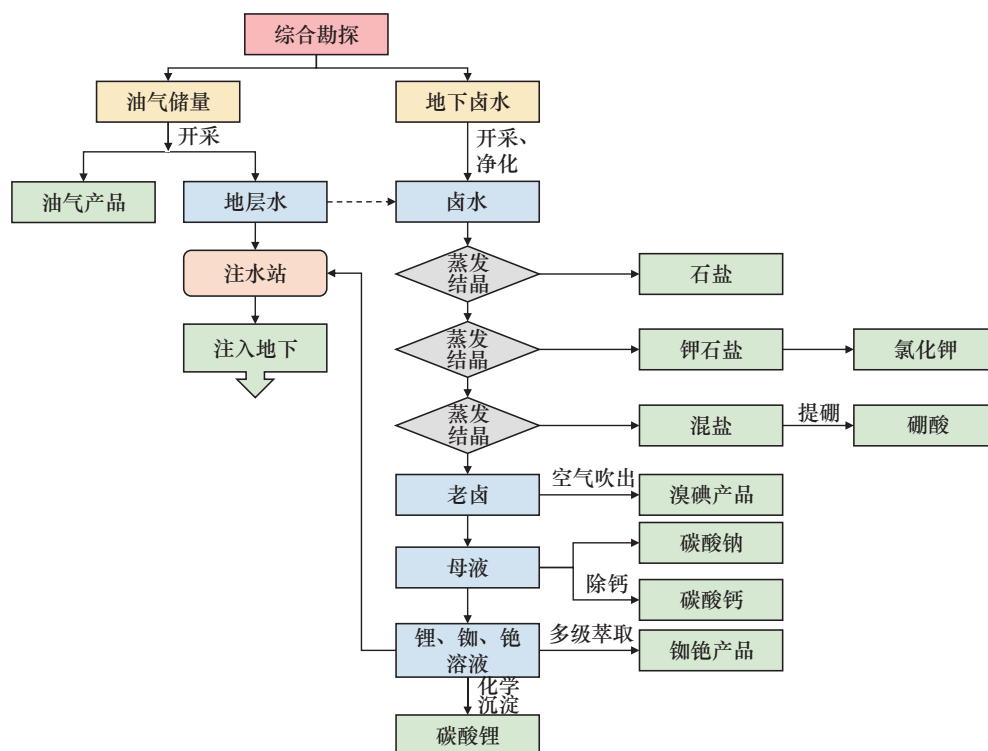


图1 油气与锂、钾协同开采流程

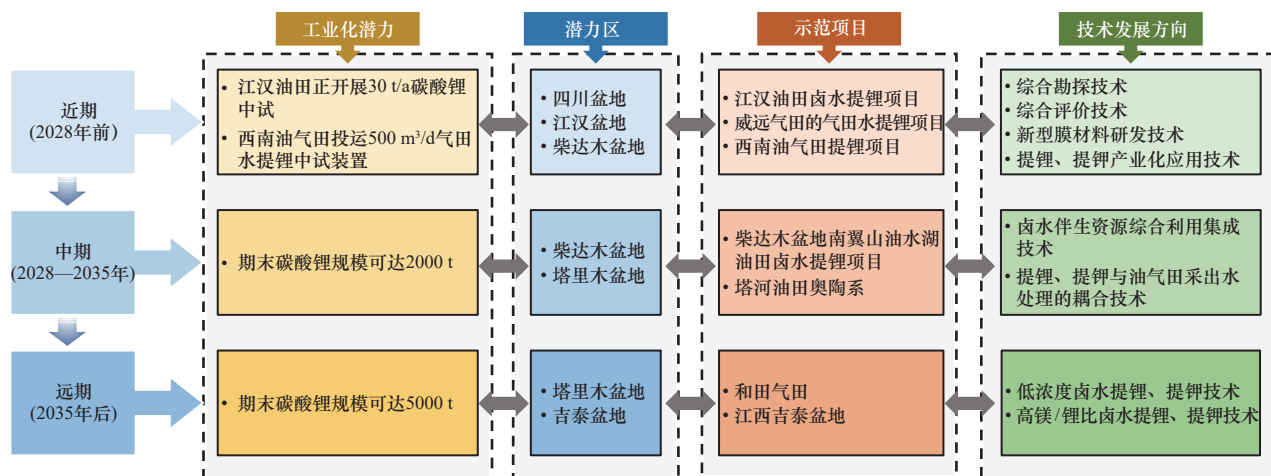


图2 油气与锂、钾协同开采路径

为主要目标区域，开展现场提锂实验工作，在完善实验的基础上，建立多类型矿产资源综合利用示范工程。中期（2028—2035年），完善集成提锂、提钾工艺技术，发展低锂、低钾浓度卤水资源提锂、提钾技术，到中期末实现碳酸锂生产规模可达2000 t/a。远期（2035年后），完善低锂、低钾浓度卤水资源提锂、提钾技术，期末实现碳酸锂生产规模可达5000 t/a。

(3) 技术发展方向

近期，重点发展油气与卤水资源综合勘探技术，油气与卤水资源综合评价技术，重点含锂地区锂资源潜力评价及有利目标筛选技术，高性能离子分离功能的新型膜材料研发技术，卤水提锂、提钾产业化应用技术。中远期，发展卤水伴生资源综合利用集成技术，提锂、提钾与油气田采出水处理的耦合技术，低浓度卤水提锂、提钾技术，高镁 / 锂比卤水提锂、提钾技术等。

2. 天然气与氦气协同开采

(1) 技术路线

天然气膜分离法提氦工作流程如图3所示。我国经过多年攻关，已形成具有自主知识产权的高回

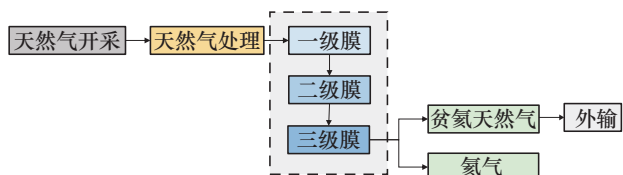


图3 天然气膜分离法提氦工作流程

收率、低能耗氦气提纯成套技术（“膜分离+催化脱氢+变压吸附”工艺），研发了新型催化氧化材料、膜分离材料和低温吸附材料，打造了全流程创新链条，并依托LNG尾气提氦工程，实现自主技术工业应用，同时构建氦气生产基地。

(2) 开采路径

天然气提氦开采路径如图4所示。近期（2028年前），以鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、四川盆地为主要目标区，开展天然气提氦工作，期末产能将达到 $7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。中期（2028—2035年），完善集成提氦工艺技术，发展贫氦天然气提氦工作，期末生产规模可达 $3 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。远期（2035年后），完善贫氦气田提氦工艺技术，期末生产规模可达 $5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3) 技术发展方向

近期重点发展天然气田氦资源综合评价技术、天然气田氦资源形成机理和富集规律研究技术、重点含氦区域资源潜力评价及有利目标筛选技术、天然气集成提氦技术、多目标联产技术（包括LNG、乙烷、液化石油气、稳定轻烃等产品）、多种气源粗氦提取技术（BOG、驰放气等）、氦分离膜和大型氦液化器的研发和应用技术等。中远期发展天然气田提氦技术迭代升级、贫氦天然气高效提氦技术、氦气产业标准体系建设等。

3. 油气与砂岩型铀矿协同开采

(1) 技术路线

通过对油气与砂岩型铀矿进行共探和综合评价，实现降低勘探成本、提高勘探效率的目的。同时将油气勘探开发的技术、装备和经验与地浸采铀

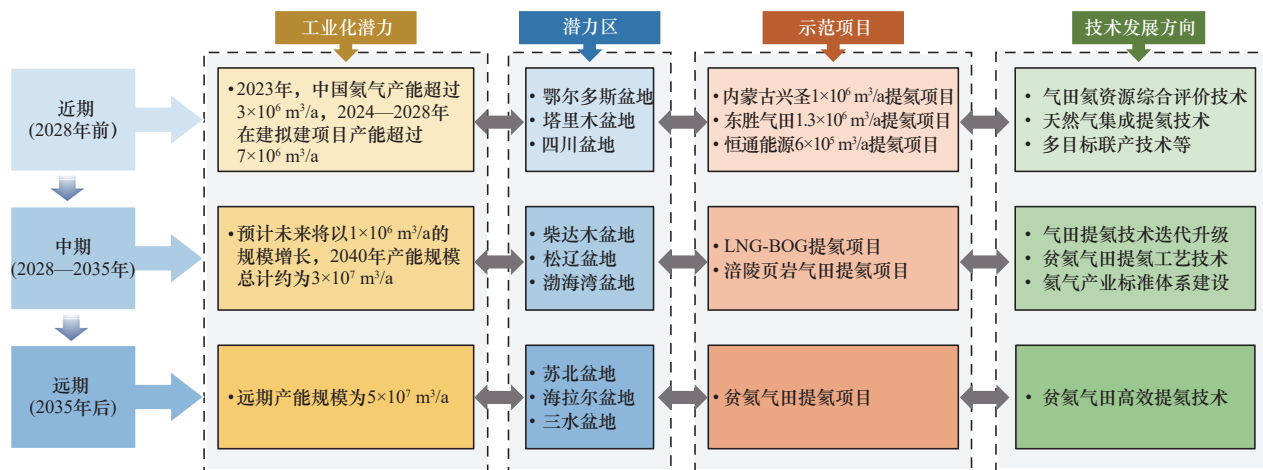


图4 天然气提氦开采路径

充分结合，实现油气与铀矿协同开采，相关协同开采流程如图5所示。

(2) 开采路径

油气与砂岩型铀矿协同开采路径如图6所示。近期（2028年前），以鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、伊犁盆地为主要目标区，开展综合勘探、综合评价和协同开采工作，期末产能将达到3000 t/a。中期（2028—2035年），完善采铀工艺技术，发展低渗透层、低品位层采铀工艺技术，期末生产规模可达5000 t/a。远期（2035年后），完善低渗透层、低品位层采铀工艺技术，期末生产规模可达10 000 t/a。

(3) 技术发展方向

近期重点发展油气与砂岩型铀矿资源综合勘探及评价技术、重点地区铀资源潜力评价及有利目标筛选技术、钻孔设计和施工优化技术、溶浸液配方与溶浸范围控制技术。中远期发展微生物地浸采铀技术、低渗透矿石地浸采铀技术、低品位矿石地浸采铀技术等。

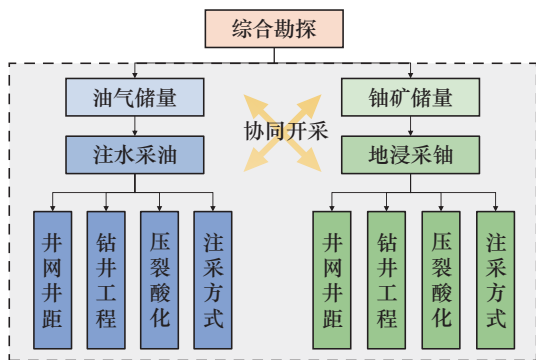


图5 油气与砂岩型铀矿协同开采流程

4. 油气与铷、锶协同开采

(1) 技术路线

目前对铷、锶的分离提取技术研究仍处于实验研究阶段，尚无大规模成熟的工业应用。我国对铷资源的相关研究大多集中在成矿规律、开发利用管理及提取工艺等基础理论研究领域，亟需以现有技术专利为基础，加强“产学研”深度融合，组织开展离心机浓缩提纯等技术攻关，尽早形成具有自主知识产权且有竞争力的应用技术，突破国外相关技术封锁，助力国家创新驱动发展^[44]。

(2) 开采路径

地下卤水提铷、提锶开采路径如图7所示。近期（2028年前），开展卤水提铷、提锶实验研究，以四川盆地、柴达木盆地为重点开展资源勘探和评价。中期（2028—2035年），进行卤水高效提铷、提锶现场工业应用。远期（2035年以后），进行大规模油气田卤水提铷、提锶现场工业应用。

(3) 技术发展方向

近期重点发展铷、锶资源综合勘探技术，铷、锶资源综合评价技术，重点地区资源潜力评价及有利目标优选技术，卤水提铷、提锶实验技术。中远期发展卤水提铷、提锶现场应用技术，低品位卤水提铷、提锶实验和现场应用技术。

5. 地热与锂资源协同开采

(1) 技术路线

针对地热水中低锂浓度、低镁 / 锂比的特性，同时要满足地热水回灌的要求，优先选择直接提锂技术，如萃取法、吸附法、膜法等。萃取法提取地热水锂元素的提取流程如图8所示。

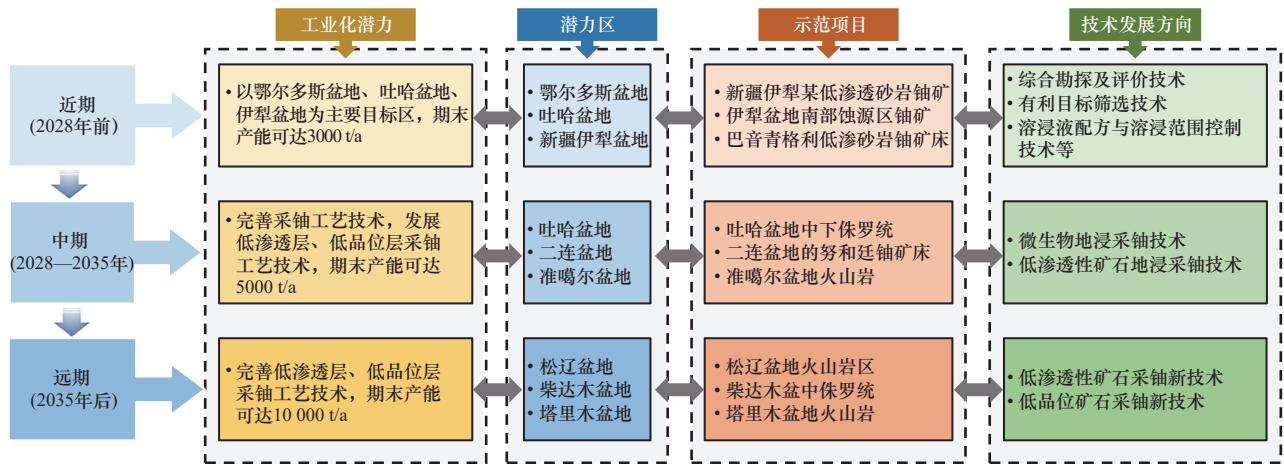


图6 油气与砂岩型铀矿协同开采路径

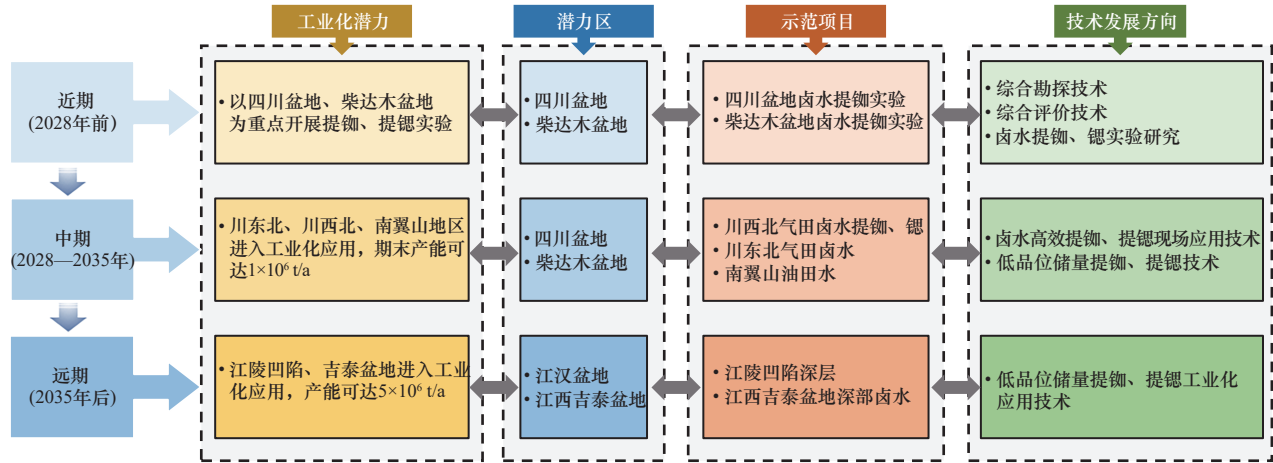


图7 地下卤水提铷、提铯开采路径

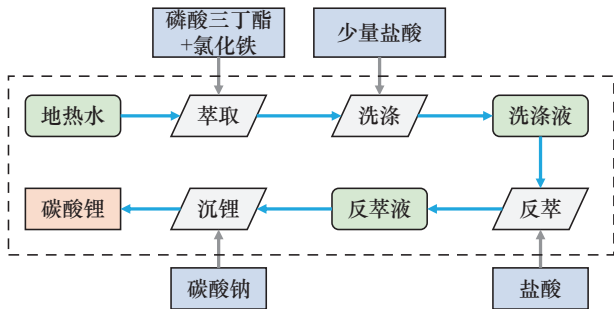


图8 萃取法提取地热水锂工艺流程

(2) 开采路径

地热水提锂开采路径如图9所示。近期（2028年前），开展地热水提锂资源综合勘探、评价技术研究，地热水提锂技术室内实验和矿场实验。中期（2028—2035年），建成西藏地区温泉和地热井提锂

先导示范项目。远期（2035年以后），研制较低锂含量地热水提锂技术，在四川、青海、山东、天津等地区开展地热水提锂现场工业应用。

(3) 技术发展方向

近期重点发展地热伴生锂资源的富集机理和分布规律研究技术、地热与伴生锂资源的综合勘探技术、地热与伴生锂资源的综合评价技术、地热与伴生锂资源的有利目标优选技术、地热水提锂现场应用技术。中远期开展较低锂含量地热水高效提锂技术实验和现场应用。

6. 地热与氦气协同开采

(1) 技术路线

针对地热水中的水溶性氦气品位高，但受限于地热水的开采规模较小，深冷法提氦具有能耗高、

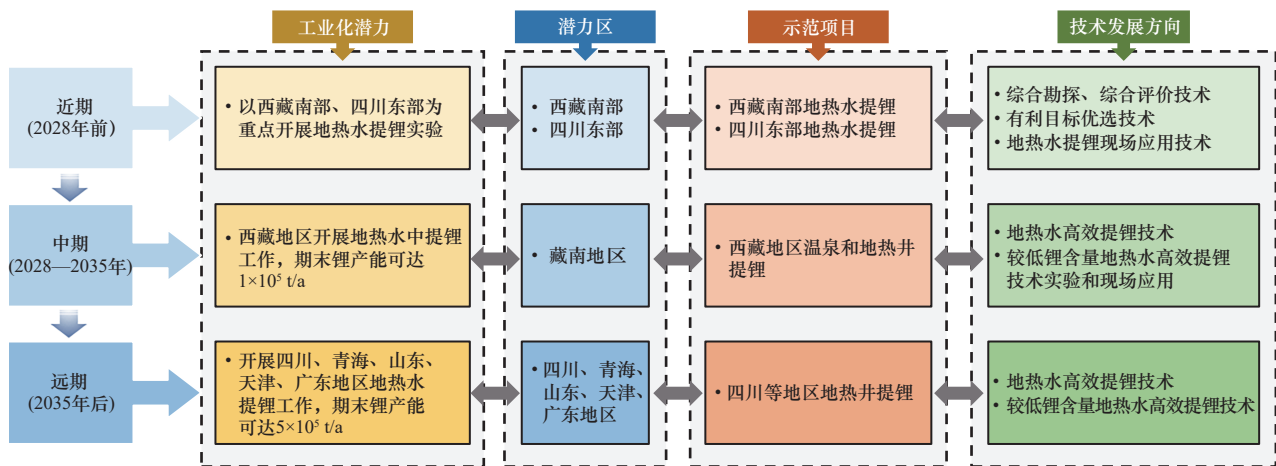


图9 地热水提锂开采路径

设备复杂、开发成本较高的特点，采用“常温膜分离+变压吸附”耦合技术进行氦气的提取，为地热伴生水溶氦气资源的开发利用提供了新的技术路线。相关工艺流程包括气水分离、增压净化、一级膜分离、二级膜分离、二次增压、变压吸附、存储等，具体工艺流程如图10所示。

(2) 开采路径

地热水提氦开采路径如图11所示。近期（2028年前），以关中盆地为主要目标区，开展深层地热与氦气多资源协同开发工作，完成国内首例地热水溶氦气提取，打通万方级地热水溶氦气提取技术工艺流

程。中期（2028—2035年），揭示深层地热伴生资源形成机制与富集规律，实现地热氦气协同开发关键技术突破，支撑地热伴生氦气达到规模化开发。远期（2035年后），开展低品位地热水高效提氦技术研究，进一步扩大开发规模。

(3) 技术发展方向

近期重点发展地热伴生氦气资源的富集机理、地热与伴生氦气资源的综合勘探技术、地热与伴生氦气资源的评价技术、地热与伴生氦气资源的有利目标优选技术、水溶氦气提浓（提纯）现场应用技术、地热与伴生氦气资源协同开发利用技术。

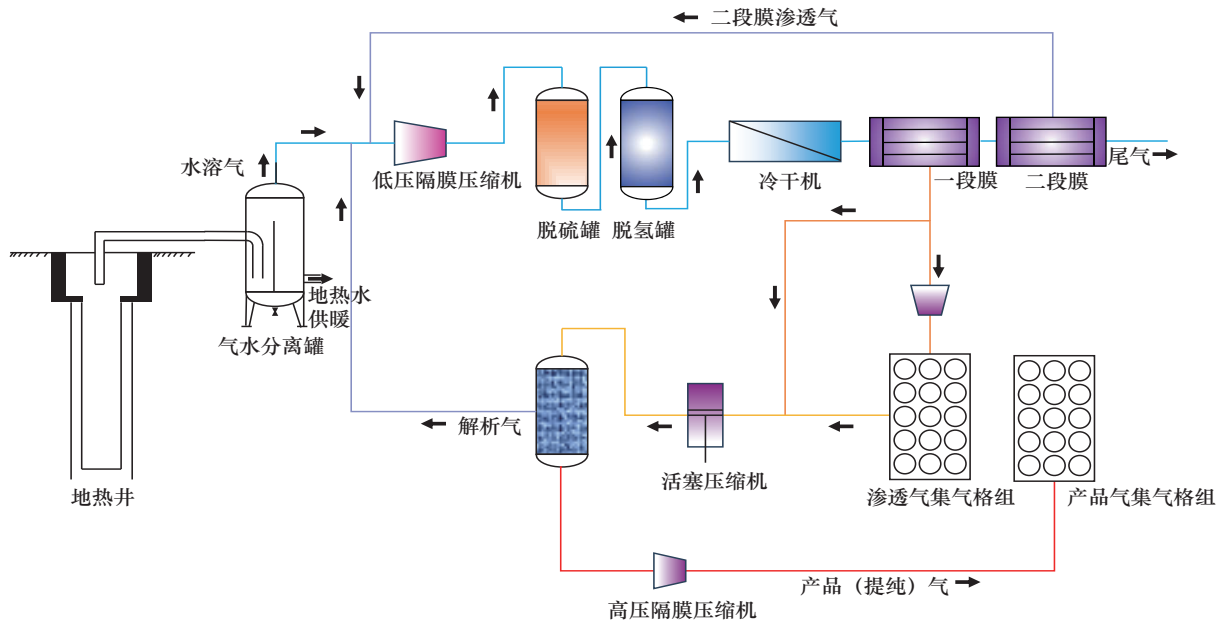


图10 水溶氦气提取、提纯工艺流程图

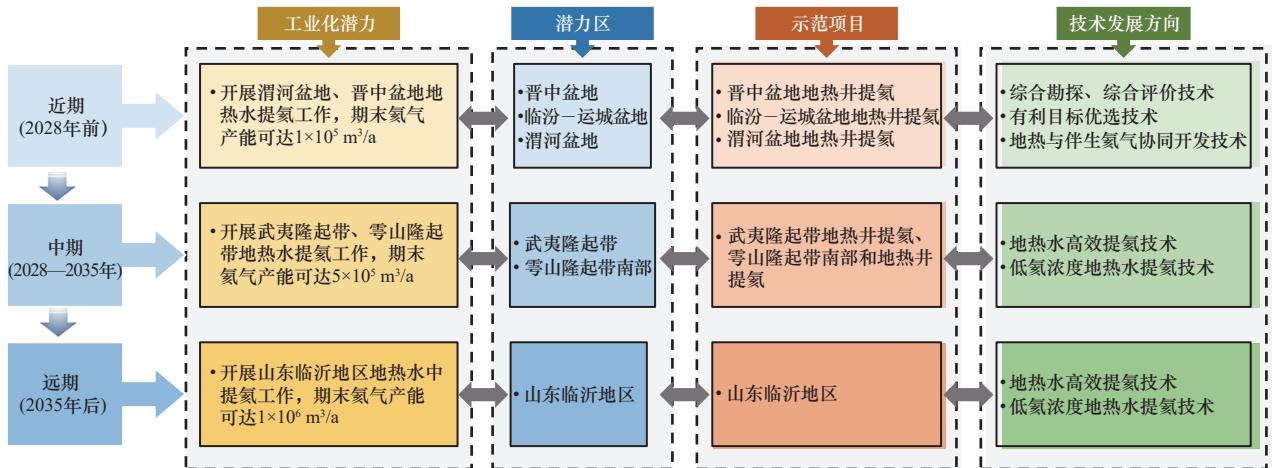


图11 地热水提氦开采路径

中远期开展地热水高效提氦技术实验和现场应用,开展低氦浓度地热水提氦技术研究。

五、结语

我国深部多类型矿产资源分布匮乏、品位低,对外依存度高,国外“卡脖子”的风险较大,深部多类型矿产资源协同开采对于保障国家能源资源安全具有重要意义。目前,深部多类型矿产资源综合利用程度低,协同开采存在技术标准不规范、相关政策配套不完全、管理体制不完善等问题,需加快构建技术标准规范支撑体系,逐步建立行业标准或国家标准;加强矿权区内多类型矿产资源开采效益综合评价,统筹考虑各种资源,实现多种资源协同开发,提高资源利用效率;通过税费减免、经费补贴等激励机制,从政策和资金等方面对具有竞争优势的企业进行重点扶持;将油气、地热与多类型矿产资源作为统一资源体,优先在资源富集、产业基础好、配套体系完备地区进行产能布局,一体化协同开发化解多类型资源开发管理瓶颈,推进产业链集中、协调、有序发展。

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: January 21, 2026; **Revised date:** February 11, 2026

Corresponding author: Sun Huanquan is a professor-level senior engineer from China Petroleum & Chemical Corporation, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include the theory, technology, and engineering practice of oil and gas exploration, as well as geothermal resource development. E-mail: sunhuanquan@sinopec.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Coordinated Development of Deep Geothermal Multi-resources” (2025-XBZD-03)

参考文献

- [1] 宋建军. 提高矿产资源开发利用效率的思考[J]. 国土资源情报, 2015 (9): 28–33.
Song J J. Thoughts on the improvement in utilization efficiency of mineral resources [J]. Land and Resources Information, 2015 (9): 28–33.
- [2] 李锦, 闫林, 王少军, 等. 基于大数据的油气共生矿产资源协同勘查及智能评价技术对策研究[R]. 合肥: 首届全国矿产勘查大会, 2021.
Li J, Yan L, Wang S J, et al. Research on cooperative exploration and intelligent valuation method of oil and gas coexisting and as-

- sociated mineral resources based on big data [R]. Hefei: The First National Mineral Exploration Conference, 2021.
- [3] 王昊, 张耀玲, 杨克利, 等. 四川盆地普光地区深层地下油田卤水溶解性有机质组成特征研究[J]. 盐湖研究, 2023, 31(4): 68–77.
Wang H, Zhang Y L, Yang K L, et al. Study on the compositional features of dissolved organic matter in a deep underground oil-field produced brine in the puguang area of Sichuan Basin [J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(4): 68–77.
- [4] 黄华, 张士万, 张连元. 潜江凹陷潜江组深层卤水矿产特征与资源评价[J]. 盐湖研究, 2015, 23(2): 34–43.
Huang H, Zhang S W, Zhang L Y. Mineral characteristics and resources assessment of the deep brine in Qianjiang formation, Ji-anghan depression [J]. Journal of Salt Lake Research, 2015, 23(2): 34–43.
- [5] 刘颖, 王云生, 乜贞, 等. 柴西深层地下卤水资源及其综合利用研究进展[J]. 无机盐工业, 2018, 50(1): 12–15, 27.
Liu Y, Wang Y S, Nie Z, et al. Research progress on comprehensive utilization of deep underground brine resources in western Qaidam Basin [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2018, 50(1): 12–15, 27.
- [6] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. 地球学报, 2021, 42(2): 137–144.
Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 137–144.
- [7] 邢凯, 朱清, 任军平, 等. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 2023, 42(8): 1402–1421.
Xing K, Zhu Q, Ren J P, et al. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(8): 1402–1421.
- [8] 张苏江, 崔立伟, 孔令湖, 等. 国内外锂矿资源及其分布概述[J]. 有色金属工程, 2020, 10(10): 95–104.
Zhang S J, Cui L W, Kong L H, et al. Summarize on the lithium mineral resources and their distribution at home and abroad [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(10): 95–104.
- [9] 王晓磊, 崔彬. 全球钾盐资源需求及供需格局分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(S2): 1–5.
Wang X L, Cui B. Analysis of supply and demand patterns of potassium salt resources in the world [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 1–5.
- [10] 唐金荣, 张宇轩, 周俊林, 等. 全球氦气产业链分析与中国应对策略[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 1–13.
Tang J R, Zhang Y X, Zhou J L, et al. Analysis of global helium industry chain and China’s strategy [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 1–13.
- [11] 李强, 陈攀, 王继斌, 等. 世界铀资源现状与我国核电发展资源保障的对策建议[J]. 中国矿业, 2023, 32(3): 1–9.
Li Q, Chen Q, Wang J B, et al. Current situation of uranium resources in the world and suggestions on resource guarantee of nuclear power development in China [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(3): 1–9.
- [12] 孙映祥, 林博磊. 国内外铷资源开发利用研究及政策建议[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 41–43.
Sun Y X, Lin B L. Research and policy suggestions on development and utilization of rubidium resources at home and abroad [J].

- China Mining Magazine, 2019, 28(11): 41–43.
- [13] 崔晓林. 中国锂矿资源需求预测及供需分析 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京) (硕士学位论文), 2017.
Cui X L. Demand projection of lithium resource and its demand & supply analysis in China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (Master's thesis), 2017.
- [14] 王莹. 中国钾资源供需现状与资源保障程度 [J]. 矿产勘查, 2023, 14(10): 1805–1813.
Wang Y. The supply and demand status and resource guarantee degree of potash in China [J]. Mineral Exploration, 2023, 14(10): 1805–1813.
- [15] 王石军. 全球钾肥产业发展现状与展望 [J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(10): 9–13.
Wang S J. Development status and prospect of potash fertilizer industry in the world [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(10): 9–13.
- [16] 张雪, 刘建朝, 李荣西, 等. 中国富氦天然气资源研究现状与进展 [J]. 地质通报, 2018, 37(2): 476–486.
Zhang X, Liu J C, Li R X, et al. Present situation and progress in the study of helium gas resources in China [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(2): 476–486.
- [17] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要 [J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1051–1069.
Cai Y Q, Zhang J D, Li Z Y, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 1051–1069.
- [18] 陈新军. 典型富氦区资源特征及开发利用前景分析——以中国石化油气矿业权区为例 [J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 84–88.
Chen X J. Analysis of resource characteristics and exploitation foreground of typical helium rich areas—A case study of Sinopec's oil and gas mining right area [J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(4): 84–88.
- [19] 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 氦气资源评价相关问题认识与进展 [J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 363–373.
Li Y H, Li J Y, Zhou J L, et al. Research progress and new views on evaluation of helium resources [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 363–373.
- [20] 孙艳, 王登红, 王成辉, 等. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向 [J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1231–1244.
Sun Y, Wang D H, Wang C H, et al. Metallogenetic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1231–1244.
- [21] 袁增, 何志强, 谭红, 等. 气田水资源含量分布特征及提取前景——以川东地区气田水锶和溴资源为例 [J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(1): 69–76.
Yuan Z, He Z Q, Tan H, et al. Distribution characterization and extraction prospects of resources in gas produced water: Strontium and bromine resources in gas produced water in the Eastern Sichuan area as an example [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(1): 69–76.
- [22] 秦胜飞, 李济远, 王佳美, 等. 中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式 [J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 125–134.
Qin S F, Li J Y, Wang J M, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 125–134.
- [23] 余小灿, 刘成林, 王春连, 等. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述 [J]. 地学前缘, 2022, 29(1): 107–123.
Yu X C, Liu C L, Wang C L, et al. Genesis of lithium brine deposits in the Jianghan Basin and progress in resource exploration: A review [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1): 107–123.
- [24] 陈新军, 李倩文. 江汉盆地卤水锂资源特征及开发利用前景 [J]. 国土资源情报, 2021 (11): 44–49.
Chen X J, Li Q W. The characteristics and exploitation prospect of brine lithium in Jianghan Basin [J]. Land and Resources Information, 2021 (11): 44–49.
- [25] 魏帅超, 张薇, 付勇, 等. 中国地热水中锂元素分布特征及资源开发利用 [J]. 中国地质, 2024, 51(5): 1527–1553.
Wei S C, Zhang W, Fu Y, et al. Distribution characteristics and resource potential evaluation of lithium in geothermal water in China [J]. Geology in China, 2024, 51(5): 1527–1553.
- [26] 罗璐, 周总瑛, 朱霞, 等. 西藏南部地热型锂资源特征与分布规律 [J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 35–42.
Luo L, Zhou Z Y, Zhu X, et al. Characteristics and distribution of geothermal-type lithium resources in southern Xizang [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 35–42.
- [27] 吴西顺, 成艾颖, 宋以龙, 等. 地热卤水锂资源的勘探开发及评价进展 [J]. 盐湖研究, 2025, 33(3): 95–104.
Wu X S, Cheng A Y, Song Y L, et al. Progress in exploration, development and evaluation of geothermal brine lithium resources [J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(3): 95–104.
- [28] Hao Y L, Wang Y C, Kuang X X, et al. Occurrence and enrichment mechanisms of helium in geothermal systems in continental China [J]. Gondwana Research, 2025, 141: 289–309.
- [29] 韩元红, 罗厚勇, 薛宇泽, 等. 渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 277–287.
Han Y H, Luo H Y, Xue Y Z, et al. Genesis and helium enrichment mechanism of geothermal water-associated gas in Weihe Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 277–287.
- [30] 李兆营, 张建太, 李付全, 等. 柴达木盆地临沂段地热水溶性氦气的分布特征及成因分析 [J]. 地质论评, 2025, 71(1): 328–340.
Li Z Y, Zhang J T, Li F Q, et al. Distribution characteristics and genetic analysis of geothermal water-soluble helium in the Linyi section of the Tanlu fault zone [J]. Geological Review, 2025, 71(1): 328–340.
- [31] 高娟琴, 王登红, 王伟, 等. 国内外主要油 (气) 田水中锂提取现状及展望 [J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1489–1500.
Gao J Q, Wang D H, Wang W, et al. Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil (gas) field waters [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1489–1500.
- [32] 陈立, 杨立, 刘韬, 等. 西南油气田含锂气田水资源调查分析 [J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 41–47.
Chen L, Yang L, Liu T, et al. Investigation and analysis of lithium-containing gas field water resource in Southwest Oil and Gas Field [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2023, 52(2): 41–47.
- [33] 韩佳欢, 郑绵平, 卞贞, 等. 我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景 [J]. 盐湖研究, 2024, 32(2): 90–100.
Han J H, Zheng M P, Nie Z, et al. Lithium and potassium resources of oilfield brine and development prospects in China [J].

- Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(2): 90–100.
- [34] 赵紫伊, 周雪, 王铁夫, 等. 油气田采出水锂资源回收可行性、技术现状及展望 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1434–1443. Zhao Z Y, Zhou X, Wang T F, et al. Feasibility, technical status and prospects of lithium recovery from produced water in oil and gas fields [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1434–1443.
- [35] 陈践发, 刘凯旋, 董劭伟, 等. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景 [J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1436–1449. Chen J F, Liu K X, Dong Q W, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436–1449.
- [36] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 1–10. He F Q, Wang F B, Wang J, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 1–10.
- [37] 陈磊, 刘宗铭, 孙洁. 中国氦气市场供需形势及氦气产业发展建议 [J]. 国际石油经济, 2023, 31(10): 76–83. Chen L, Liu Z M, Sun J. China helium market supply and demand situation and industry development recommendations [J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(10): 76–83.
- [38] 邹彦荣, 张瑾, 孙启邦, 等. 膜分离与变压吸附耦合工艺提氦试验研究 [J]. 膜科学与技术, 2024, 44(2): 150–156. Zou Y R, Zhang J, Sun Q B, et al. Experimental study on helium extraction by membrane separation and PSA coupling process [J]. Membrane Science and Technology, 2024, 44(2): 150–156.
- [39] 张青林, 周义朋, 穆志军, 等. CO₂+O₂地浸采铀强化浸出试验 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2020 (12): 48–53. Zhang Q L, Zhou Y P, Mu Z J, et al. Field trial on enhanced in-situ leaching of uranium by CO₂+O₂ leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020 (12): 48–53.
- [40] 陈梅芳, 谭亚辉, 张传飞, 等. 地浸采铀井网影响因素分析与评价研究 [J]. 中国矿业, 2024, 33(3): 243–248. Chen M F, Tan Y H, Zhang C F, et al. Analysis and evaluation of influencing factors on the well pattern of in-situ leaching uranium [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(3): 243–248.
- [41] 张万亮, 苏学斌, 张勇, 等. 大倾角砂岩型铀矿体地浸开采技术探讨 [J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 139–144. Zhang W L, Su X B, Zhang Y, et al. Discussion on in-situ leaching mining technology of large dip sandstone type uranium ore body [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(10): 139–144.
- [42] 傅昕, 王玲. 硅酸盐矿石资源中铷的提取工艺综述 [J]. 矿产综合利用, 2020, 41(6): 171–179. Fu X, Wang L. Review of technology of rubidium extraction from silicate ore resources [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 41(6): 171–179.
- [43] 刘超, 赵汀, 王登红, 等. 中国锶矿产业发展现状与未来发展战略思考 [J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1): 29–35. Liu C, Zhao T, Wang D H, et al. Strontium industry and future development strategy in China [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 29–35.
- [44] 苏鑫, 赖冬梅, 周源, 等. 自贡地下卤水制备富锶功能盐工艺研究 [J]. 无机盐工业, 2024, 56(3): 45–50. Su X, Lai D M, Zhou Y, et al. Study on preparation process of strontium rich functional salt from Zigong underground brine [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(3): 45–50.