

文章编号:1673-0062(2017)04-0047-06

超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的井群布设方法

彭国建¹, 房琦^{2*}, 谭凯旋³, 吕俊文²

(1.南华大学 计算机学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;
3.南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:超临界 CO₂ 强化深层卤水开采可显著提高卤水的开采效率,同时增强 CO₂ 的封存安全也是一种实现卤水高效开发和减缓温室效应的双赢选择.本文通过数值模拟的方法对比研究了不同井群布设方法下超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的效果,得到的结论如下:无论是矩形井网法还是三角形井网法,超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的效果都是非常显著的.基于提出的4种布井方法,从卤水开采总量、卤水越流风险、CO₂ 注入总量、CO₂ 泄漏比和区域压力调控这几个方面对比分析:7B6C 与 9B4C 相当、6B7C 次之、4B9C 效果略差,整体上集中式的三角形井网法略优于矩形井网法,但这两种布井方法没有明显的优势差别.因此,在实际的超临界 CO₂ 强化卤水开采项目中,可根据现场地形和工程条件选择比较合适的布井方法.

关键词:超临界 CO₂ 强化卤水开采;井群布设方法;矩形井网;三角形井网

中图分类号:P595 **文献标志码:**B

Study on the Well Pattern Arrangement for the Deep Brine Recovery Enhanced by Supercritical CO₂

PENG Guo-jian¹, FANG Qi^{2*}, TAN Kai-xuan³, LV Jun-wen²

(1.School of Computer, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2.School of Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3.School of Nuclear Resource Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Deep brine recovery enhanced by supercritical CO₂ is a win-win choice for the efficient development of brine and the mitigation of greenhouse effect since it can not only significantly improve brine production efficiency but also enhance the safety of CO₂ sequestration. In the present work, numerical simulation was carried out to investigate the effect of

收稿日期:2017-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11545016);南华大学博士科研启动基金项目(2014XQD12)

作者简介:彭国建(1969-),男,实验师,硕士,主要从事于数值模型构建与运算方面的研究. E-mail: hynhpgj@

163. com. * 通讯作者:房琦, E-mail: frances2009@foxmail. com

well pattern arrangement for the deep brine recovery enhanced by supercritical CO₂. Numerical simulation results show that whether in the rectangle well pattern or in the triangle well pattern, both of the efficiencies for the deep brine recovery enhanced by supercritical CO₂ are significant. For the four well pattern arrangements proposed in this paper, the schemes of 7B6C and 9B4C act best in brine production yield, brine recharge risk, CO₂ injection amount, CO₂ leakage ratio and the regional pressure control, followed by 6B7C, with 4B9C last, there is no obvious advantage of the both well pattern arrangements. Therefore, it is flexible to choose the well pattern according to the site shape and the project condition for the actual project of deep brine recovery enhanced by supercritical CO₂.

key words: deep brine recovery enhanced by supercritical CO₂; well pattern arrangement; rectangle well pattern; triangle well pattern

0 引言

我国是农业大国,同时也是钾盐资源严重匮乏的国家.随着浅层卤水资源的日渐耗竭,深层卤水的勘查与开发成为寻找钾盐资源的重要途径.在湖北省江汉盆地江陵的凹陷深部地层勘查得到丰富的高温高钾卤水,据中国地质科学院初步预测,江陵凹陷深层卤水钾盐资源达到 8.52×10^6 t,如若得到高效环保的开发利用,对缓解我国钾盐资源严重紧缺的局势起到积极作用.

江陵凹陷是江汉盆地最大的次级构造单元,北以纪山寺断层为界,西以问安寺断层为界,东以清水口断层为界,南以白垩系剥蚀线为界,总面积为 6 500 km²(如图 1 所示).

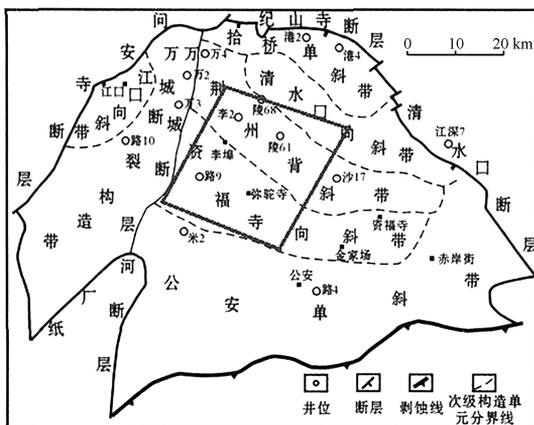


图 1 江陵凹陷构造分区简图

Fig.1 Structural units of Jiangling depression

江陵凹陷地层沉积厚度近万米,自下而上为白垩系渔洋组、古近系沙市组、新沟咀组、荆沙组、

潜江组、荆河镇组和新近系广华寺组及第四系平原组,以碎屑岩沉积为主.其中,又以晚白垩系、古近系砂泥岩互层与膏盐互层较为发育^[1-2].

古近系古新统沙市组上段和下始新统新沟咀组新下 II、III 油组含盐系为目前发现的富钾卤水矿化点主要分布区域如图 2 所示.该组地层的蒸发岩主要分布于江陵断凹的洼陷内,构成一个相对独立的盐岩盆地.江陵洼陷分布面积 1 600 km²,富钾卤水主要分布于其中南部,主要表现为 3 处富钾卤水特点、6 处矿化点,总体控制面积为 960 km²^[3].

江陵凹陷富钾卤水的矿化度超过 325 g/L,在某些地区, $\rho(\text{KCl})$ 达 17.5~18.5 g/L, $\rho(\text{K}^+)$ 达 9.1~9.6 g/L,超过工业开采利用品位^[3-4].此外,卤水 Li⁺、Br⁻、I⁻ 的含量也很高,具有极高的开发价值.对于单一规模化的深层卤水开采,单井卤水日产量随着开采时间持续降低,同时巨大的压力降差会造成水文地质单元间强烈的越流补给,具有引发地质环境问题的风险.房琦等^[5]采用数值模拟的方法评估了单一规模化卤水开采下的开采效率、越流风险与压强变化情况.

采用超临界 CO₂ 强化深层卤水开采,不仅可显著地提高卤水的开采效率,降低越流风险,而且可实现 CO₂ 的安全封存,是一种可同时实现卤水高效开发和减缓温室效应的双赢选择. Fang 等^[6,7]初步研究了超临界 CO₂ 灌注储存联合深层卤水开采的潜在优势.

本文通过数值模拟的方法研究不同井群布设方法下超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的卤水开采量与越流风险、CO₂ 注入量与泄漏风险以及区域压力调控情况,以期得到超临界 CO₂ 强化卤水开采的最佳井群布设方法.

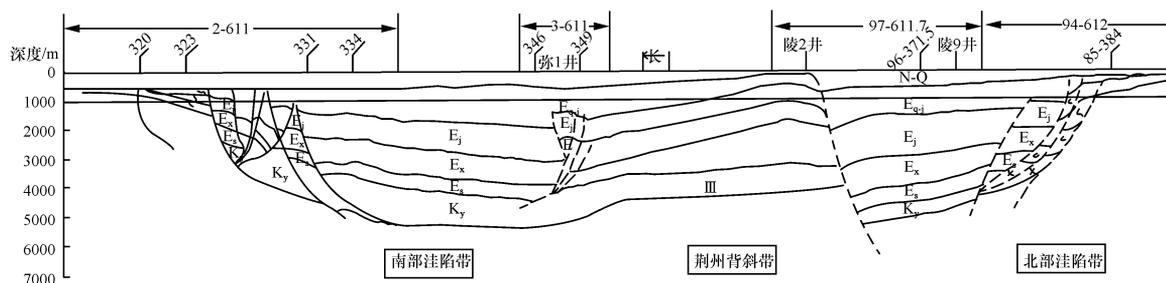


图 2 江陵凹陷 SN 向地层剖面图(据文献[1]修改)

Fig.2 Stratigraphic profile of Jiangling depression in SN direction

1 超临界 CO₂强化卤水开采原理

1.1 超临界 CO₂的基本性质

正常大气条件下,CO₂是一种比空气重的非常稳定的热力学气体.当温度大于 31.1 ℃,压强大于 7.38 MPa(临界点)时,CO₂处于超临界状态.在这种压强和温度条件下,CO₂行为仍像气体,可以充满整个孔隙空间,但具有一个“流动”密度,随着压强和温度的增加可从 200 增至 900 kg/m³,从而接近于水.CO₂可溶于水,其溶解度随压强的增加而增加,随温度和盐度的增加而降低,超临界状态的 CO₂不溶于水.

1.2 超临界 CO₂强化深层卤水开采基本原理

利用超临界 CO₂强化深层卤水开采,不仅能实现深层卤水的高效开采,还可以实现 CO₂的安全地质封存,主要基于以下原理^[8]:

1) CO₂封存容量主要由固有的物理封存量(填充储层中抽出卤水体积的数量)和取决于当前地质环境的化学封存量组成,该模型大幅度增加物理封存量.

2) 利用超临界 CO₂强化深层卤水开采,由于 CO₂注入井中的静水压力变化远远大于生产井,导致较高的自我驱动流速,有利于卤水的高效开采.

3) 超临界 CO₂与深层卤水联合注采可有效减少由 CO₂注入引起的压力积累,保证 CO₂封存的长期安全性.

2 数值模拟方法

2.1 地层模型构建

因砂泥岩互层概化模型可近似代表真实地层开展前期 CO₂地质封存的适宜性研究^[9],这里也是采用三维各向均质且边界封闭的砂泥岩互层地

质模型代表江陵凹陷中被各断层隔断的断陷构造富钾卤水单元,如图 3 所示,该模型纵剖面包含 2 个砂岩卤水层和 1 个泥岩隔水层,下卤水层顶部埋深为 3 000 m,厚度为 100 m,上卤水层厚度为 50 m,两卤水层被厚度为 50 m 的泥岩隔水层隔开.模型横切面自中心向横向和纵向各延伸 10 km 构成 20 km×20 km 的水平范围,代表 400 km²的富钾卤水区.利用 mView 软件进行网格剖分,根据距井孔远近进行层层加密,井孔附近 1 000 m 采用多层次放射性的非结构性网格,共计 330 000 个网格.

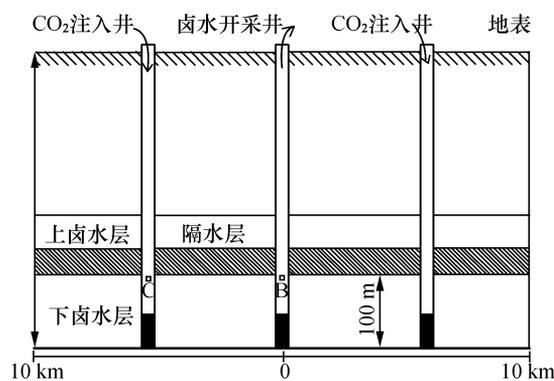


图 3 模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the model

2.2 井群布设方案

如图 4 所示,采用“矩形法”和“三角法”2 种不同的井群布设方法.第一种采用“矩形法”布井,如图 4(a)所示,分别布设 9 口卤水开采井和 4 口 CO₂注入井(记作 9B4C)和 4 口卤水开采井和 9 口 CO₂注入井(记作 4B9C).第二种采用“三角法”布井,如图 4(b)所示,分别布设 7 口卤水开采井和 6 口 CO₂注入井(记作 7B6C)和 6 口卤水开采井和 7 口 CO₂注入井(记作 6B7C).

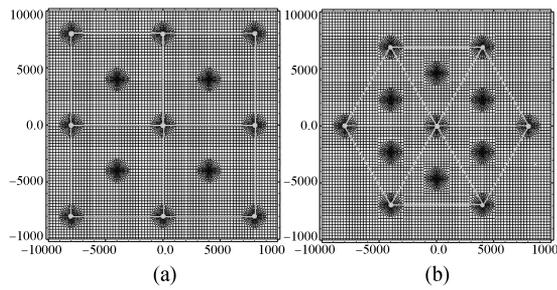


图4 井群布设方案示意图(a为矩形布井法,b为三角布井法)
Fig.4 Schematic diagram of the well pattern arrangement
(a represents rectangle well pattern arrangement;
b represents triangle well pattern arrangement)

2.3 数值模拟方法

数值模拟部分采用美国劳伦斯伯克利国家实验室开发的多相流模拟软件 TOUGH2-MP^[10]完成.卤水目标开采层为下卤水含水层,射孔部位为下卤水层的中下段,为获得最大卤水开采效率,采用1 bar的恒定压力开采.CO₂注入层同为下卤水含水层,射孔部位为下卤水层的中下段,即埋深3 050~3 100 m段(如图3所示),采用40 MPa的恒定压力持续注入,同时注采70年.模型中设置的水文地质参数具体见表1.

表1 模型中采用的水文地质学参数

Table 1 Hydrogeological properties used in the simulations

岩性	孔隙度 /%	渗透率 /m ²	岩石颗粒密度/(g·cm ⁻³)	岩石热传导率/(W/m·°C)	岩石颗粒特焓/(J/kg·°C)
砂岩	10	10 ⁻¹⁴	2.6	2.51	920
泥岩	5	10 ⁻²⁰	2.6	2.51	920
岩性	压缩系数 /Pa ⁻¹	残余水饱和度 /S _{ir}	残余气饱和度 S _{gr}	Van Genu- chten 参数 λ	压强系数 /MPa
砂岩	4.5e-10	0.30	0.05	0.46	0.02
泥岩	4.5e-10	0.30	0.05	0.46	6.25

3 模拟结果

3.1 卤水开采总量

采用超临界CO₂强化深层卤水开采可有效提高单井卤水开采量,如图5所示,不同布井方法下的单井卤水开采量均随着开采时间呈现出平稳上升的趋势.同时注采70年后,9B4C、4B9C、7B6C、6B7C这4种不同布井方法下的单井卤水日产量分别达到1 600 m³/d、2 050 m³/d、1 850 m³/d、1 950 m³/d,卤

水开采总量分别达到323 Mt、202 Mt、301 Mt、278 Mt.由此可见,在卤水开采总量提升方面,9B4C布井方法的效果最好,7B6C和6B7C次之.

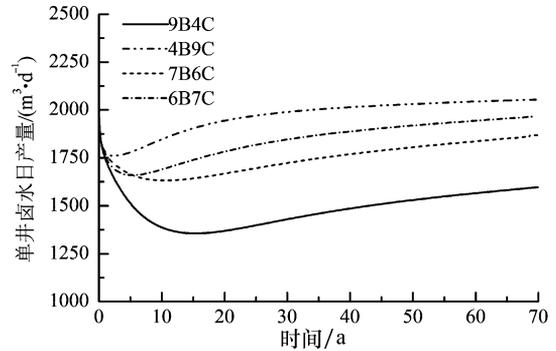


图5 不同布井方法下单井卤水日产量随时间的变化
Fig.5 Brine production yield of single well varying with time under different well arrangement schemes

3.2 卤水越流风险

房琦等的前期研究^[5-6]表明单一规模化的卤水开采会发生强烈的越流补给,超临界CO₂灌注强化卤水开采可有效地调控层间的越流风险.这里同样采用卤水开采效率定量评价这4种不同布井方法下的越流风险.所谓卤水开采效率是指来自目标卤水层的卤水开采量占总开采量的百分比,取值小于1说明上覆含水层向目标卤水开采层发生越流补给,取值大于1说明目标卤水开采层向上覆含水层发生越流排泄,取值越接近1,其卤水开采效率和越流风险控制效果越好.由图6可知,9B4C、4B9C、7B6C、6B7C这4种布井方法下的卤水开采效率分别在98.0%、100.5%、99.9%、100.2%左右,7B6C在卤水开采效率和越流风险控制方面效果最好.

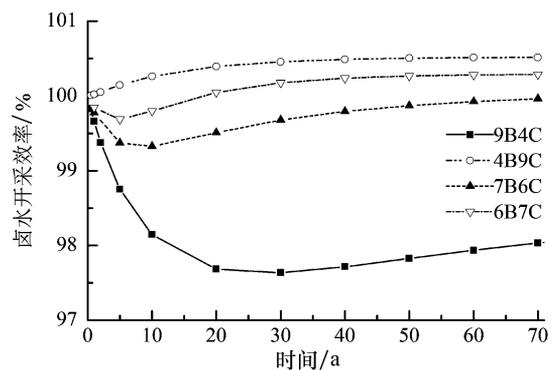


图6 不同布井方法下卤水开采效率随时间的变化
Fig.6 Brine production efficiency under the four wellpattern arrangement schemes

3.3 CO₂注入总量

采用超临界 CO₂强化深层卤水开采的同时可有效提高 CO₂单井注入速率,注采 70 年后 CO₂的总注入量分别达到 220 Mt、166 Mt、223 Mt、215Mt (如图 7 所示).9B4C、4B9C、7B6C、6B7C 的 CO₂单井注入速率在同时注采 20 年后达到稳定,分别保持在 2300 t/d、700 t/d、1500 t/d、1200t/d 以上(如图 8 所示).从 CO₂单井注入速率和注入总量看,9B4C、7B6C、6B7C 的 CO₂注入效果相当,长时间下明显高于 4B9C(如图 9 所示).

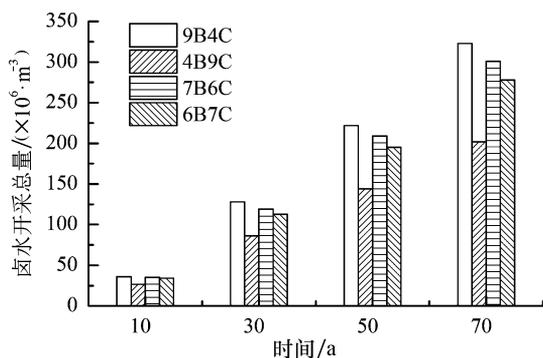


图 7 不同布井方法下卤水总开采量对比

Fig.7 Total brine production of all wells under the four well arrangement schemes

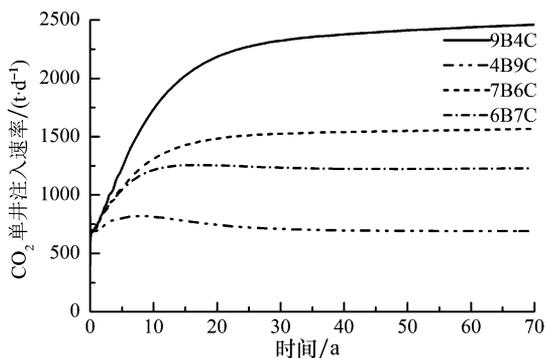


图 8 不同布井方法下的 CO₂单井注入速率随时间的变化

Fig.8 CO₂ injection rate per well varying with time under the four well arrangement schemes

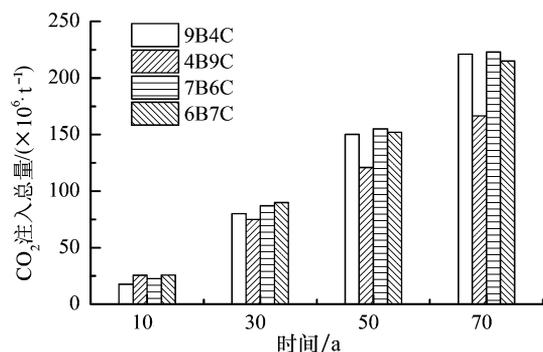


图 9 四种布井方法下 CO₂单井注入速率随时间的变化

Fig.9 CO₂ injection rate per well varying with time under the four well arrangement schemes

3.4 CO₂泄漏风险

采用超临界 CO₂强化深层卤水开采,CO₂泄漏风险也是关注的关键问题之一,这里采用 CO₂泄露比对比不同布井方法下的 CO₂泄露风险.所谓 CO₂泄露比是指逃逸出目标储层的 CO₂的量占总注入量的比值,用‰表示.由图 10 所示,4B9C 的 CO₂泄露比最高,其次为 6B7C 和 7B6C,9B4C 的 CO₂泄露比最低.由于 CO₂泄露主要发生在注入井孔附近,因此减少注入井可有效减少 CO₂的泄露风险.

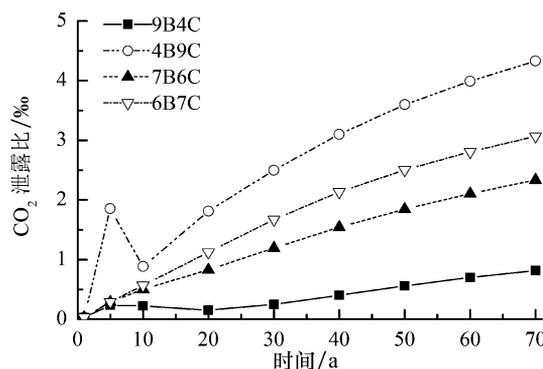


图 10 四种不同布井方法下 CO₂泄露比随时间的变化

Fig.10 CO₂ leakage ratio varying with time under the four well arrangement schemes

3.5 区域压力变化

为了更好地对比不同布井方案下压力变化情况,选取了卤水开采井和 CO₂注入井在目标卤水层顶部投影点 B 和 C(如图 3 所示),绘制出这两点压力随时间的变化曲线,如图 11 所示.对于 9B4C、4B9C、7B6C、6B7C 这 4 种不同布井方法,其卤水开采井在目标卤水层顶部投影点的水静压力分别为 21.0 MPa、24.7 MPa、23.9 MPa、23.6 MPa,分别低于初始地层压力 9.0 MPa、5.3 MPa、6.1 MPa、6.4 MPa;其 CO₂注入井在目标卤水层顶部投影点的水静压力分别为 34.6 MPa、37.3 MPa、36.3 MPa、35.9 MPa,分别高出初始地层压力 4.6 MPa、7.3 MPa、6.3 MPa、5.9 MPa.因此在区域压力调控方面相当,“三角法”整体略优于“矩形法”.

3.6 不同布井方法对比

对以上提出的 4 种布井方法就卤水开采总量、卤水越流风险、CO₂注入总量、CO₂泄漏比以及区域压力调控等方面作一比较,具体如下:

1) 卤水开采总量方面:9B4C > 7B6C > 6B7C > 4B9C;

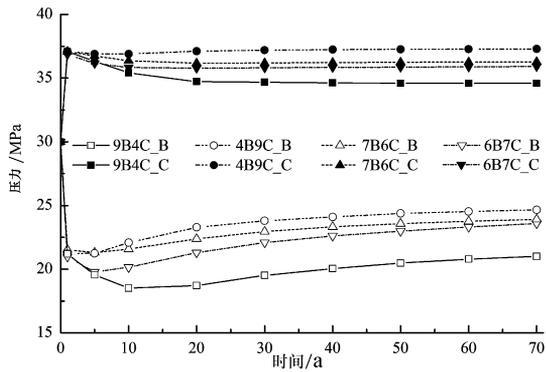


图 11 不同布井方法下井孔对应储层顶部压力随时间的变化

Fig.11 Pressure change on the top of the brine production well and CO₂ injection well with time

2) 卤水越流风险方面: 7B6C > 6B7C > 4B9C > 9B4C;

3) CO₂ 注入总量方面: 7B6C > 9B4C > 6B7C > 4B9C;

4) CO₂ 泄漏比方面: 9B4C > 7B6C > 6B7C > 4B9C;

5) 区域压力调控方面: 4 种布井方法的效果相当。

4 结 论

本文通过数值模拟方法对比研究了不同布井方法下超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的效果. 结论如下:

1) 无论矩形井网法还是三角形井网法, 超临界 CO₂ 强化深层卤水开采的效果都是非常显著的。

2) 就本文提出的 4 种布井方法, 从卤水开采总量、卤水越流风险、CO₂ 注入总量、CO₂ 泄漏比和区域压力调控这几个方面相对而言, 7B6C 与 9B4C 相当, 6B7C 次之, 4B9C 效果略差. 整体上, 集中式的三角形井网法略优于矩形井网法。

3) 虽然三角形井网法整体略优于矩形井网法, 但这两种布井方法没有明显的优势差别。

因此, 在实际的超临界 CO₂ 强化卤水开采项目中, 可根据现场地形和工程条件选择比较合适的布井方案。

参考文献:

- [1] 陈孔全. 江陵凹陷白垩—第三系含油气系统 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
- [2] 沈均均, 陈波, 王春连, 等. 江陵凹陷古近系沙市组含膏盐岩系沉积特征研究 [J]. 地球学报. 2014, 35(4): 425-433.
- [3] 潘源敦, 刘成林, 徐海明. 湖北江陵凹陷深层高温富钾卤水特征及其成因探讨 [J]. 化工矿产地质, 2011, 33(2): 65-72.
- [4] 李瑞琴, 刘成林, 陈侠, 等. 江陵凹陷深层富钾卤水井内降温析盐情况探讨 [J]. 盐湖研究, 2013, 21(1): 1-6.
- [5] 房琦, 李义连, 吕俊文, 等. 单一规模化深部卤水开采效率和越流风险评估 [J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 113-118.
- [6] FANG Q, LI Y L. Exhaustive brine production and complete CO₂ storage in Jianghan Basin of China [J]. Environmental earth science, 2014, 75(2): 1541-1553.
- [7] FANG Q, LV J W, PENG G J, et al. Numerical simulation to quantify the leakage risk in a multi-layer aquifer system of pure brine recovery and CO₂-enhanced brine recovery: a case study of potassium-rich brine recovery in Jianghan Basin of China [J]. Environmental earth sciences, 2017, 76(13): 464.
- [8] 杨国栋, 李义连, 马鑫, 等. 超临界 CO₂ 增强热卤水开采模型研究 [J]. 地质科技情报, 2014, 33(6): 233-240.
- [9] 房琦, 吕俊文, 彭国建. 砂泥岩互层模型对 CO₂ 地质储存影响的数值模拟 [J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(4): 16-20.
- [10] ZHANG K, WU Y S, et al. User's guide for TOUGH2-MP-A massively parallel version of the TOUGH2 code [R]. Ernest orlando lawrence berkeley national laboratory, Berkeley, CA (us), 2008.