

doi: 10.12029/gc20231008001

秦建强, 付德亮, 潘彤, 韩元红, 贺茂勇, 郭廷峰, 孟晓荣, 张绍栋, 贾建团, 张晓冬, 张丽维, 刘文革. 2025. 深层卤水高效开采面临的关键问题与对策[J]. 中国地质, 52(4): 1268–1286.

Qin Jianqiang, Fu Deliang, Pan Tong, Han Yuanhong, He Maoyong, Guo Tingfeng, Meng Xiaorong, Zhang Shaodong, Jia Jiantuan, Zhang Xiaodong, Zhang Liwei, Liu Wenge. 2025. Key problems and countermeasures of high efficiency mining of deep brine[J]. Geology in China, 52(4): 1268–1286(in Chinese with English abstract).

深层卤水高效开采面临的关键问题与对策

秦建强¹, 付德亮¹, 潘彤², 韩元红¹, 贺茂勇³, 郭廷峰², 孟晓荣⁴, 张绍栋²,
贾建团², 张晓冬², 张丽维¹, 刘文革¹

(1. 陕西省煤田地质集团有限公司(自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室), 陕西 西安 710021; 2. 青海省地质矿产勘查开发局(青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室), 青海 西宁 810001; 3. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061; 4. 西安建筑科技大学化学化工学院, 陕西 西安 710043)

摘要:【研究目的】近年来随着新能源产业的高速发展, 浅层卤水开采已经难以满足产业发展需求, 深层卤水开发越来越受到重视。全面分析深层卤水开采面临的关键问题, 提出相应的解决方案, 有助于推进深层卤水资源勘探开发技术的发展。【研究方法】本文针对深层卤水储层渗透性低、富水性弱、连续性差、矿化度高且黏度大等问题。基于文献调研, 系统分析了深层卤水目前在地质勘查、开采工艺、钻完井技术等方面存在的难点, 并提出了具体的解决思路, 并就未来技术发展方向提出了展望。【研究结果】(1)高质量的地质勘探是高效开采的首要前提, 开展针对性的深层卤水成矿地质模式的理论研究, 创新以区域地质背景与地球物理勘探技术相结合的深层卤水高效勘探方法, 是支撑圈定有利目标区的关键前提。(2)科学高效的洗井工艺、适当的储层渗透性改造、合理的增大过水面积和抽水降深等, 都是有望提升卤水抽采效率的方法。(3)针对性的深层卤水抽采井井壁稳定控制技术、钻井液及固井水泥浆技术、弱胶结塑性地层完井技术、深部卤水储层防腐钻完井器具及防结垢工艺的研究, 能够为深部卤水开采提供技术保障。【结论】随着未来高效吸附或膜分离等技术与回灌技术的发展, 不建盐田的前提下通过深层卤水开采-吸附-回灌一体化技术以及深层卤水与浅部可溶盐共采协同 CO₂ 封存技术有望成为更加高效、绿色、低碳的深层卤水开采方式。

关键词: 深层卤水; 水文地质调查工程; 成矿模式; 储层改造; 控制降深; 气驱; 回灌; 钻完井技术; CO₂ 封存

创 新 点: (1)系统梳理了深层卤水地质勘查、开采工艺、钻完井技术方面存在的问题与短板, 针对性地提出了相应的解决方案; (2)提出了基于移动吸附-回灌一体化的深层卤水高效开采工艺技术路径。

中图分类号: TD865; P641; X701 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1268-19

Key problems and countermeasures of high efficiency mining of deep brine

QIN Jianqiang¹, FU Deliang¹, PAN Tong², HAN Yuanhong¹, HE Maoyong³, GUO Tingfeng²,
MENG Xiaorong⁴, ZHANG Shaodong², JIA Jiantuan², ZHANG Xiaodong²,
ZHANG Liwei¹, LIU Wenge¹

收稿日期: 2023-10-08; 改回日期: 2024-01-29

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC2904301)和陕西省三秦英才计划青年拔尖人才项目联合资助。

作者简介: 秦建强, 男, 1965 年生, 正高级工程师, 主要从事地球物理勘查工作; E-mail: tc194jq@163.com。

通信作者: 付德亮, 男, 1988 年生, 高级工程师, 主要从事能源地质研究工作; E-mail: fudl3513@foxmail.com。

(1. Shaanxi Coal Geology Group Co., LTD., Key Laboratory of Coal Exploration and Comprehensive Utilization of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. Qinghai Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Qinghai Key Laboratory of Salt Lake Resources Exploration and Research of Qaidam Basin, Xining 810001, Qinghai, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi China; 4. Xi'an University of Architecture and Technology, School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an 710043, Shaanxi China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] With the rapid development of the new energy industry in recent years, shallow brine extraction has become increasingly inadequate to meet industrial demands. Consequently, deep brine development has gained significant attention. A comprehensive analysis of the key challenges in deep brine extraction and the proposal of corresponding solutions are crucial for advancing exploration and extraction technologies for deep brine resources. **[Methods]** This paper addresses the challenges associated with deep brine reservoirs, including low permeability, low water yield, poor continuity, high salinity, and high viscosity. Through an extensive literature review, it systematically analyzes the current difficulties in geological exploration, extraction techniques, and drilling/completion technologies for deep brine. Specific solutions are proposed, and future technological development directions are outlined. **[Results]** The study concluded that: (1) High-quality geological exploration is the primary prerequisite for efficient extraction. Conducting targeted theoretical research on deep brine metallogenic geological models and innovating efficient exploration methods that integrate regional geological background with geophysical prospecting technologies are key to identifying favorable target zones. (2) Scientifically efficient well-flushing techniques, appropriate reservoir permeability enhancement, rational increases in water flow area, and optimized pumping drawdown are all promising methods for enhancing brine extraction efficiency. (3) Targeted technologies—including wellbore stability control for deep brine extraction wells, specialized drilling fluids and cement slurry systems, completion techniques for weakly cemented plastic formations, and anti-corrosion/anti-scaling technologies for down hole tools in deep brine reservoirs—can provide essential technical safeguards for deep brine extraction. **[Conclusions]** With the future advancement of technologies such as efficient adsorption or membrane separation, combined with reinjection techniques, novel integrated approaches are expected to emerge as more efficient, eco-friendly, and low-carbon methods for deep brine extraction. These include: integrated deep brine extraction-adsorption-reinjection technology (eliminating the need for salt evaporation ponds) and synergistic deep brine extraction combined with shallow soluble salt mining and CO₂ sequestration.

Key words: deep brine; hydrogeological survey engineering; ore-forming mode; reservoir reconstruction; control drop depth; gas drive; recharge; drilling and completion technology; CO₂ storage

Highlights: (1) We systematically sorted out the problems and shortcomings in deep brine geological exploration, mining technology, drilling and completion technology, and put forward corresponding solutions; (2) An efficient mining technology path for deep brine based on the integration of mobile adsorption-recharge is proposed.

About the first author: QIN Jianqiang, male, born in 1965, professor-level senior engineer, engaged in geophysical exploration research; E-mail: tc194jq@163.com.

About the corresponding author: FU Deliang, male, born in 1988, senior engineer, engaged in the research of energy geology; E-mail: fudl3513@foxmail.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFC2904301), Shaanxi Province Sanqin Talent Plan Youth Top notch Talent Project.

1 引言

中国油气资源对外依存度长期居高不下,致使国家能源安全问题面临的挑战日趋严峻(邹才能等, 2020);另一方面,煤炭资源作为我国能源安全的战

略压舱石,其大规模开发利用也伴随着一系列生态环境问题(王双明等, 2023)。近年来,在“双碳”目标约束下,以锂电池和新能源汽车为代表的新能源产业蓬勃发展,有望助力我国能源产业实现“弯道超车”,同时有效降低化石能源在我国一次能源消

费结构中的占比,缓解能源安全问题(郑绵平, 2020; 韩佳欢等, 2021; 王卓等, 2023)。在此背景下,被誉为“白色石油”的锂资源作为战略新兴矿产资源,市场需求快速上升(邢凯等, 2023)。

目前,盐湖卤水型、伟晶岩型锂矿和沉积盆地或黏土岩型是锂资源开发利用的主要类型(王登红等, 2022),其中盐湖卤水型锂矿占全球锂资源探明储量的 64%(王卓等, 2023)。中国盐湖卤水资源约占世界盐湖卤水锂资源的 1/3, 主要分布在青藏高原,其中柴达木盆地盐湖卤水型锂资源约占我国卤水锂资源总量的 80%(刘成林等, 2021)。盐湖卤水锂资源赋存形式通常分为晶间卤水、孔隙-裂隙卤水以及地表卤水,三类卤水资源的开采难度依次降低(童阳春和周源, 2009; 王秋舒等, 2015; 韩积斌等, 2015)。由于卤水富集区域的限制,大量盐湖卤水位于生态脆弱区或基础设施条件较差地区,导致资源无法得到有效开发利用。长期以来,随着满足开发利用条件的浅层卤水资源高强度开采,现已难以满足新能源产业发展的需求,相应的深层卤水资源成为重要的接续资源(刘万平等, 2021; 潘彤等, 2022)。

中国深层卤水在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地、吉泰盆地、黄河三角洲等均有分布,在沉积类型方面,分为陆相沉积和海相沉积两大类,地质时代方面,从古生代到新生代也均有发育,水化学类型主要有氯化钠亚型、氯化钙型(李博昀等, 2019; 韩佳欢等, 2024)。总体而言,与浅部盐湖卤水相比,深层卤水存在补、径、排条件复杂,储层渗透性低、富水性弱、连续性差、储层非均质性强、地层泥质含量高、成岩程度低、给水度低且黏度大等问题,相应的给卤水开采带来极大难度(江梅, 2006; 谢学光等, 2010; 李文鹏和王黎栋, 2014; 韩积斌等, 2015; 张振国, 2016; 李文学等, 2018, 2021; 刘万平等, 2021)。

具体难点在于:(1)深层卤水成因机理尚不明确,地质勘探缺乏理论指导,深层富水区预测难度大、精度差(王秋舒等, 2015; 郑绵平等, 2016; 刘成林等, 2021; 潘彤等, 2022);(2)深层卤水储层非均质性强、连通性差,渗流机理和流体动力机制研究不足,深部卤水缺少针对性的高效开采方法(黄涛和杨立中, 1996; 焦鹏程等, 2003; 袁小龙等, 2018a; 赵艳军等, 2021);(3)深层卤水温度、压力高且腐蚀性

强,缺乏专门针对深层卤水开采的钻井工艺和器具,造成深层卤水钻完井施工周期长、使用寿命短。上述三方面的问题直接造成了深层卤水开采靶区质量差、深层卤水开采效率低、深层卤水抽采井工程成本高等问题。因此,创新深层卤水勘探地质理论、查明深层卤水渗流机理与动力学机制、优化深层卤水钻完井关键技术装备,是破解当前我国深层卤水开采难题的必然选择。

2 深层卤水地质成矿理论与地质勘探

2.1 深层卤水地质成矿模式

就基础成矿理论体系而言,盐湖卤水成矿是构造、气候、物源等因素相互耦合的结果(王秋舒等, 2015; 刘成林等, 2021)。全球盐湖主要分布于青藏高原、安第斯高原和北美西部高原,板块俯冲与大陆碰撞之后形成的高原地貌,导致高原内部来自大洋的水循环被破坏,使区域上的干旱气候是形成盐湖的必要条件(Bradley et al., 2013; 刘成林等, 2021)。在此前提下,随着大洋地壳俯冲至上地幔,在高温作用下发生脱水和部分熔融,进而钾、锂等轻质组分会随着岩浆进入浅部地壳;活跃的地质构造运动引起的热液活动会进一步将地壳中的锂等物质在水-岩反应过程中释放,最终汇集在湖盆内,在干旱气候条件下,经过长时期的蒸发浓缩,从而富集形成卤水矿藏(图 1),而盆地卤水的溢出、盆地底部卤水泄露、饱和卤水中盐析出、热液捕获含锂黏土的结晶、石盐流体包裹体捕获等因素均会造成卤水中锂元素的减少(Bradley et al., 2013)。

在特定的地质背景下,深层卤水的成矿模式具有一定的差异。例如,柴达木盆地一里坪—西台吉乃尔地区深层卤水为氯化钙型水体,含水层以中新世油砂山组湖相沉积为主,水化学及硼同位素组成特征显示,岩盐溶滤作用和封闭条件下的变质作用是深层卤水形成的主要原因(卢鋈等, 2021)。江汉盆地江陵凹陷、潜江凹陷深层卤水包括氯化物型、硫酸钠亚型、硫酸镁亚型等,高温水岩反应产生的富锂热液补给基础上,经过干旱条件下的蒸发浓缩和埋藏,后期富锂卤水在构造作用下形成的裂隙及孔隙内保存并聚集过程中,水岩反应进一步促进了锂资源的富集(余小灿等, 2022)。四川盆地东部三叠系海相同生沉积卤水为氯化钠型卤水,主要同高

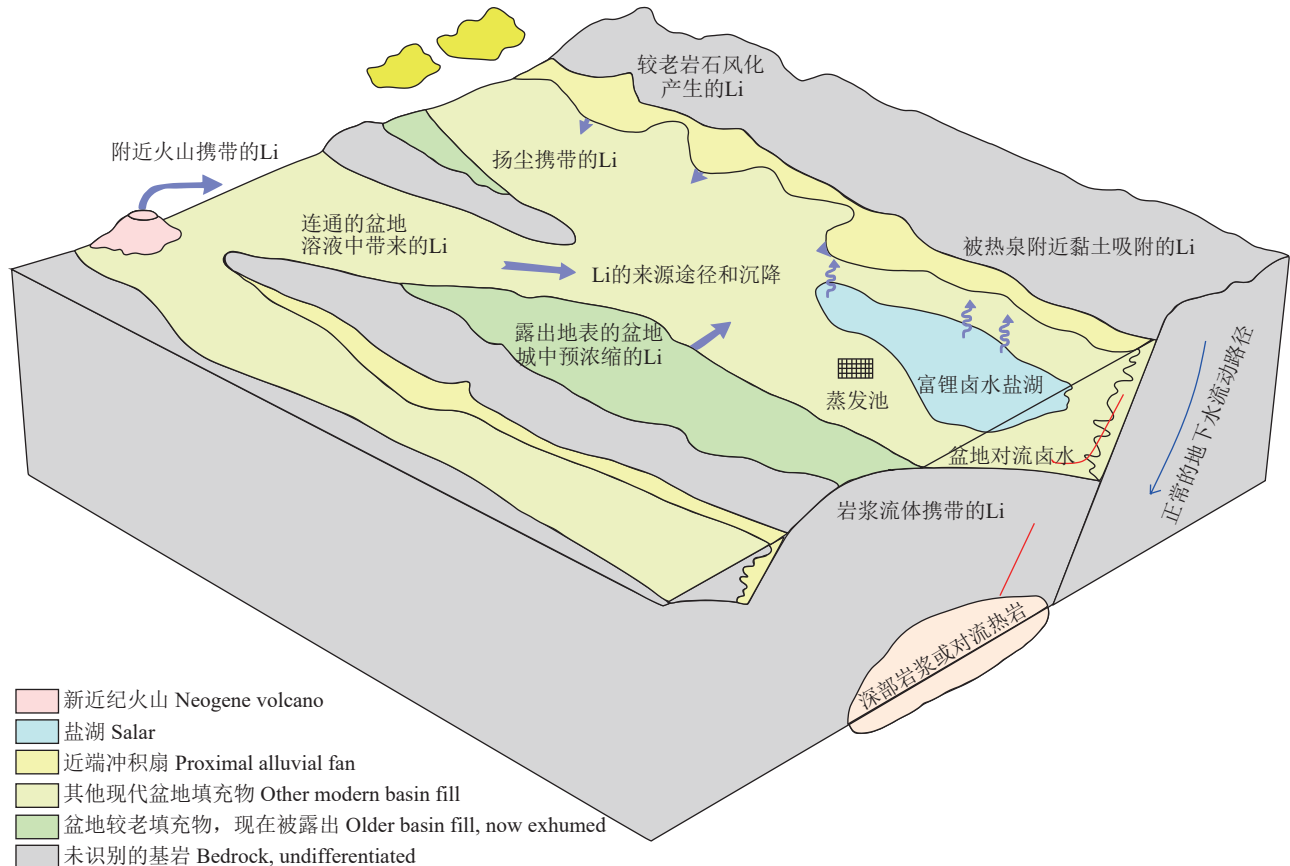


图 1 封闭盆地盐湖卤水型锂矿床成矿模式图(Bradley et al., 2013)

Fig.1 Schematic deposit model for lithium brines showing part of a closed-basin system consisting of interconnected subbasins (Bradley et al., 2013)

温高压且封闭还原条件下的脱硫酸作用和白云岩化作用有关(曹琴等, 2015)。

2.2 深层卤水勘查技术方法

高效率、高精度的地质勘探成果是资源高效开发的基本前提,进而决定了深层卤水可利用资源量的计算和今后开发利用价值的评估。在构造、沉积、水文等基础地质理论指导下,地球物理勘探技术是深层卤水勘查最主要的方法,遥感解释和地球化学勘查也是重要的辅助手段,而最终的勘查结果都需要通过钻探验证其准确性(刘成林等, 2010a; 赖中伟, 2020; 张华等, 2021; 王登红等, 2022; 李洪普等, 2022a)。

深层卤水储层的成岩程度、矿化度、富水性等在地震、电法、重力、测井等方面均存在特定的异常反应(杨修猛等, 2018; 何胜等, 2021a, 2021b; 侯献华等, 2021; 王彬玮等, 2021; 侯献华等, 2022)。地震与广域电磁法相结合的方法,一方面能够识别区

域构造形态的同时厘清含水层分布情况,另一方面能够结合区域储层的构造裂隙发育情况,初步推断卤水主要产出层位并指导勘探钻孔的布置。该方法充分发挥了地震勘探深度大且分辨率高的优点,也通过广域电磁法规避了地震方法对卤水储层分辨能力差的缺点(孟军海等, 2022)。

基础地质成矿理论与综合物探技术相结合的勘查方法,是实现卤水资源高质量地质勘探的有效模式。张性断裂对深层卤水的富集至关重要,在“含水墙”成矿模式(刘成林等, 2010b)和“陡倾集水廊道储卤模式”(焦鹏程等, 2016)等理论指导下,刘万平等(2021)在柴达木盆地别勒滩地区应用遥感解释查明区内张性断裂,结合重力方法探测容矿空间,综合应用音频大地电磁法(EH4)厘定了含水层的分布规律,最后通过氦气地球化学方法,在成矿断裂带准确定位卤水富集区(图 2)。侯献华等(2022)提出了基于神经网络联合反演技术的深层卤

水储层识别技术,该方法将测井、地震等相关参数深度融合,实现了深层卤水储层三维感应数据体的精确反映,在柴达木盆地南翼山深层卤水资源的勘探提供了有力支撑(图3)。

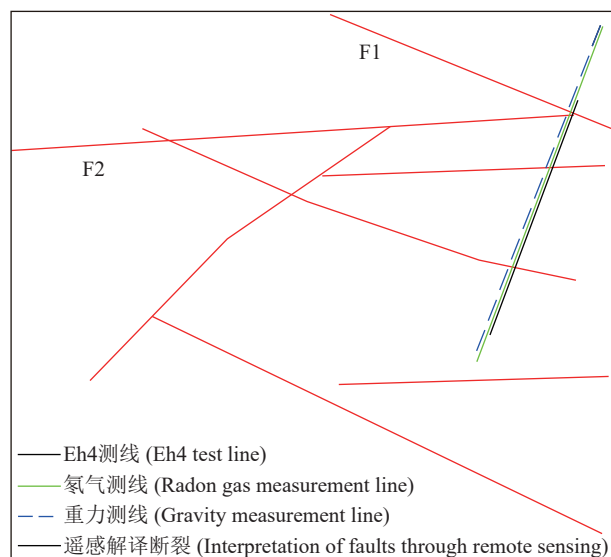


图2 柴达木盆地别勒滩地区富水断裂带定位和验证孔分布图(刘万平等, 2021)

Fig.2 The distribution of geophysical, geochemical survey lines in the Bieletan area (Liu Wanping et al., 2021)

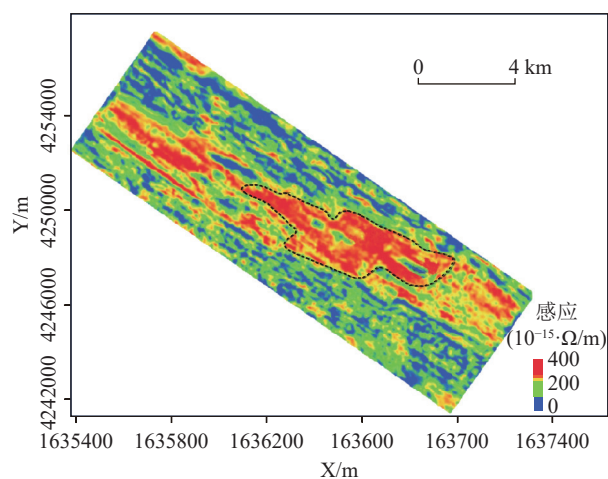


图3 神经网络联合反演南翼山富钾锂卤水储层1组分布图(据侯献华等, 2022)

Fig.3 Neural Network Joint Inversion of Distribution of group 1 of potassium-rich lithium brine reservoir in Nanyishan (after Hou Xianhua et al., 2022)

2.3 深层卤水勘探理论与技术的主要研究方向

目前,砂砾孔隙型卤水、构造裂隙孔隙型卤水地质成因模式争论不一(侯献华等, 2021; 胡舒娅等,

2022; 李洪普等, 2022a, 2022b; 李建森等, 2022), 针对不同矿区开展针对性的成矿理论模式研究,并在此基础上提出适用性强的勘探技术方法,是提升深层卤水勘查效率面临的关键科学问题。

有关深层卤水勘探理论与技术的研究,具体要针对深层卤水储层差异性大、地质结构复杂、水文地质条件特征不明晰,导致勘查精度低、有利区圈定难度大等问题展开。首先以深层卤水资源成矿机理研究为重点,开展基于储层沉积相、地震相、测井相与储层孔隙度、渗透率、富水性等关键参数的相关性研究。在此基础上深入分析深层卤水地质特征与聚集规律,基于水化学特征结合氢、氧、锂、镁等元素的同位素地球化学信息,回归区域沉积构造演化特征和水、岩地球化学特征背景分析,进而查明深层卤水补-径-排条件及元素迁移规律,揭示深层卤水聚集成矿机理,最终落脚在“构造控盆-盆控沉积-沉积控相控水”的基本理论(牟传龙和许效松, 2010),建立深层卤水成矿模式。

在深层卤水勘探技术方面,存在有效储层判断方法单一、精度低,评价标准不合理等问题。针对这一问题,以地质成矿理论为指导,一要使用高精度、高灵敏度测井、录井仪器,提高钻孔测、录井精度,为沉积岩相、地层岩性的识别及储层判断提供高精度数据支撑;二要探索物性测定仪器及方法,尝试模拟地下高温高压环境,准确测出钻孔固体样在原始状态下的孔隙度、给水度、渗透率、含水饱和度等;三要开展沉积构造演化、水文地质、综合物探等多技术手段的研究工作,分析孔隙度、给水度、渗透率、含水饱和度、密度等深层卤水储层富水性关键参数与相关地质特征的关联性,建立多技术手段相融合的资源勘查与评价体系,为深层卤水资源有利区的精准预测提供理论依据和技术支撑。

3 深层卤水渗流动力机制与高效开采技术

3.1 深层卤水渗流动力机制研究

深层卤水储层类型多样,主要包括砂砾孔隙型卤水储层、构造裂隙孔隙型卤水储层、溶蚀孔洞-裂隙型卤水储层(李博昀等, 2019; 李洪普等, 2022a, 2022b)。因此,从深层卤水储层类型特征入手,结

合卤水流体性质特征, 分析水-岩力学关系, 回归区域水文地质及沉积构造演化, 揭示卤水流体动力机制, 构建深层卤水渗流特征模型, 在此基础上, 阐明不同类型的深层卤水渗流机理, 是当前深层卤水开采面临的核心科学问题(Huq et al., 2015; 陈祥胜等, 2019; 常政, 2022)。水分子与储层岩石矿物界面之间的作用力以及水分子相互之间的作用力给卤水渗流带来了一定阻力, 同时导致卤水在储层孔隙内各处的渗流速度不均一, 也是卤水渗流形成层流的原因所在, 通常可以用 Darcy 定律来描述卤水渗流过程(焦鹏程等, 2003; 王恩志等, 2022)。卤水的静水压力、在构造作用下形成的地层超压、卤水内部存在的浓度差等都可以成为其渗流的主要动力(张勇等, 1999; 李顺才等, 2010)。深部卤水在储层内流动主要受到储层孔隙、渗透系数、地层温度、压力等因素的影响(赵艳军等, 2021; 余小灿等, 2022)。

储层孔隙方面, 其结构和类型等都会对卤水渗流产生影响。储层孔隙发育的微观结构特征, 包括孔隙度、孔径分布、孔体积、比表面积、渗透率等特征都会对卤水的渗流产生不同程度的影响。另一方面, 由于不同矿物表面与卤水之间的界面润湿性存在差异, 相应的反应在水-岩界面张力上面并影响卤水渗流过程(林梅钦等, 2018; 赵明国等, 2020; 梁星原等, 2021)。通常黏土矿物润湿性好, 与卤水之间界面张力较强, 同时黏土矿物发育大量的微观孔隙, 拥有更大的比表面积, 并且具有较强的吸水膨胀效应, 遇水后其渗流通道会进一步缩小, 因此, 储层当中以泥质沉积为主的情况下, 卤水渗流难度较大(刘雪玲等, 2019); 而石英、长石等脆性矿物不仅其水-岩界面作用力更弱, 并且其内部孔隙主要以微裂隙或溶蚀孔为主, 比表面积较小而孔体积较大, 所以储层以砂、粗粉砂为主时, 卤水渗流能力好。

渗透系数受到储层的孔隙、矿物成分、成岩程度等因素的影响, 同时也与流体的黏滞性及其密度等有关。储层方面, 其孔隙发育程度越好、连通性越强、矿物成分的水-岩界面作用力越弱、成岩粒度越均一、成岩程度越好, 则渗透系数越高(胡舒娅等, 2022)。而在流体性质方面, 由于流体的黏滞性受到矿化度及其离子组成、温度、密度等因素的影响, 对渗透系数的影响也就更为复杂(袁小龙等, 2018b)。

卤水矿化度越高, 密度随之增大, 其黏滞性也会相应的增大, 并且随着卤水渗流过程中的储层温度变化, 卤水离子可能发生结晶作用, 进而改变储层孔隙, 进一步改变渗透系数(袁小龙等, 2018a)。

3.2 深层卤水强化开采技术

长期以来, 浅部卤水开采技术已经得到了长足发展, 现已形成了井采、渠采、井渠结合、溶浸开采、气驱开采等多种开采技术(安莲英等, 2008; 王兴富等, 2014; 何茂雄, 2016; 都永生等, 2021; 付德亮等, 2023)。针对罗北凹地盐湖卤水储层连通性差、层间水力联系弱等问题, 李文学等(2021)提出了大气联通法及辅助孔注入卤水法, 很好地改善了卤水储层的连通性, 同时含水层的地层能量得到补充, 有效提升了承压卤水的开采效率。柴达木盆地大盐滩卤水矿经过长期开采, 目前含矿层渗透性差, 单井汇水面积有限, 存在卤水资源自然渗透补给难以接续的问题。对此, 王永军等(2021)利用非开挖钻井技术在含矿层构建了超长距离的水平井, 结合地面补水工程, 极大增强了抽水井的井下汇水强度, 改善了矿井抽水效率(图 4)。

深层盐湖卤水储层非均质性强、含泥量高、渗透性低、富水性弱、连续性差、矿化度高、黏度大等因素是造成其开采效率低的关键原因。目前, 深层卤水开采技术一方面参照常规地下水开采工艺, 另一方面参考油气资源抽采工艺。不同方法在具体应用中主要通过增强卤水渗流动力、降低卤水渗流阻力、增加汇水面积等方式来实现深层卤水的高效开采。增强卤水渗流动力方面, 得益于 CO_2 驱替技术在油气资源开采(CO_2 -ECBM、 CO_2 -EOR)(张守仁等, 2022; 宋新民等, 2023)、地热资源开发利用(CO_2 -EGS)(薛卉等, 2021)中的快速发展, 利用 CO_2 地质驱替深部卤水(CO_2 -EWR)也成为近年来的研究热点(杨国栋等, 2014; 房琦等, 2015; 彭国建等, 2017; 包一翔等, 2022)。该技术利用深层卤水开采后释放的储层空间实施深部 CO_2 封存, 一方面可以补充深部地层压力, 减少越流补给的风险, 提升卤水开采效率, 同时能够实现 CO_2 的安全封存。彭国建等(2017)对江陵凹陷深层卤水超临界 CO_2 驱替的布井方式做了较为全面的数值模拟研究, 结果显示“三角法”布井方式具有 CO_2 泄露风险小、卤水越流补给控制好等优势(图 5)。

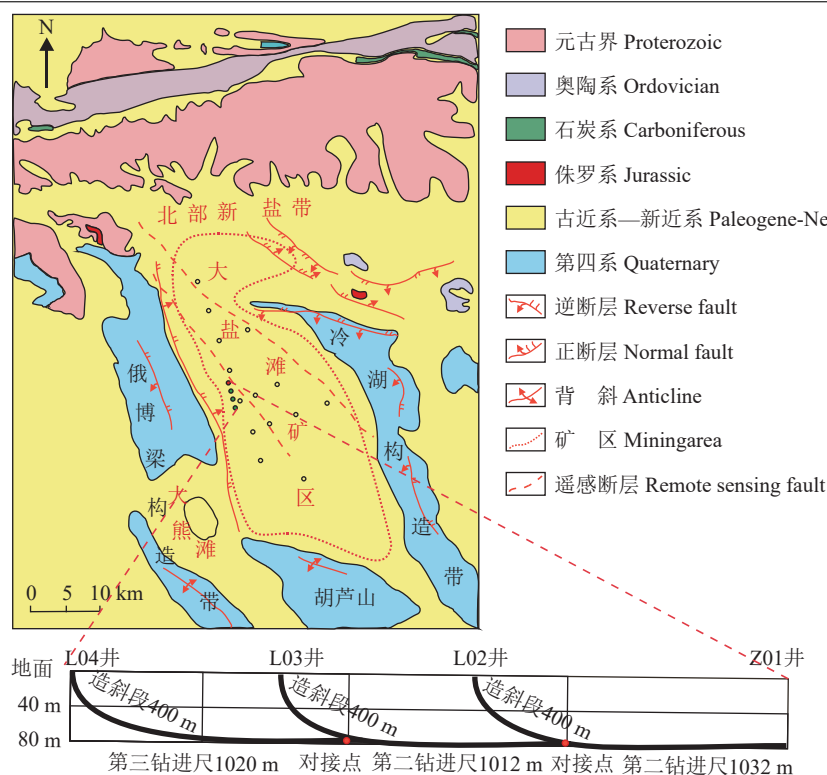


图4 大盐滩晶间卤水超长距离非开挖水平井强化开采方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of enhanced mining plan for trenchless long-distance non excavation horizontal wells of intergranular brine in the Great Salt Beach

射孔、压裂等储层改造技术可以有效降低卤水渗流阻力,但是卤水储层通常存在含泥量高、成岩程度低、易发生塑性变形等问题,射孔或压裂后其孔隙会随着储层的变形和泥质组分的迁移而闭合。因此在储层改造基础上,增加汇水面积是极其必要的,水平井或多分支井是增大单井汇水面积的

有效技术手段(郭文祥, 2022)。此外,深层卤水钻井过程中为防止井壁发生塑性变形,钻井泥浆与井壁结合程度较强,导致井壁孔隙堵塞,因此完井后的洗井作业也是重要的减阻手段(王正浩等, 2015; 张云等, 2019);抽水过程中因储层内泥质组分迁移造成孔隙堵塞,同样需要洗井来打开渗流通道。

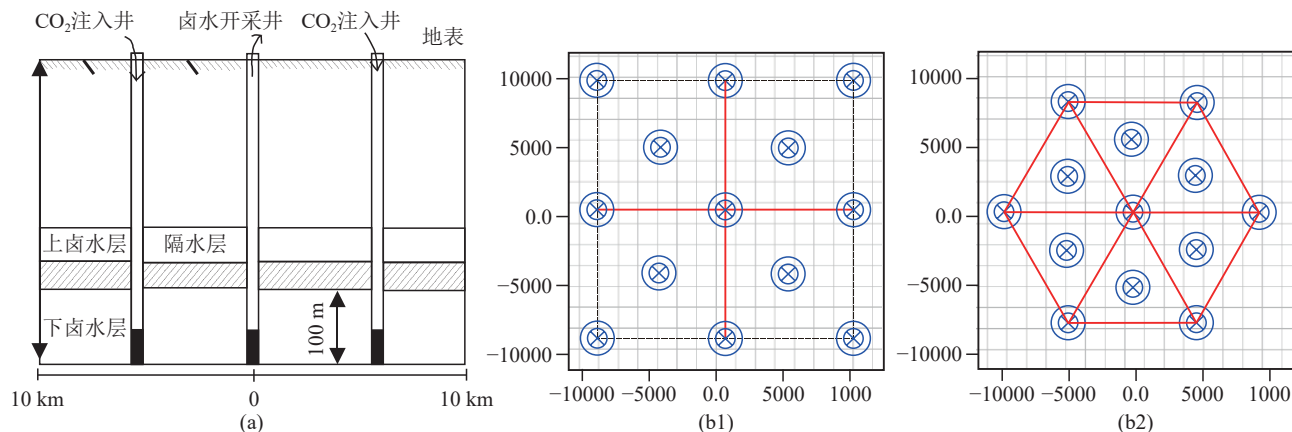


图5 CO₂ 驱替深层卤水井身结构示意图(a)及井群布设方案示意图(b1 为矩形布井法, b2 为三角布井法)(彭国建等, 2017)
Fig.5 Schematic diagram of CO₂ displacement deep brine well model (a) and the well pattern arrangement (b1 represents rectangle well pattern arrangement; b2 represents triangle well pattern arrangement) (after Peng Guojian et al., 2017)

3.3 深层卤水强化开采理论技术体系研究内容

笔者认为, 深层卤水强化开采理论技术体系研究, 应当以深层卤水渗流机理研究为突破口, 开展井身结构、储层改造、控制降深、注气补压、洗-抽循环等强化开采技术手段的适用性研究。通过深层卤水储层孔隙度、渗透率以及孔隙结构特征的全方面分析, 厘清深层卤水微观渗流通道。基于卤水流体物理性质, 结合储层岩石矿物组成特征, 开展储层孔隙表面卤水润湿性实验, 分析水-岩界面作用力关系。开展深层卤水高温高压渗流模拟实验, 明确深层卤水渗流规律特征。以上述微观渗流特征研究为基础, 回归研究区沉积构造演化特征分析, 结合区域流体压力、毛细管力、重力等力学关系, 进而建立深层卤水渗流动力模型, 揭示深层卤水渗流机理。

通过剖析深层卤水渗流机理, 在明确卤水流动性主控因素的基础上, 进一步通过抽采井的井身结构优化、储层压裂改造、抽采降深控制、注气补压、洗-抽一体化等多种强化开采技术的综合研究, 一方面降低深层卤水流动阻力, 另一方面增强深层卤水流动动力, 形成一套深层难采卤水多效耦合强化

开采技术体系, 从而实现深层卤水的高效开采。

4 深层卤水优快钻完井技术

4.1 深层卤水钻探成井技术

深层卤水储层具有含膏盐软泥岩地层的典型特征, 淤泥、黏土及泥岩含量高(图 6), 钻探过程中易发生塑性变形而形成缩径, 进而导致钻探过程中的扭矩增大, 蹩钻等现象, 严重时转盘无法转动, 甚至卡钻(杜文斌和王正浩, 2016; 文冬光等, 2022; 赵春永和党宇宁, 2023)。这不仅要求钻井泥浆能够很好地维持井壁稳定性, 也意味着钻具要具备很好的防卡、解卡和克服泥包的能力。另外, 深层卤水储层上覆地层成岩程度不均, 导致各层岩石硬度差异较大, 常见疏松性碎屑岩和砂岩、泥岩互层, 因此钻探过程中钻孔易弯曲, 一方面给钻具的保直能力提出了更高要求, 同时也给高质量完井带来了较大的挑战。

钻井液是稳定井壁、保护钻头、反排岩屑的关键, 常用的钻井液包括水基钻井液、油基钻井液以及合成基钻井液。针对深层卤水钻井易缩径、塌孔、卡钻等问题, 钻井液的密度、流变性、润滑性、

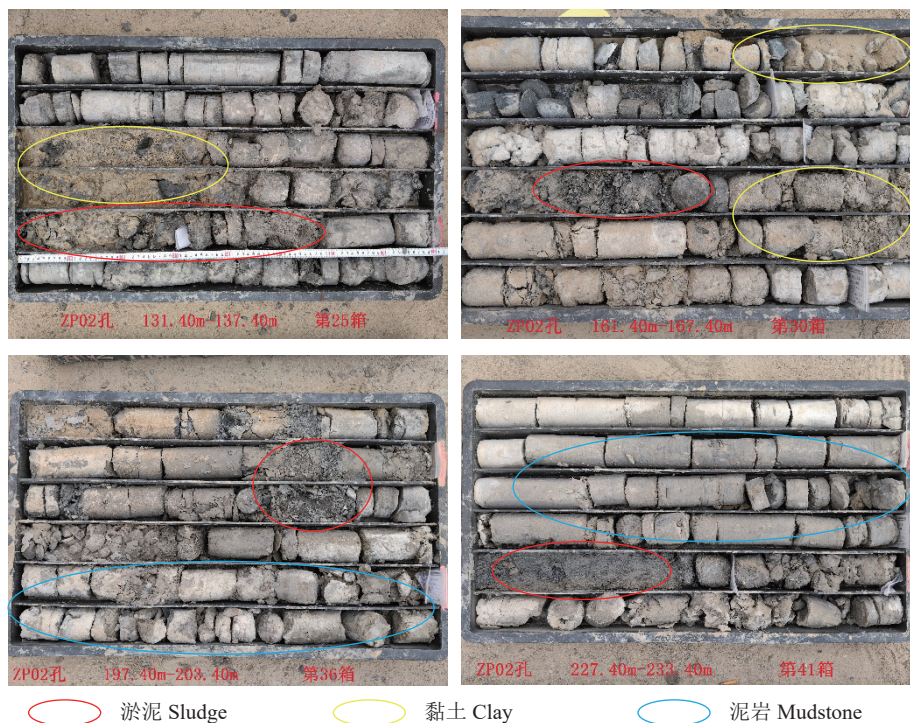


图 6 东台吉乃尔湖西段深层钾矿卤水普查项目 ZP02 钻孔岩心

Fig. 6 ZP02 borehole core for deep potassium mine brine survey project in the west section of Dongtaijinaier lake

抑制性、腐蚀性、耐高温能力等方面都需要根据实际地层条件满足特定的需求(朱金勇等, 2016; 杜文斌和王正浩, 2016; 唐庚等, 2020)。防砂完井是深层卤水普遍面临的问题, 常用的方式有裸眼完井、滤水管完井、砾石充填完井、固井射孔完井等(肖西卫等, 2003; 杜丙国, 2015; Zhang et al., 2019; 张春升等, 2019; 廖华林等, 2019)。由于深层卤水储层成岩程度低, 储层较松散, 因此裸眼完井通常不适用于深层卤水的开采。滤水管完井因为其产层裸露且渗流面积大而被广泛使用, 常见的滤水管完井有割缝衬管完井和绕丝筛管完井(李世贵等, 2010; 滕立强等, 2014)。深层卤水腐蚀性强, 所以滤水管材质的防腐能力至关重要, 同时滤水管结构也是决定防砂效果的关键, 不能实施分层开采、无法避免层间干扰是其主要缺点。砾石充填完井又分为裸眼砾石充填和套管内砾石充填两种(冯哲等, 2014; 麻惠杰, 2014), 该技术在中国引入相对较晚, 但是其成本低而且能够很好地预防塌孔, 因此在深层卤水开采的应用中具有很好的前景。固井射孔完井是在油气开发领域应用最为广泛的完井方式, 但是在卤水开采方面, 由于其渗流面积远小于滤水管完井, 并且射孔产生的物料残渣也会在一定程度上堵塞地层孔隙导致出水量减小, 因此其适用性较差。

此外, PDC 仿生钻头因为其在软—中硬岩层钻进中性能良好, 对深层卤水钻井工程具有很高的适用性, 能够有效克服钻头泥包问题且具有显著的脱附减阻效果(陈修平和邹德永, 2014; 思娜等, 2018; Chen et al., 2022)。科学组合扶正器、钻铤、钻杆, 配合合理的钻压、转速等, 能够有效提升钻孔保直能力。

4.2 深层卤水钻具防腐与防结垢

深层卤水温度高、含盐量高, 腐蚀性极强, 造成钻完井设备的破坏(图 7a), 导致卤水抽采井使用寿命短。常规油气井的腐蚀主要由于油气流体内含有的 H_2S 、 CO_2 等酸性气体, 而卤水内的溶解氧、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等组分与钻完井金属材料在较高的水温下发生电化学反应是造成其腐蚀的主要原因(马桂君等, 2008; 徐秋发等, 2015; 黄慧, 2022)。卤水温度、PH、压力、含盐量等对钻井器具的腐蚀也有较为显著的影响。其中, 温度对钻井材料的腐蚀影响最为敏感, 对较为常见的 N80 钢材, 当温度高于 60°C 后, 温度每升高 10°C , 腐蚀速率增加 2 至 4 倍(张清等, 2004; 周迎梅, 2018; 刘婉颖等, 2022)。目前常用的防腐技术主要包括涂层防腐、耐腐合金防腐、高分子保护层、阴阳极保护等等(韩国有和刘晓燕, 2004; 裘智超等, 2012; 姚茜等, 2021; 徐建国等, 2023), 其中耐腐材料和保护层相对较为常用。

深层卤水由深部高温地层抽至地表过程中, 随着井筒温度的降低, 由于盐分溶解度的降低, 盐分在井壁沉积产生结垢(图 7b), 盐分结垢不仅会造成井径缩小, 增大卤水抽采阻力, 同时还会增大管道腐蚀问题, 严重影响卤水抽采效率(张勇, 2009; 袁存光等, 2011; 唐娜等, 2017)。温度和溶解度是影响结垢的关键因素, 在此基础上卤水结垢是一个涉及热力学、结晶动力学、流体动力学的复杂过程(Wei et al., 2022)。随着卤水温度的降低, 由于不同盐分溶解度的变化, 难溶盐的析出使盐离子内部平衡被逐渐打破, 进而开始出现微小的盐类分子; 当盐类分子一旦附着成核开始发生结晶以后, 便会产生结垢; 卤水流动过程中内部分子之间的碰撞会



图 7 钻具腐蚀(a)及井壁结垢(b)
Fig.7 Corrosion of drilling tools (a) and well wall scaling (b)

加速晶体生长,促使结垢形成。根据结垢形成的机理,防结垢技术主要有超声-静电场协同防垢、磁防垢、阻垢剂防垢、镀层防垢等(周开学等, 1999; 陆海勤等, 2005; 张勇, 2009; 赵振等, 2023), 其中, 阻垢剂防垢是卤水开采领域应用较为广泛的技术。

4.3 深层卤水优快钻完井技术装备研究重点

针对膏盐层缩径、地层漏失、井涌等井下复杂情况频发, 钻井周期长, 成本高的问题, 基于岩石力学特征及井壁稳定性模型, 开展深层卤水开采井井壁稳定控制技术研究; 为解决钻井过程中卤水离子侵袭钻井液及钻井液漏失的问题, 基于地层特征和卤水离子分析, 通过实验室配比结合工程原位试验, 开展抗盐、快速堵漏的深层卤水强抑制防漏堵漏钻井液技术研究; 针对目标区弱胶结碎屑岩地层常出现的出沙、坍塌掉块、串层漏水等问题, 开展包括防沙防塌工艺, 止水工艺, 固井工艺等弱胶结塑性地层完井技术研究; 针对深层卤水开采井上下温压差大, 腐蚀性强, 易结垢堵塞等问题, 开展高抗盐、耐腐蚀完井开采装置的研制, 包括不同类型筛管、井管、钻具、水泵等器具的研制, 优选钻完井器具组合, 提高使用寿命, 降低钻井成本。

5 技术展望

5.1 深层卤水强化开采一体化工艺

柴达木盆地、江陵凹陷、四川盆地、黄河三角洲等地区的深层卤水富集区, 多不具备建造地面盐田的基本条件。在“双碳”目标约束下, 各行业的绿色低碳发展势在必行, 而卤水资源开发利用过程中, 常规强制蒸发工艺存在能耗高且尾水难处置的问题。利用西安建筑科技大学膜分离技术团队研发的“移动提锂装置”, 结合陕西省煤田地质集团热能开发利用团队研发的“移动回灌车”, 针对这一问题, 笔者团队以锂资源为例, 提出了一种基于移动提取及尾水回灌的一体化解决方案(图 8)。

首先, 卤水资源通过深井(图 8-2)由地下储层抽至地面, 通过可移动提锂站(图 8-4)提取卤水内赋存的锂资源, 尾水经过移动回灌车过滤(图 8-5)和加热(图 8-6), 一部分高温水或空气通过空压机(图 8-7)交替注入深井(图 8-3)驱替储层内的卤水资源, 另一部分经过加热产生蒸汽由浅井(图 8-12)注入至抽采井, 一方面溶洗因降温而结晶在管壁的结盐, 另一方面冲洗抽采井壁的泥质组分, 防止泥

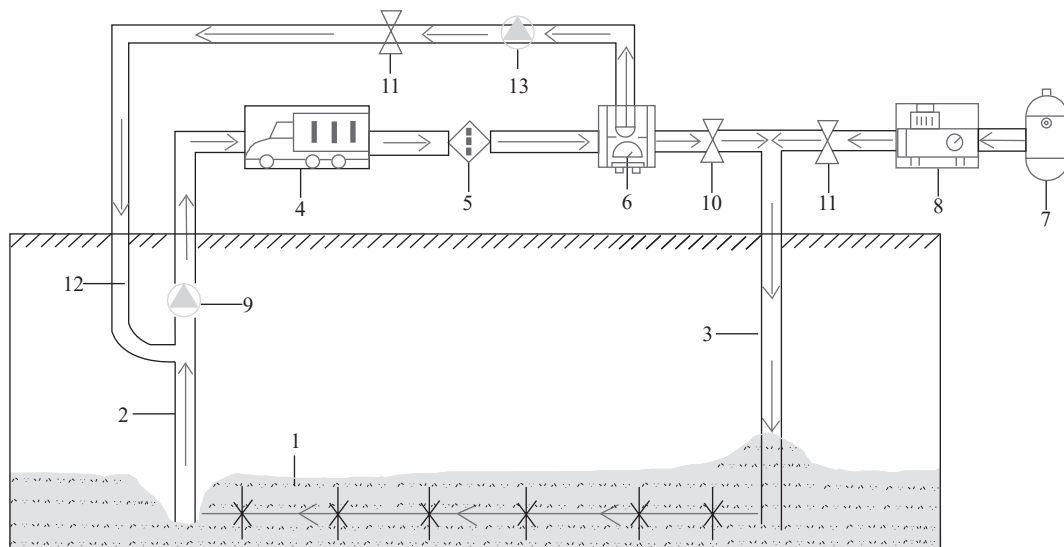


图 8 移动吸附提锂—尾水回灌一体化集成方案示意图

1—储层改造; 2—卤水抽采井; 3—尾水回灌井; 4—可移动吸附提锂站; 5—过滤装置; 6—加热站; 7—空压机; 8—移动回灌站; 9, 13—单向阀; 10, 11—控制阀; 12—高温水、气体段塞注入井

Fig.8 Schematic diagram of integrated solution for mobile adsorption lithium extraction and tail water recharge

1—Reservoir renovation; 2—Brine extraction wells; 3—Tailwater recharge wells; 4—Movable adsorption lithium extraction stations; 5—Filtration devices; 6—Heating stations; 7—Air compressors; 8—Mobile recharge stations; 9, 13—One-way valves; 10, 11—Control valves; 12—High temperature water and gas slug injection wells

沙对抽采井孔隙的堵塞。此外,该方法还将对储层进行射孔或压裂改造(图 8-1),可以实现更加高效的卤水抽采。该方案综合应用储层改造、气-水交替增能、高效洗井等工艺方法,有望为深层卤水的高效、绿色、低碳开发形成一体化解决方案。

需要指出的是,卤水作为一种富含钾、锂、硼、溴、碘等多种有用元素的综合性液体矿产,上述方案仅仅是以当前普遍较为关注的锂资源为例,对移动提取及尾水回灌的一体化解决方案进行解释,实际应用过程中,按照多种资源综合利用的原则,在未来技术发展过程中,随着膜分离、吸附材料等相关技术的发展,必然会形成移动提取+回灌于一体的多种资源综合利用技术体系。

5.2 深层卤水与浅部可溶盐共采与 CO₂ 封存

浅部盐湖地层剩余大量的光卤石、杂卤石等富含钾的可溶盐资源需要通过注水溶浸开采,然而溶浸开采往往需要大量的外部引水,通过自然渗透或人工钻井的方法注入可溶盐层,进而实现固体可

溶盐的开采。“双碳”目标要求下,CO₂ 地质封存越来越受到人们的重视,卤水地层和地下盐穴均具备很好的 CO₂ 地质封存潜力。基于此,笔者提出一种深部卤水与浅部可溶盐共采与 CO₂ 封存技术(图 9)。

本方案首先通过 CO₂ 驱替深层卤水,在实现深层卤水高效开采的同时,完成 CO₂ 地质封存,另外能够利用 CO₂ 补足地下流体压力,进而防止越流补给的发生。同时,本方案利用移动提锂技术完成深层卤水资源中主要有用资源的回收,之后将处理后得卤水通过浅部对接井注入可溶盐层,充分利用深部卤水资源对浅部可溶盐实施溶浸开采,不仅减少了水资源的无谓浪费,同时利用深部卤水温度较高的优势,能够进一步提升可溶盐的开采效率。第三,本方法通过对浅部可溶盐的溶浸,还可以构建具有极好密闭性浅部空腔,能够用于 CO₂ 地质封存体,实施 CO₂ 地质封存后,内部压力能够防止地表塌陷的发生。

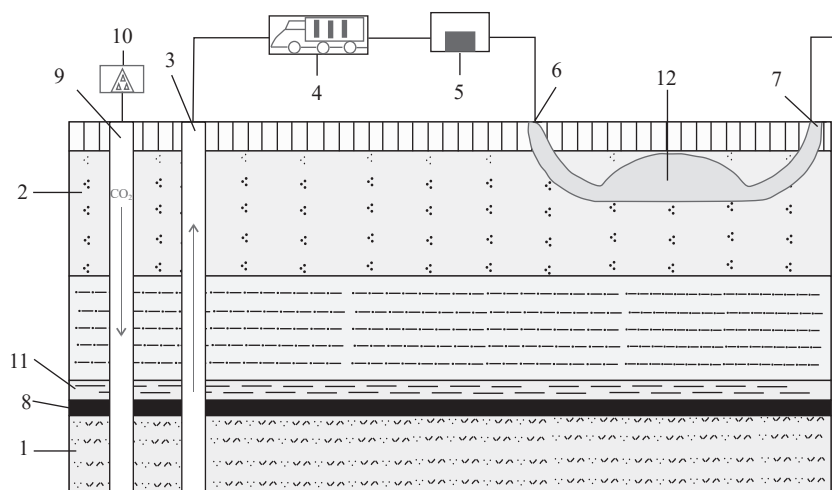


图 9 深层卤水与浅部可溶盐共采协同 CO₂ 封存方法示意图

1—深层卤水储层; 2—浅部可溶盐层; 3—深部卤水开采井; 4—移动吸附车; 5—移动回灌站; 6—卤水注入端; 7—浅部可溶盐卤水开采端; 8—隔水层; 9—CO₂ 注入井; 10—CO₂ 加压站; 11—上部含水层; 12—溶浸开采后的地下盐穴

Fig.9 Schematic diagram of collaborative carbon dioxide storage method for deep brine and shallow soluble salt Co extraction

1—Deep brine reservoirs; 2—Shallow soluble salt layer; 3—Deep brine extraction wells; 4—Mobile adsorption vehicle; 5—Mobile recharge station; 6—Brine injection end; 7—Shallow soluble salt brine mining end; 8—Waterproof layer; 9—CO₂ injection well; 10—CO₂ pressurization station; 11—Upper aquifer; 12—Underground salt caves after solution extraction

6 结论

(1)与浅层盐湖卤水相比,深层卤水储层渗透性低、富水性弱、连续性差、矿化度高且黏度大,相应

的给卤水开采带来极大难度。深层卤水在地质勘探方面缺乏科学的成矿理论指导、在开采技术方面缺乏系统全面的强化开采技术体系、在钻完井工艺方面缺乏针对性的优快钻完井工艺及装备是限制

深层卤水高效开采的关键问题。

(2) 深层卤水地质勘探研究应当以深层卤水水源成矿机理研究为重点, 以深层卤水成矿模式为理论指导, 结合综合物探技术研究, 建立多技术手段相融合的资源勘查与评价体系。深层卤水强化开采理论技术体系研究应当以深层卤水渗流机理研究为突破口, 在建立深层卤水渗流动力模型的基础上, 构建一套以增强卤水渗流动力、降低卤水渗流阻力为核心的多效耦合强化开采技术体系。深层卤水钻完井工艺方面, 重点围绕井壁稳定控制技术、防漏堵漏钻井液技术、防沙防塌工艺、止水工艺、固井工艺等完井技术、高抗盐、耐腐蚀完井开采装置等开展研究。

(3) 在“双碳”目标约束下, 随着未来高效吸附技术、膜分离技术与回灌技术的发展, 不建盐田的前提下通过深层卤水开采—有用元素提取—回灌一体化技术以及深层卤水与浅部可溶盐共采协同 CO₂ 封存技术有望成为更加高效、绿色、低碳的深层卤水开采方式。

References

- An Lianying, Yin Hui'an, Tang Minglin. 2008. Method for leaching and extracting potassium from mixed kainite ore [P]. Chinese Patent: CN100360693C, 2008-01-09.
- Bradley D, Munk L, Jochens H, Hynek S, Labay K. 2013. A preliminary deposit model for lithium brines[J]. USGS Professional Paper, 1006 1-6.
- Bao Yixiang, Li Jingfeng, Guo Qiang, Jiang Binbin, Su Chen. 2022. Review on technologies of geological resources exploitation by using carbon dioxide and its synchronous storage[J]. Coal Science and Technology, 50(6): 84–95 (in Chinese with English abstract).
- Cao Qin, Zhou Xun, Zhang Huan, Chen Ting, Zhang Yongshuai, Wang Lidong, Huang Xi, Shen Ye. 2015. Hydrochemical characteristics and genesis of the subsurface brines in the Wulonghe brine-bearing structure of Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 34(5): 990–997 (in Chinese with English abstract).
- Chang Zheng. 2022. Indoor simulation experiment research on seepage-dissolution of shallow brine reservoirs in the Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin[M]. University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese).
- Chen C, Yan J, Zou Y, Luo H. 2022. Geometric evolution, simulation, and test of a bionic lateral PDC reamer bit inspired by Capra sibirica Horn[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 6: 1–11.
- Chen Xiangsheng, Li Yinping, Shi Xilin, Yang Chunhe, Yang Jie. 2019. Research and development of long core erosion seepage device in deep formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(11): 2254–2262 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiuping, Zou Deyong. 2014. Bit balling mechanism and research progress in countermeasures for PDC bit drilling in mud shale formations[J]. Natural Gas Industry, 34(2): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Du Yongsheng, Shan Fashou, Qin Zhanjie, Fan Qishun, Wei Haicheng, Cheng Huaide, Zhang Xiyang, Li Qingkuan, Yuan Qin, Zhong Xiaoyong. 2021. A mining method of mixed halite in salt lake[P]. Chinese Patent: CN112253117A, 2021-01-22.
- Du Bingguo. 2015. Sand control completion technology by staged squeeze packing in openhole horizontal wells[J]. Oil Drilling and Production Technology, 37(2): 47–50 (in Chinese with English abstract).
- Du Wenbin, Wang Zhenghao. 2016. Complex formation drilling fluid technology of potassium salt mine in Qaidam Basin[J]. Energy Technology and Management, 41(1): 129–131 (in Chinese).
- Fang Qi, Li Yilian, Yu Ying, Liu Danqing. 2015. Effect of supercritical CO₂ injection capillary pressure on salt precipitation in deep brackish water layer[J]. Safety and Environmental Engineering, 22(2): 61–65.
- Feng Zhe, Wang Zongming, Wang Xiaolong, Jin Xin. 2014. Open hole gravel packing completion technology and its application in small hole horizontal Wells[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 33(2): 14–17 (in Chinese with English abstract).
- Fu Deliang, Qin Jianqiang, Han Yuanhong, Pan Tong, Guo Tingfeng, Liu Wenge, Zhang Shaodong, Jia Jiantuan, Zhang Xiaodong. 2023. A deep brine mining and shallow soluble salt co-mining system and CO₂ storage method[P]. Chinese Patent: CN116498290A, 2023-07-28.
- Gasda S E, Aavatsmark I. 2020. Estimation of reduced pressure buildup due to brine seepage using a convolution technique[J]. Computational Geosciences, 24(2): 625–640 (in Chinese with English abstract).
- Guo Wenxiang. 2022. Hydrogeological conditions and development countermeasures of potassium salt deposit in Kuntayi Great Salt Flat, Qaidam Basin[J]. Chemical and Mineral Geology, 44(4): 369–374 (in Chinese with English abstract).
- Han Guoyou, Liu Xiaoyan. 2004. Anti-corrosion and insulation technology and development trend of buried gathering and transportation pipelines at home and abroad[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 12: 51–52 (in Chinese).
- Han Jibin, Xu Jianxin, An Chao, Ma Haizhou, Han Fengqing. 2015. Mining technology and prospect of underground brine in salt lake[J]. Salt Lake Research, 23(1): 67–72 (in Chinese with English abstract).
- Han Jiahuan, Mi Zhen, Fang Chaohe, Wu Qian, Cao Qian, Wang Yunsheng, Bu Lingzhong, Yu Jiangjiang. 2021. Analysis of supply and demand of lithium resources in China[J]. Inorganics Salt Industry, 53(12): 61–66 (in Chinese with English abstract).

- Han Jiahuan, Zheng Mianping, Mi Zhen, Guo Tingfeng, Wu Qian, Wang Yunsheng, Cui Zhengdong, Ding Tao. 2024. Potassium and lithium resources in deep underground brine in China and their development prospects[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 32(2): 90–100 (in Chinese with English abstract).
- He Maoxiong. 2016. A mining method for deep pore brine and low grade solid potassium ore[P]. Chinese Patent: CN104314569B, 2016-04-13.
- He Sheng, Ma Wenxin, Gan Bin. 2021a. Application of surface nuclear magnetic resonance method and high density resistivity method in the exploration of salt lake brine potassium deposits in Tibet[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(6): 1409–1415 (in Chinese with English abstract).
- He Sheng, Su Shijie, Hou Lipeng. 2021b. Application of integrated geophysical exploration in the exploration of deep brine potassium deposits in the salt lake of Qaidam Basin[J]. *Geology and Resources*, 30(5): 628–636 (in Chinese with English abstract).
- Hou Xianhua, Feng Lei, Zheng Mianping, Wang Wei, Fan Fu, Zhao Weiyong, Gao Xuefeng. 2022. Identification method of potassium-rich lithium brine reservoir in Nanyishan[J]. *Earth Science*, 47(1): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- Hou Xianhua, Wang Wei, Zheng Mianping, Fan Fu, Li Hongpu, Gao Xuefeng. 2021. Study on seismic response characteristics of deep brine potassium salt reservoir in Hebei Depression-Dalangan, western Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 134–145 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shuya, Ren Jie, Li Jiqing, Zhao Quansheng. 2022. Permeability characteristics and brine enrichment mechanism of halogen reservoirs in Mahai Salt Lake, Qaidam Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 42(11): 2039–2046 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hui. 2022. Research on corrosion mechanism of metal materials in brine production and transport Equipment of Salt Lake[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 1–77.
- Huang Tao, Yang Lizhong. 1996. Study on mathematical model of seepage in deep underground brine under abnormal temperature and pressure[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, (1): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- Huq F, Haderlein S B, Cirkpa O A, Nowak M, Blum P, Grathwohl P. 2015. Flow-through experiments on water-rock interactions in a sandstone caused by CO₂ injection at pressures and temperatures mimicking reservoir conditions[J]. *Applied Geochemistry*, 58: 136–146.
- Jiang Mei. 2006. Salt deposition and corrosion prevention of salt lake brine transportation equipment[J]. *Industrial Minerals & Processing*, (7): 33–34 (in Chinese).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Wang Mili, Chen Yongzhi, Wang Xinmin. 2003. Motion characteristics and dynamics analysis of intergranular brines in Lop Nur Salt Lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 255–260 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Zhang Jianwei, Yao Fojun, Zhao Long. 2016. Exploration and research progress of potassium salt in deep brine of Mahai Salt Lake[J]. *Mineral Deposit Geology*, 35(6): 1305–1308 (in Chinese with English abstract).
- Lai Zhongwei. 2020. Detection technology and prospecting Direction of lithium metal minerals[J]. *World Non-Ferrous Metals*, (21): 59–60 (in Chinese with English abstract).
- Li Boyun, Deng Xiaolin, Wang Fan, Wang Zhanwen, Wei Zhao, Liu Xingwang, Deng Yufei, Zhang Mingming, Luan Junxia. 2019. Types, exploration techniques and suggested industrial indexes of deep-seated potassium-rich brine[J]. *Geology and Exploration*, 55(6): 1426–1435 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongpu, Hou Xianhua, Zheng Mianping, Fan Fu, Liu Xixi, Wang Shuli. 2022a. Discussion on metallogenic model and prospecting direction of Pleistocene sand gravel type deep brine potassium deposit in western Qaidam Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 34(3): 1043–1054 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongpu, Pan Tong, Li Yongshou, Jin Fang, Han Guang, Wang Guocang. 2022b. Geochemical composition and origin tracing of structural fissure pore brine in western Qaidam Basin[J]. *Earth Science*, 47(1): 36–44 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiansen, Li Tingwei, Ma Yunqi, Chen Fukun. 2022. Distribution characteristics and enrichment mechanism of key metal minerals of brine-type Li and Rb in Qaidam Basin[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 52(3): 474–485 (in Chinese).
- Li Shigui, Li Duoduo, Qi Chengwei, Liu Jingcheng, Li Qian. 2010. Calculation method of vertical well productivity in slotted liner completion[J]. *Oil and Gas Field Surface Engineering*, 29(12): 21–22 (in Chinese).
- Li Shuncai, Miao Xiexing, Chen Zhanqing, Mao Xianbiao. 2010. Nonlinear dynamics of non-isothermal seepage flow in fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Mechanical Mechanics*, 42(4): 652–659 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng, Wang Lidong. 2014. Discussion on some environmental geological problems caused by deep underground brine mining[C] // Xi'an: The 10th Academic Symposium on Building Renovation and Disease Treatment, and the 5th Academic Conference on Engineering Quality, 286–288 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue, Zhang Fankai, Wang Jiang, Chen Wei, Yang Baoheng. 2018. Experimental study on the characteristics of deep confined brine and its mining method in Lubei Sag liquid potassium salt Mine[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1605–1616 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxue, Zhang Fankai, Yu Yongmei, Zhao Liangliang, Ma Baocheng, Wang Lusha. 2021. Research on new technology and mining feasibility of confined brine in Lop Nur Salt Lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2121–2128 (in Chinese with English abstract).
- Liang Xingyuan, Zhou Fujian, Wei Wei, Liu Xiaodong, Liang Tianbo, Zhao Xurong, Han Guoqing. 2021. Research on wettability of tight oil reservoirs based on pore mineral and fluid distribution[J]. *Petroleum Drilling and Production Technology*, 43(5): 651–657, 674 (in Chinese with English abstract).
- Liao Hualin, Dong Lin, Niu Jilei, Zhou Huan, Zhang Lei, Cao Yanfeng.

2019. Test of screen plugging and erosion characteristics under gravel packing conditions[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 43(3): 90–97.
- Lin Meiqin, Hua Chao, Li Mingyuan. 2018. Adjusting reservoir rock surface wettability with salt water[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 136–144 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2010a. Discussion on potash salt prospecting model in basin[J]. *Mineral Deposit Geology*, 29(4): 581–592 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Ma Lichun, Jiao Pengcheng, Sun Xiaohong, Chen Yongzhi. 2010b. Chemical sedimentary sequence of Lop Nur Salt Lake and its controlling factors[J]. *Mineral Deposit Geology*, 29(4): 625–630 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yuan Xueyin, Li Ruiqin, Yao Fojun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution and metallogenetic dynamic model of brine-type lithium deposits in salt lakes in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2009–2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wanying, Li Jinyu, Gao Kechao, Zhang Zhi, Shang Suogui, Gao Qiangyong, Ma Jinxin. 2022. Effect of temperature on corrosion behavior of N80 steel in saturated CO₂ simulated formation and its mechanism[J]. *Surface Technology*, 51(8): 353–362 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wanping, Zhao Yanjun, Yao Fojun, Su Ye, Hu Yufei. 2021. A study of controlling effect of fault structure on the deep brine distribution in the Bieletan area, Qaidam basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2073–2081 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xueling, Liu Jinsong, Li Wanyi, Jiang Xin. 2019. Effects of recharge salinity and water head on permeability of brackish water reservoir[J]. *Chinese Journal of Solar Energy*, 40(2): 447–455 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jun, Pan Tong, Li Yongshou, Li Hongpu, Han Guang, Miao Weiliang, Zhang Xiyang. 2021. Hydrochemical characteristics and genesis of deep brine in Yiliping-Xitai Jiner area, central Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2129–2137 (in Chinese with English abstract).
- Lu Haiqin, Qiu Taiqiu, Liu Xiaoyan, Yang Rifu. 2005. Mechanism of ultrasonic and electrostatic field collaboration on scale prevention[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, (9): 82–86, 96 (in Chinese with English abstract).
- Ma Huijie. 2014. Application of in-pipe extrusion gravel packing sand control technology in high deviation Wells[J]. *Oil and Gas Well Testing*, 23(4): 40–42, 77 (in Chinese with English).
- Ma Guijun, Du Min, Liu Fuguo, Wang Qingzhang. 2008. Corrosion rule of G105 drill steel in the presence of dissolved oxygen[J]. *Chinese Journal of Corrosion and Protection*, (2): 108–111 (in Chinese with English abstract).
- Meng Junhai, Lin Jiafu, CAI Zhijie, Xue Guoqiang, Zhou Nannan, Li Hongpu, Ma Long, Wang Lijun. 2022. Geological characteristics and geophysical exploration of salt lake type lithium deposit in Qaidam Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(1): 124–131 (in Chinese with English abstract).
- Mu Chuanlong, Xu Xiaosong. 2010. Sedimentary evolution and petroleum geology in South China during the Early Palaeozoic[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(3): 24–29 (in Chinese with English abstract).
- Pan Tong, Li Shanping, Wang Tao, Han Guang, Jia Jiantuan. 2022. Metallogenic characteristics and prospecting potential of lithium deposit in Qinghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 96(5): 1827–1854 (in Chinese with English abstract).
- Peng Guojian, Fang Qi, Tan Kaixuan, Lv Junwen. 2017. Well group layout method for supercritical CO₂ enhanced deep brine mining[J]. *Journal of University of South China (Natural Science Edition)*, 31(4): 47–52 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Zhichao, Xiong Chunming, Chang Zeliang, Zhao Zhihong, Zhao Chun, Ye Zhengrong. 2012. Application of internal coating anticorrosive technology in the Tazhong I gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 32(10): 86–89, 118 (in Chinese with English abstract).
- Si Na, Wang Minsheng, Li Jing, Deng Hui, Guang Xinjun. 2018. New technology and development trend analysis of PDC bit[J]. *Oil Field Machinery*, 47(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Song Xinmin, Wang Feng, Ma Desheng, Gao Ming, Zhang Yunhai. 2023. Technology progress and prospect of carbon dioxide capture, oil displacement and storage in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 206–218 (in Chinese with English abstract).
- Tang Geng, Zhao Chaojie, Li Jun, Zhang Xin, Guo Jianhua, Lei Xianmei. 2020. Research on borehole diameter variation of salt-paste formation under drilling fluid[J]. *Drilling and Production Technology*, 43(6): 24–27, 7 (in Chinese with English abstract).
- Tang Na, Hao Jian, Zhong Cheng, Du Wei, Cheng Penggao. 2017. Study on continuous scaling experiment and cleaning process of calcium sulfate brine[J]. *Applied Chemical Industry*, 46(4): 711–714 (in Chinese with English abstract).
- Teng Liqiang, Wen Xiaobing, Bai Shikun. 2014. Study on sand control technology of high pressure extruded gravel packing with wire wrapped screen[J]. *Standards and Quality of Petroleum and Chemical Industry in China*, 34(5): 53 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yangchun, Zhou Yuan. 2009. New mining technology of modern salt lake brine deposit[J]. *Metal Mine*, (S1): 316–319 (in Chinese with English abstract).
- Wang Binwei, Eni Maimaiti, Lu Zhiming, Ma Chongyao, Chen Kegui. 2021. Log response characteristics and distribution of potassium salt in Arysium Depression, South Turgay Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 162–170 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022. Ten new developments and trends in exploration practice and theoretical research of lithium deposits in China in the past ten years[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743–764 (in Chinese with English abstract).
- Wang Enzhi, Zhang Dong, Liu Xiaoli, Wu Chunlu, Ma Qianchi, Wang

- Mingyang, Yao Wenli. 2022. Model and simulation of multi-structure and multi-flow flow in fractured rock mass[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 44(6): 894–902 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qishu, Qiu Jingzhi, Shao Henan, Xu Hong. 2015. Metallogenic characteristics and resource potential analysis of brine-type lithium deposits in global salt lakes[J]. *China Mining Industry*, 24(11): 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming, Shen Yanjun, Song Shijie, Liu Lang, Gu Linjun, Wei Jiangbo. 2023. Change of coal energy status and green low-carbon development under the "dual carbon" goal[J]. *Journal of China Coal Society*, 48(7): 2599–2612 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingfu, Wang Shijun, Tian Hongbin, Hai Jizhong, Tang Yongxin, Liu Wanping, Liu Binshan, Liu Dongqu, Wang Haiping, Lu Junde, Liu Yong. 2014. A brine Drilling and Production System [P] Chinese Patent: CN203978401U, 2014-12-03.
- Wang Yongjun, Liu Wenge, Li Funing, Cui Liaoliao, Fu Deliang, Zhang Xiaoliang, Yang Dan, Han Yuanhong. 2021. A horizontal well network structure for underground brine extraction [P]. Chinese Patent: CN212716561U, 2021-03-16.
- Wang Zhenghao, Shen Li, Song Zhongke. 2015. Research on application of brine drilling fluid in potash salt deposit drilling in Qinghai Province[J]. *Coal Geology of China*, 27(9): 55–58 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuo, Huang Ranxiao, Wu Datian, Xu Fengming, Sun Wei, Zhang Dehui, Zhao Yuandong. 2023. Basic characteristics of brine type lithium deposits in salt lakes and evaluation of their development and utilization potential[J]. *Geology in China*, 50(1): 102–117.
- Wei X, Liu Y, Shi X, Li Y, Ma H, Hou B, Shangguan S, Li Z, Niu Y. 2022. Experimental research on brine crystallization mechanism in solution mining for salt cavern energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 55: 1247–1262.
- Wen Dongguang, Song Jian, Diao Yujie, Zhang Linyou, Zhang Fucun, Zhang Senqi, Ye Chengming, Zhu Qingjun, Shi Yanxin, Jin Xianpeng, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Liu Donglin, Wang Xinfeng, Yang Li, Ma Xin, Wu Haidong, Zhao Xueliang, Hao Wenjie. 2022. Opportunities and challenges of deep hydrogeology research[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(3): 11–24 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiwei, Wang Xiaofeng, Liu Dongsheng, Wang Xudong. 2003. Secondary well formation technology of U-PVC gravel coated filter pipe well[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, (2): 77–79 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xueguang, Wang Youde, Ma Deren, Xia Zejun. 2010. Experimental Study on mining technology of confined brine in Mahai Potassium mining area, Qinghai[J]. *Chemical Minerals and Processing*, 39(8): 17–18, 40 (in Chinese with English abstract).
- Xing Kai, Zhu Qing, Ren Junping, Zou Xiehua, Niu Maolin, Liu Jun'an, Xiao Yang. 2023. Analysis of global lithium resource characteristics and market development trend[J]. *Geological Bulletin*, 42(8): 1402–1421 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jianguo, Chen Zuoming, Zhao Kaifeng, Chen Wei, Zhang Xinxin, Deng Jingyu, Li Ning, Wang Chen, Lv Xianghong. 2023. Research on internal anticorrosive technology of corrosion inhibitor combined with cathodic protection casing[J]. *Materials Protection*, 56(9): 161–168 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiufa, Gao Kewei, Pang Xiaolu, Liu Chao. 2015. Effect of Cl^- , SO_4^{2-} and CO_3^{2-} ions on Corrosion properties of carbon steel in Underground aqueous solution[J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 36(7): 166–173 (in Chinese with English abstract).
- Xue Hui, Shu Biao, Chen Keping, Lu Wei, Zhang Sen, Hu Yongpeng. 2021. Advances and prospects of fluid-granite interaction in CO_2 -based enhanced geothermal systems[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 45–53 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guodong, Li Yilian, Ma Xin, Atrens Aleks, Ni Hao. 2014. Research on supercritical CO_2 enhanced hot brine mining model[J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(6): 233–240 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiumeng, Liu Wenyu, Han Fengqing, Han Jilong, Hussain Syed Asim, Nian Xiuqing, Mao Qingfei, Yan Weide. 2018. Spatial distribution characteristics of underground brine in dry salt Lake area by nuclear magnetic resonance technology: A case study of Kuntayi Dry Salt Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 30(1): 220–233 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xi, Liu Li, Meng Fandi, Wang Fuhui. 2021. Research progress of acid-doped polyaniline in light alloy anticorrosive coatings[J]. *New Chemical Materials*, 49(10): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Xu Haiming, Zhao Yanjun, Huang Hua, Li Ruiqin. 2022. Genesis and resource exploration progress of large lithium rich brine deposit in Jiangnan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107–123 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Cunguang, Tang Shiming, Yu Jianfeng, Liu Shuwen, Zheng Qihua. 2011. Prediction of calcium sulfate scaling trend in brine pipeline in Jiangsu oilfield[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 35(4): 154–156 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Xiaolong, Sheng Jinchang, Zhang Xiyang, Li Binkai, Zhou Tongliang, Gao Donglin. 2018a. Influence of shallow halogen reservoir on brine composition in Kuntayi Salt Lake[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 45(2): 13–20 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Xiaolong, Zhang Xiyang, Sheng Jinchang, Gao Donglin, Li Binkai, Du Yongsheng, Wan Weihai. 2018b. Effects of ambient temperature on the chemical composition of brine and permeability of brine reservoir in salt lakes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1724–1732 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunsheng, Zhang Qinghua, Wei Yusen, Xing Hongxian, Zhang Jishuang, Wang Yao. 2019. Simulation test of sand control technology in loose sandstone heavy oil field[J]. *Petroleum*

- Machinery, 47(10): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Yan Hui, Zhang Fankai, Li Wenxue, Yu Yongmei, Ma Baocheng, Wang Jiang, Wang Lusha, Hu Yufei, Shen Lijian, Yao Fojun, Guo Cheng, Shanguan Shuantong, Su Ye, Zhang Yun. 2021. Deep potassium salt prospecting in Lop Nur Salt Lake Area: theory, exploration, progress and prospect analysis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2030–2040 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qing, Li Quan'an, Wen Jiuba, Bai Zhenquan. 2004. Effect of Temperature and pressure on $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ corrosion Rate of N80 steel[J]. *Oil field machinery*: (3): 42–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang R, Li Y, Yang B, Jia Z, Zhang F, Wang R, Li N, Zhou X. 2019. A segmenting method of long horizontal wellbore for staged sand control completion based on multi-dimension sequential clustering[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172: 1215–1225 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shouren, Sang Shuxun, Wu Jian, Zhou Xiaozhi, Zhang Bing, Yang Ruizhao, Guo Jianchun, Liu Xudong, Zhang Weiqi, Li Yong. 2022. Research and application of key technologies for CO_2 flooding CBM[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(11): 3952–3964 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong. 2009. Application of scale inhibitor in brine long-distance pipeline[J]. *Mine Salt in China*, 40(4): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Xue Yuqun, Xie Chunhong, Wu Jichun. 1999. Theoretical derivation of Darcy's Law considering the effect of concentration gradient[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, (1): 36–38, 41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yun, Li Xiaodong, Zhao Yan, Shanguan Shuantong, Liu Xianchuan, Yang Fengliang, Zhang Guobin. 2019. Drilling process of LDK02 hole for deep potassium salt geological science in Lop Nur Salt Lake[J]. *Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling Engineering)*, 46(9): 57–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenguo. 2016. New technology of directional docking connecting brine mining in complex geological brine Wells[J]. *China Mine Salt*, 47(1): 16–18 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chunyong, Dang Yuning. 2023. Analysis of deep brine drilling completion process[J]. *Geological Equipment*, 24(3): 28–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Mingguo, Wen Tao, Zhang Minglong, Jia Hui. 2020. Influence of rock minerals on wettability[J]. *Mathematics in Practice and Understanding*, 50(2): 170–178 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanjun, Jiao Pengcheng, Wang Mingquan, Zhang Dayi, Zhu Zhengguang, Hu Yufei. 2021. Characteristics, reservoir physical properties and water-rich areas of Li-rich brine in Yiliping Salt Lake, Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2062–2072 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen, Qin Guangxiong, Geng Songhe, Chen Huijuan, Chao Jiahao, Zhang Liang. 2023. Corrosion Properties and anti-corrosion measures of steel in geothermal water environment in Xining area[J]. *Geology in China*, 50(6): 1678–1690 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping. 2020. Innovation and open source to provide resource guarantee for the development of global lithium TV industry[J]. *Science and Technology Review*, 38(15): 1.
- Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Qi Wen, Kong Fanjing, Mi Zhen, Jia Qinxian, Bu Lingzhong, Hou Xianhua, Wang Hailei, Zhang Zhen, Kong Weigang, Lin Yongjie. 2016. Some advances and prospects of scientific and technological research on salt lakes in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2123–2166 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Kaixue, Lu Guiwu, Huang Qiaosong. 1999. Research Status and Progress of magnetic scale prevention mechanism[J]. *Journal of University of Petroleum (Natural Science Edition)*, (5): 109–112, 100 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yingmei. 2018. Experimental study on corrosion law of N80 steel in the process of flue gas flooding[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 25(5): 122–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinyong, Dong Hongdong, Chen Yili, Long Haitao, Li Xiaochen. 2016. Research on non-excavation directional drilling of macromolecular vegetable glue washing fluid in silty clay layer[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(30): 187–190 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Pan Songqi, Zhao Qun. 2020. On Connotation, Challenge and Significance of China's "Energy Independence" Strategy[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 416–426 (in Chinese with English abstract).
- Zou Yuliang. 2021. Research on Wall Stabilization Anti-deflection Drilling Fluid Technology for Weak Soil Layer Crossing[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–140 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安莲英, 殷辉安, 唐明林. 2008. 对杂卤石矿中钾的溶浸开采方法 [P]. 中国专利: CN100360693C, 2008-01-09.
- 包一翔, 李井峰, 郭强, 蒋斌斌, 苏琛. 2022. 二氧化碳用于地质资源开发及同步封存技术综述[J]. *煤炭科学技术*, 50(6): 84–95.
- 曹琴, 周训, 张欢, 陈婷, 张永帅, 王黎栋, 黄熙, 沈晔. 2015. 四川盆地卧龙湖储卤构造地下卤水的水化学特征及成因[J]. *地质通报*, 34(5): 990–997.
- 常政. 2022. 柴达木盆地察尔汗盐湖浅部储卤层渗流-溶解室内模拟实验研究[D]. 西宁: 中国科学院大学 (中国科学院青海盐湖研究所), 1–97.
- 陈祥胜, 李银平, 施锡林, 杨春和, 杨杰. 2019. 深部地层长岩心侵蚀渗流装置研发与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 38(11): 2254–2262.
- 陈修平, 邹德永. 2014. PDC 钻头泥页岩地层钻进泥包机理及对策研究进展[J]. *天然气工业*, 34(2): 87–91.
- 都永生, 山发寿, 秦占杰, 樊启顺, 魏海成, 程怀德, 张西营, 李庆宽,

- 袁秦, 钟晓勇. 2021. 一种盐湖杂卤石的开采方法[P]. 中国专利: CN112253117A, 2021-01-22.
- 杜丙国. 2015. 水平井裸眼分段挤压充填防砂完井工艺[J]. 石油钻采工艺, 37(2): 47-50.
- 杜文斌, 王正浩. 2016. 柴达木盆地钾盐矿复杂地层钻井液技术[J]. 能源技术与管理, 41(1): 129-131.
- 房琦, 李义连, 喻英, 刘丹青. 2015. 深部咸水层超临界 CO₂ 灌注毛细压力对盐沉淀的影响[J]. 安全与环境工程, 22(2): 61-65.
- 冯哲, 王宗明, 王晓龙, 金鑫. 2014. 小井眼水平井裸眼砾石充填完井技术及其应用[J]. 石油科技论坛, 33(2): 14-17.
- 付德亮, 秦建强, 韩元红, 潘彤, 郭廷峰, 刘文革, 张绍栋, 贾建团, 张晓冬. 2023. 一种深部卤水开采与浅部可溶盐共采系统及 CO₂ 封存方法[P]. 中国专利: CN116498290A, 2023-07-28.
- 郭文祥. 2022. 柴达木盆地昆特依大盐滩钾盐矿水文地质条件及开发对策[J]. 化工矿产地质, 44(4): 369-374.
- 韩国有, 刘晓燕. 2004. 国内外埋地集输管道防腐保温技术及发展趋势[J]. 油气田地面工程, (12): 51-52.
- 韩积斌, 许建新, 安朝, 马海州, 韩凤清. 2015. 盐湖地下卤水的开采技术及其展望[J]. 盐湖研究, 23(1): 67-72.
- 韩佳欢, 乜贞, 方朝合, 伍倩, 曹倩, 王云生, 卜令忠, 余疆江. 2021. 中国锂资源供需现状分析[J]. 无机盐工业, 53(12): 61-66.
- 韩佳欢, 郑绵平, 乜贞, 郭廷峰, 伍倩, 王云生, 崔政东, 丁涛. 2024. 我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景[J]. 盐湖研究, 32(2): 90-100.
- 何茂雄. 2016. 一种深部孔隙卤水及低品位固体钾矿的开采方法[P]. 中国专利: CN104314569B, 2016-04-13.
- 何胜, 马文鑫, 甘斌. 2021a. 地面核磁共振法与高密度电阻率法在西藏盐湖卤水钾矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 45(6): 1409-1415.
- 何胜, 苏世杰, 侯利朋. 2021b. 综合物探在柴达木盆地盐湖深层卤水钾矿勘查中的应用[J]. 地质与资源, 30(5): 628-636.
- 侯献华, 冯磊, 郑绵平, 王伟, 樊馥, 赵为永, 高雪峰. 2022. 南翼山富钾锂卤水储层识别方法[J]. 地球科学, 47(1): 45-55.
- 侯献华, 王伟, 郑绵平, 樊馥, 李洪普, 高雪峰. 2021. 柴达木盆地西部黑北凹地——大浪滩深部卤水钾盐储层地震响应特征研究[J]. 地质前缘, 28(6): 134-145.
- 胡舒娅, 任婕, 李吉庆, 赵全升. 2022. 柴达木盆地马海盐湖储层渗透特征及卤水富集机制[J]. 地理科学, 42(11): 2039-2046.
- 黄慧. 2022. 盐湖卤水采输设备金属材料的腐蚀机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 1-77.
- 黄涛, 杨立中. 1996. 异常温压条件下深层地下卤水渗流数学模型的研究[J]. 水文地质工程地质, (1): 35-39.
- 江梅. 2006. 盐湖卤水输送设备的防结盐及防腐蚀[J]. 化工矿物与加工, (7): 33-34.
- 焦鹏程, 刘成林, 王弭力, 陈永志, 王新民. 2003. 罗布泊盐湖晶间卤水运动特征及其动力学分析[J]. 地球学报, (3): 255-260.
- 焦鹏程, 张建伟, 姚佛军, 赵龙. 2016. 马海盐湖深部卤水钾盐勘查与研究进展[J]. 矿床地质, 35(6): 1305-1308.
- 赖中伟. 2020. 锂金属矿产探测技术与找矿方向[J]. 世界有色金属, (21): 59-60.
- 李博昀, 邓小林, 王凡, 王占文, 韦钊, 刘星旺, 邓宇飞, 张明明, 栾俊霞. 2019. 深层富钾卤水类型、勘查技术方法及工业指标建议[J]. 地质与勘探, 55(6): 1426-1435.
- 李洪普, 侯献华, 郑绵平, 樊馥, 刘溪溪, 王淑丽. 2022a. 柴达木盆地西部更新统砂砾型深层卤水钾矿成矿模式与找矿方向探讨[J]. 湖泊科学, 34(3): 1043-1054.
- 李洪普, 潘彤, 李永寿, 靳芳, 韩光, 王国仓. 2022b. 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水地球化学组成及来源示踪[J]. 地球科学, 47(1): 36-44.
- 李建森, 李廷伟, 马云麒, 陈福坤. 2022. 柴达木盆地卤水型 Li、Rb 关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J]. 中国科学: 地球科学, 52(3): 474-485.
- 李世贵, 李多多, 齐成伟, 刘竟成, 李倩. 2010. 割缝衬管完井方式下的直井产能计算方法[J]. 油气田地面工程, 29(12): 21-22.
- 李顺才, 缪协兴, 陈占清, 茅献彪. 2010. 破碎岩体非等温渗流的非线性动力学研究[J]. 力学学报, 42(4): 652-659.
- 李文鹏, 王黎栋. 2014. 浅谈深层地下卤水开采造成的若干环境地质问题[C]//第十届建构筑物改造和病害处理学术研讨会、第五届工程质量学术会议. 西安: 286-288.
- 李文学, 张凡凯, 王江, 陈伟, 杨宝恒. 2018. 罗北凹地液体钾盐矿深部承压卤水特征及其开采方法试验研究[J]. 地质学报, 92(8): 1605-1616.
- 李文学, 张凡凯, 于咏梅, 赵亮亮, 马宝成, 王露莎. 2021. 罗布泊盐湖承压卤水开采新技术及可采性研究[J]. 地质学报, 95(7): 2121-2128.
- 梁星原, 周福建, 魏韦, 刘晓东, 梁天博, 赵续荣, 韩国庆. 2021. 基于孔隙矿物和流体分布的致密油储层润湿性研究[J]. 石油钻采工艺, 43(5): 651-657, 674.
- 廖华林, 董林, 牛继磊, 周欢, 张磊, 曹砚峰. 2019. 砾石充填条件下筛管堵塞与冲蚀特性试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 43(3): 90-97.
- 林梅钦, 华朝, 李明远. 2018. 利用盐水调节油藏岩石表面润湿性[J]. 石油勘探与开发, 45(1): 136-144.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010a. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林, 马黎春, 焦鹏程, 孙小虹, 陈永志. 2010b. 罗布泊盐湖化学沉积序列及其控制因素[J]. 矿床地质, 29(4): 625-630.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009-2029.
- 刘婉颖, 李金宇, 高科超, 张智, 尚锁贵, 高强勇, 马金鑫. 2022. 温度对 N80 钢在饱和 CO₂ 模拟地层水下腐蚀行为的影响及机理[J]. 表面技术, 51(8): 353-362.
- 刘万平, 赵艳军, 姚佛军, 苏野, 胡宇飞. 2021. 柴达木盆地别勒滩地区断裂构造对深部卤水分布的控制作用研究[J]. 地质学报, 95(7): 2073-2081.
- 刘雪玲, 刘金松, 李婉艺, 姜鑫. 2019. 回灌盐度和水头对咸水储层渗透性能的影响[J]. 太阳能学报, 40(2): 447-455.
- 卢鋈, 潘彤, 李永寿, 李洪普, 韩光, 苗卫良, 张西营. 2021. 柴达木盆地中部一里坪—西台吉乃尔地区深层卤水水化学特征及成因初

- 探[J]. *地质学报*, 95(7): 2129–2137.
- 陆海勤, 丘泰球, 刘晓艳, 杨日福. 2005. 超声场-静电场协同防垢机理[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, (9): 82–86, 96.
- 麻惠杰. 2014. 管内挤压砾石充填防砂技术在大斜度井中的应用[J]. *油气井测试*, 23(4): 40–42, 77.
- 马桂君, 杜敏, 刘福国, 王庆璋. 2008. G105 钻具钢在含有溶解氧条件下的腐蚀规律[J]. *中国腐蚀与防护学报*, (2): 108–111.
- 孟军海, 林佳富, 才智杰, 薛国强, 周楠楠, 李洪普, 马龙, 王丽君. 2022. 柴达木盆地盐湖型锂矿床地质特征与地球物理探测[J]. *地球科学与环境学报*, 44(1): 124–131.
- 牟传龙, 许效松. 2010. 华南地区早古生代沉积演化与油气地质条件[J]. *沉积与特提斯地质*, 30(3): 24–29.
- 潘彤, 李善平, 王涛, 韩光, 贾建团. 2022. 青海锂矿成矿特征及找矿潜力[J]. *地质学报*, 96(5): 1827–1854.
- 彭国建, 房琦, 谭凯旋, 吕俊文. 2017. 超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的井群布设方法[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 31(4): 47–52.
- 裘智超, 熊春明, 常泽亮, 赵志宏, 赵春, 叶正荣. 2012. 油管内涂层防腐技术在塔中 I 号气田的应用[J]. *天然气工业*, 32(10): 86–89, 118.
- 思娜, 王敏生, 李婧, 邓辉, 光新军. 2018. PDC 钻头新技术及发展趋势分析[J]. *石油矿场机械*, 47(2): 1–7.
- 宋新民, 王峰, 马德胜, 高明, 张云海. 2023. 中国石油二氧化碳捕集、驱油与埋存技术进展及展望[J]. *石油勘探与开发*, 50(1): 206–218.
- 唐庚, 赵超杰, 李军, 张鑫, 郭建华, 雷现梅. 2020. 钻井液作用下膏盐层井径变化规律研究[J]. *钻采工艺*, 43(6): 24–27, 7.
- 唐娜, 郝建, 仲成, 杜威, 程鹏高. 2017. 硫酸钙型卤水连续结垢实验及清洗工艺研究[J]. *应用化工*, 46(4): 711–714.
- 滕立强, 文晓兵, 白诗岷. 2014. 绕丝筛管高压挤压砾石充填防砂工艺研究[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 34(5): 53.
- 童阳春, 周源. 2009. 现代盐湖卤水矿床开采新技术[J]. *金属矿山*, (S1): 316–319.
- 王彬玮, 艾尼·买买提, 卢志明, 马崇尧, 陈科贵. 2021. 南图尔盖盆地 Arysium 坳陷钾盐的测井响应特征及其分布[J]. *地学前缘*, 28(6): 162–170.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 28(5): 743–764.
- 王恩志, 张东, 刘晓丽, 吴春璐, 马前驰, 王明阳, 姚文理. 2022. 裂隙岩体多结构多流态渗流模型与模拟[J]. *地球科学与环境学报*, 44(6): 894–902.
- 王秋舒, 邱景智, 邵鹤楠, 许虹. 2015. 全球盐湖卤水型锂矿床成矿特征与资源潜力分析[J]. *中国矿业*, 24(11): 82–88.
- 王双明, 申艳军, 宋世杰, 刘浪, 顾霖骏, 魏江波. 2023. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. *煤炭学报*, 48(7): 2599–2612.
- 王兴富, 王石军, 田红斌, 海吉忠, 唐永新, 刘万平, 刘斌山, 刘东曲, 王海平, 卢俊德, 刘勇. 2014. 一种卤水钻井开采系统[P]. 中国专利: CN203978401U, 2014-12-03.
- 王永军, 刘文革, 李富宁, 崔辽辽, 付德亮, 张晓亮, 杨丹, 韩元红. 2021. 一种用于地下卤水抽采的水平井网结构[P]. 中国专利: CN212716561U, 2021-03-16.
- 王正浩, 申立, 宋仲科. 2015. 卤水钻井液在青海钾盐矿层钻探中的应用研究[J]. *中国煤炭地质*, 27(9): 55–58.
- 王卓, 黄冉笑, 吴大天, 许逢明, 孙巍, 张德会, 赵院冬. 2023. 盐湖卤水型锂矿基本特征及其开发利用潜力评价[J]. *中国地质*, 50(1): 102–117.
- 文冬光, 宋健, 刁玉杰, 张林友, 张福存, 张森琦, 叶成明, 朱庆俊, 史彦新, 金显鹏, 贾小丰, 李胜涛, 刘东林, 王新峰, 杨骊, 马鑫, 吴海东, 赵学亮, 郝文杰. 2022. 深部水文地质研究的机遇与挑战[J]. *地学前缘*, 29(3): 11–24.
- 肖西汪, 汪晓峰, 刘冬生, 王旭东. 2003. U-PVC 贴砾滤水管井中二次成井技术[J]. *水文地质工程地质*, (2): 77–79.
- 谢学光, 王有德, 马得仁, 夏泽军. 2010. 青海马海钾矿区承压卤水开采工艺试验探讨[J]. *化工矿物与加工*, 39(8): 17–18, 40.
- 邢凯, 朱清, 任军平, 邹谢华, 牛茂林, 刘君安, 肖阳. 2023. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. *地质通报*, 42(8): 1402–1421.
- 徐建国, 陈作明, 赵凯峰, 陈伟, 张鑫鑫, 邓菁玉, 李宁, 王晨, 吕祥鸿. 2023. 缓蚀剂联合阴极保护套管的内防腐技术研究[J]. *材料保护*, 56(9): 161–168.
- 徐秋发, 高克玮, 庞晓露, 刘超. 2015. 地下水溶液中 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 CO₃²⁻ 离子对碳钢腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 36(7): 166–173.
- 薛卉, 舒彪, 陈科平, 路伟, 张森, 胡永鹏. 2021. CO₂ 基增强型地热系统中流体-花岗岩相互作用研究进展及展望[J]. *地质科技通报*, 40: 45–53.
- 杨国栋, 李义连, 马鑫, Atrens Aleks, 倪浩. 2014. 超临界 CO₂ 增强热卤水开采模型研究[J]. *地质科技情报*, 33(6): 233–240.
- 杨修猛, 刘文玉, 韩凤清, 韩继龙, Hussain Syed Asim, 年秀清, 毛庆飞, 严维德. 2018. 应用核磁共振技术分析干盐湖地区地下卤水空间分布特征——以昆特依干盐湖为例[J]. *湖泊科学*, 30(1): 220–233.
- 姚茜, 刘莉, 孟凡帝, 王福会. 2021. 酸掺杂聚苯胺在轻合金防腐涂层中的研究进展[J]. *化工新型材料*, 49(10): 58–62.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 徐海明, 赵艳军, 黄华, 李瑞琴. 2022. 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*, 29(1): 107–123.
- 袁存光, 唐仕明, 于剑峰, 刘树文, 郑秋花. 2011. 江苏油田卤水输送管道中硫酸钙结垢趋势预测[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 35(4): 154–156.
- 袁小龙, 盛金昌, 张西营, 李斌凯, 周同亮, 高东林. 2018a. 昆特依盐湖浅部储卤层对卤水组成的影响[J]. *水文地质工程地质*, 45(2): 13–20.
- 袁小龙, 张西营, 盛金昌, 高东林, 李斌凯, 都永生, 万维汉. 2018b. 环境温度对盐湖卤水化学组成及储卤层渗透性变化的制约[J]. *地质学报*, 92(8): 1724–1732.
- 张春升, 张庆华, 魏裕森, 邢洪宪, 张纪双, 王尧. 2019. 疏松砂岩稠油油田防砂工艺模拟试验研究[J]. *石油机械*, 47(10): 43–48.
- 张华, 刘成林, 焦鹏程, 颜辉, 张凡凯, 李文学, 于咏梅, 马宝成, 王江, 王露莎, 胡宇飞, 沈立建, 姚佛军, 郭城, 上官栓通, 苏野, 张云.

2021. 罗布泊盐湖区深部钾盐找矿: 理论、勘查、进展及前景分析[J]. *地质学报*, 95(7): 2030–2040.
- 张清, 李全安, 文九巴, 白真权. 2004. 温度和压力对 N80 钢 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 腐蚀速率的影响[J]. *石油矿场机械*, (3): 42–44.
- 张守仁, 桑树勋, 吴见, 周效志, 张兵, 杨瑞召, 郭建春, 刘旭东, 张伟祺, 李勇. 2022. CO_2 驱煤层气关键技术研发及应用[J]. *煤炭学报*, 47(11): 3952–3964.
- 张勇. 2009. 阻垢剂在卤水长输管道中的应用[J]. *中国井矿盐*, 40(4): 14–16.
- 张勇, 薛禹群, 谢春红, 吴吉春. 1999. 考虑浓度梯度作用的达西定律理论推导[J]. *水文地质工程地质*, (1): 36–38, 41.
- 张云, 李晓东, 赵岩, 上官拴通, 刘现川, 杨风良, 张国斌. 2019. 罗布泊盐湖深部钾盐地质科学钻探 LDK02 孔冲洗液工艺[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 46(9): 57–62.
- 张振国. 2016. 复杂地质盐卤井定向对接连通开采盐卤水新技术[J]. *中国井矿盐*, 47(1): 16–18.
- 赵春永, 党宇宁. 2023. 深层卤水钻孔完井工艺分析[J]. *地质装备*, 24(3): 28–32.
- 赵明国, 文韬, 张明龙, 贾辉. 2020. 岩石矿物对润湿性的影响[J]. *数学的实践与认识*, 50(2): 170–178.
- 赵艳军, 焦鹏程, 汪明泉, 张大义, 朱振光, 胡宇飞. 2021. 柴达木盆地一里坪盐湖富锂卤水特征、储层物性及富水区分析[J]. *地质学报*, 95(7): 2062–2072.
- 赵振, 秦光雄, 耿松鹤, 陈惠娟, 晁嘉豪, 张亮. 2023. 西宁地区地热水环境中钢材腐蚀性能及防腐措施建议[J]. *中国地质*, 50(6): 1678–1690.
- 郑绵平. 2020. 创新开源, 为全球锂电大产业发展提供资源保障[J]. *科技导报*, 38(15): 1.
- 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 齐文, 孔凡晶, 乜贞, 贾沁贤, 卜令忠, 侯献华, 王海雷, 张震, 孔维刚, 林勇杰. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. *地质学报*, 90(9): 2123–2166.
- 周开学, 卢贵武, 黄乔松. 1999. 磁防垢机理研究现状与进展[J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, (5): 109–112, 100.
- 周迎梅. 2018. 烟道气驱油过程中 N80 钢的腐蚀规律实验研究[J]. *油气地质与采收率*, 25(5): 122–126.
- 朱金勇, 董洪栋, 陈礼仪, 龙海涛, 李晓晨. 2016. 淤泥质黏土层非开挖定向钻进高分子植物胶冲洗液研究[J]. *科学技术与工程*, 16(30): 187–190.
- 邹才能, 潘松圻, 赵群. 2020. 论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义[J]. *石油勘探与开发*, 47(2): 416–426.