

鄂尔多斯盆地马家沟组马五₁亚段地层水特征及对CO₂地质封存的意义

孙玉景^{1,2}, 周立发^{1,2}, 霍斐斐^{1,2}

1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
2. 二氧化碳捕集与封存技术国家地方联合工程研究中心, 西安 710069

摘要: CO₂地质封存技术是实现碳减排的有效措施, 对鄂尔多斯盆地马家沟组马五₁亚段地层水特征进行研究, 是下一步实施工程化CO₂封存的首要前提。本文依据对深部钻井取样的直观观察与实验测试, 采用单项指标分类评价和多项指标综合评价的方法深入分析了马家沟组马五₁亚段地层水的物理性质、化学性质、地层水类型和水化学特征参数。结果表明: 马家沟组马五₁亚段地层水密度较大、矿化度极高, 属于卤水, 含量最多的离子是Cl⁻, 其次是Ca²⁺, 地层水是CaCl₂型。钠氯系数、氯镁系数、脱硫酸系数和镁钙系数的分析表明马五₁亚段地层水封闭性极好, 处于较强的还原环境。综合分析认为马家沟组马五₁亚段地层水具备实施CO₂封存的良好条件, 非常适宜进行CO₂封存。

关键词: 马五₁亚段; 矿化度; 卤水; CO₂封存; 鄂尔多斯盆地

Water characteristics of Majiagou formation Ma5₁ submember in Ordos Basin and the significance for CO₂ geological sequestration

SUN Yujing^{1,2}, ZHOU Lifa^{1,2}, HUO Feifei^{1,2}

1. Department of Geology, Northwest University, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an 710069, China
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Carbon Capture and Storage Technology, Xi'an 710069, China

Abstract: Background, aim, and scope Global warming caused by emission of greenhouse gases dominated by CO₂ has become a severe challenge to human being. Many measures have been taken to combat global warming all over the world. What is worth mentioning is the CO₂ geological sequestration, it is an effective and burgeoning measure to achieve carbon emission reduction. The CO₂ sequestration potential is very huge in Ordos Basin. So, in this paper the formation water characteristics in Ma5₁ submember of Majiagou formation are systematically studied, which is the precondition for further engineering design of CO₂ sequestration in Ordos Basin. **Materials and methods** Based on the direct observations and experimental tests of deep drilling samplings, the method of "single index classification evaluation and multiple index comprehensive evaluation" is adopted. The physical

收稿日期: 2018-03-03; 录用日期: 2018-05-12; 网络出版: 2018-06-01

Received Date: 2018-03-03; Accepted Date: 2018-05-12; Online first: 2018-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFE0102500)

Foundation Item: National Key R & D Program of China (2016YFE0102500)

通信作者: 孙玉景, E-mail: nwyujing@126.com

Corresponding Author: SUN Yujing, E-mail: nwyujing@126.com

引用格式: 孙玉景, 周立发, 霍斐斐. 2019. 鄂尔多斯盆地马家沟组马五₁亚段地层水特征及对CO₂地质封存的意义[J]. 地球环境学报, 10(1): 49-57.

Citation: Sun Y J, Zhou L F, Huo F F. 2019. Water characteristics of Majiagou formation Ma5₁ submember in Ordos Basin and the significance for CO₂ geological sequestration [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(1): 49-57.

properties, chemical properties, formation water types and hydrochemical characteristic parameters of the Majiagou formation Ma5₁ submember are analyzed in detail. **Results** The results indicate that the pH of the water ranges from 3.5 to 8.6, mainly from 4.5 to 6.5; the water density ranges from 1.0 g·cm⁻³ to 1.5 g·cm⁻³, mostly 1.1—1.3 g·cm⁻³; the mineralization degree is generally greater than 50 g·L⁻¹, and average mineralization degree is 166 g·L⁻¹; the highest concentration ion is Cl⁻, followed by Ca²⁺; the concentration order of the ions is $r\text{Cl}^- > r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+} > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$, and the formation water is CaCl₂ type. The analysis results of water chemical characteristic parameters show that Na/Cl factor ($r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$) ranges from 0.18 to 0.55, 0.34 on average; Cl/Mg factor ($r\text{Cl}^-/r\text{Mg}^{2+}$) ranges from 11.04 to 165.16, 32.11 on average; desulfurization factor ($100 \times r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$) ranges from 0 to 0.45, 0.09 on average; Mg/Ca factor ($r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$) range from 0.01 to 0.30, 0.17 on average. **Discussion** Most samples have a pH of 4.5—6.5, which does not meet the drinking water standard (6.5—8.5). The density is generally 1.1—1.3 g·cm⁻³, indicating that the salinity may be high. The sample salinity is generally greater than 50 g·L⁻¹ and the average salinity is 166 g·L⁻¹ further explains that the water is not suitable for drinking. The ion composition and concentration, the “salinity classification” and “Sulin’s classification” together indicate that the water with high salinity is brine and it belongs to the CaCl₂ type. The comprehensive analysis of the Na/Cl factor ($r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$), Cl/Mg factor ($r\text{Cl}^-/r\text{Mg}^{2+}$), desulfurization factor ($100 \times r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$) and Mg/Ca factor ($r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$) show that the content of Cl⁻ and Ca²⁺ is relatively high, and the content of Na⁺, Mg²⁺ and SO₄²⁻ is low. Overall, the reduction reaction is complete and the formation water is in a closed environment. **Conclusions** The conclusions that can be drawn from the above results and discussion are as follows: the water can not serve as drinking water and the implement of CO₂ sequestration in Ma5₁ submember will not cause contamination to fresh water we live on; formation water of Ma5₁ submember is under a very strong reducing environment, which is very good for CO₂ sequestration and can greatly reduce the risk of CO₂ leakage; the ion with the highest content is Cl⁻, and the second content is Ca²⁺, which can weaken the chemical reactions and help to generate CaCO₃ precipitation in the end, thus prolonging the CO₂ sequestration time and reducing the risk of CO₂ leaking. **Recommendations and perspectives** CO₂ sequestration is a comprehensive environment protection issue that involves the combination of geology and engineering. So, only studying the significance of formation water characteristics for CO₂ sequestration is far from enough. The industrial CO₂ sequestration still has many problems to deal with. For example, laboratory tests of CO₂ sequestration mechanisms; analysis on affecting factors of CO₂ geologic sequestration; blocks selection and evaluation for CO₂ sequestration; evaluation on sequestration potential of a region or layer; leakage risk assessment after CO₂ sequestration; improvement in public recognition and research of relevant laws and regulations. The process of CO₂ sequestration still has a long and hard way to go.

Key words: Ma5₁ submember; mineralization; brine; CO₂ sequestration; Ordos Basin

兴起于 21 世纪的 CCS 技术 (CO₂ capture and storage) 是国际社会普遍认同的碳减排技术。鄂尔多斯盆地内各省 (区) 燃煤发电和煤化工产业的大规模发展, 在促进经济增长的同时也引发了 CO₂ 气体的大量排放, 这使得在该盆地有效地推行和实施 CCS 技术显得极为紧迫。CCS 技术所包括的各种封存方法中, 咸水层封存的潜力最大。近年来, 咸水层 CO₂ 封存已逐渐成为国内外专家学者研究的一大热点 (Bachu, 2000, 2015; Li et al, 2013; Li et al, 2014; Underschultz et al, 2016;

Aminu et al, 2017)。咸水层 CO₂ 地质封存的首要研究对象是地下水体。研究地下水体的目的是明确水体质量, 通过水体质量的分析来判断是否适宜进行 CO₂ 封存。水体质量的分析即水质分析, 其内容通常包括水的物理特性 (颜色、气味、密度等)、化学特性 (无机物和有机物的种类及含量等)、生物特性 (细菌和微生物的种类及含量等)。水质分析不仅有助于防范和治理水污染, 为水资源的保护提供具体可行的决策和方案, 同时也可以促进水资源的开发利用。对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马

五₁亚段地层水特征进行研究, 即考虑马五₁亚段地层水能否作为 CO₂ 地质封存的封存水体。马家沟组地层水首先属于油气田地层水。油气田地层水的研究主要侧重于地层水的来源、类型、物理性质、化学组成, 以及地层水资料对油气勘探开发的作用(何小曲和康妮, 2017; 张治波等, 2017)。关于马家沟组地层水已有诸多研究成果, 主要是马家沟组地层水的物理性质、化学组成, 以及地层水的富集规律、地层水与天然气藏的关系、气水分布控制因素的分析等等(徐国盛等, 2000; 李贤庆等, 2001, 2002a, 2002b; 郭刚, 2006; 赵卫卫等, 2012; 陈娟萍等, 2014; 于红岩等, 2016)。但是目前没有较为深入的关于马家沟组地层水与 CO₂ 地质封存之间关系的研究。鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组是否满足咸水层 CO₂ 封存的具体要求, 值得进一步探讨。因此, 本文采用深部钻井取样, 通过物理和化学方法, 对样品进行了定性和定量分析, 在充足的理论依据和事实依据的基础上, 详细论述了马家沟组马五₁亚段地层水的特征, 并深入分析了其对 CO₂ 地质封存的意义。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是典型的多旋回克拉通盆地, 更是我国陆地上结构最稳定、构造最简单、断裂最不发育的盆地, 这种地质条件决定了它是我国陆地上实施 CO₂ 地质封存的最有利和最安全的地区之一。鄂尔多斯盆地的地理位置处于华北地台的西部, 在晚加里东运动的影响下, 华北地块整体大幅抬升为陆, 一亿多年的沉积间断造成鄂尔多斯盆地缺失了中奥陶世至早石炭世的沉积, 在长期的风化剥蚀淋滤作用下, 奥陶系马家沟组顶部的马六段仅在局部地区残存(雷卞军等, 2010; 侯方浩等, 2011)。

马家沟组主要分布在鄂尔多斯盆地的中东部地区, 构造带上属于陕北斜坡, 勘探至今, 已有多口井钻遇马家沟组。在奥陶纪马家沟期, 鄂尔多斯盆地一共经历了三次不同规模的海进海退, 海进海退在马家沟期交替出现。海退期是马一期、马三期和马五期, 海进期是马二期、马四期和马六期。其中马五期是最大的海退时期, 因陆表海受海平面升降的影响较大, 纵向上形成了“碳酸盐岩与蒸发岩”的交替沉积(侯方浩等, 2003; 王起琮等, 2012), 总体上仍然以碳酸盐岩沉积为主, 尤其是白云岩, 同时夹蒸发岩沉积。马家

沟组自下而上可划分为六段, 马五段自上而下又可划分为 10 个亚段(表 1)。本文的研究对象是马五₁亚段, 主要从以下几方面对马家沟组马五₁亚段地层水特征展开研究。

表 1 陕北地区 A 井区马五段地层划分表
Tab.1 Stratigraphic classification of Ma5 formation in A well area of Shanbei region

统 System	组 Formation	段 Member	亚段 Submember
			马五 ₁ Ma5 ₁
			马五 ₂ Ma5 ₂
			马五 ₃ Ma5 ₃
下奥陶统 Lower Ordovician	马家沟组 Majiagou Formation	马五段 Ma5 member	马五 ₄ Ma5 ₄
			马五 ₅ Ma5 ₅
			马五 ₆ Ma5 ₆
			马五 ₇ Ma5 ₇
			马五 ₈ Ma5 ₈
			马五 ₉ Ma5 ₉
			马五 ₁₀ Ma5 ₁₀

2 观察与测试

2.1 马五₁亚段地层水物理性质

通过对多个钻井取样的观察, 发现马五₁亚段地层水多呈无色透明状, 水质较清, 少部分水样透明度较差, 呈现淡黄色或棕黄色。经测定, 地层水 pH 值约在 3.5—8.6, 以 4.5—6.5 为主, 偏酸性—弱碱性, 略有咸涩味。由于地层水中溶解有一定量的烃类, 因此常常有煤油和汽油味, 有些样品中还有少量的 H₂S, 有臭鸡蛋气味。

马家沟组地层水密度(ρ)比纯水大, 普遍大于 1.0 g·cm⁻³, 最高甚至可达 1.5 g·cm⁻³。对 100 个地层水样品的统计分析表明: 1.0 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.1 g·cm⁻³ 的样品占 15.8%, 1.1 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.2 g·cm⁻³ 的样品占 32.6%, 1.2 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.3 g·cm⁻³ 的样品占 35.6%, 1.3 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.4 g·cm⁻³ 的样品占 13.8%, 1.4 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.5 g·cm⁻³ 的样品占 2.2% (图 1), 其中 1.1 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.3 g·cm⁻³ 的样品最多, 1.4 g·cm⁻³ < ρ ≤ 1.5 g·cm⁻³ 的样品最少。马家沟组马五₁亚段地层水密度大多在 1.1—1.3 g·cm⁻³。

2.2 马五₁亚段地层水化学性质

2.2.1 地层水矿化度

有研究者指出中部气田区马家沟组地层水的总矿化度由边缘(小于 100 g·L⁻¹)向中心(大于

100 g·L⁻¹) 增加, 主要阴离子 Cl⁻ 含量增加, 而 HCO₃⁻ 含量趋向减少, 反映出地层水由边缘向中心逐渐浓缩的特点(李贤庆等, 2001)。对马五₁ 亚段 170 个地层水样品矿化度 (K) 的分析测试表明: 50 g·L⁻¹ < K ≤ 100 g·L⁻¹ 的样品占 16.8%, 100 g·L⁻¹ < K ≤ 150 g·L⁻¹ 的样品占 19.5%, 150 g·L⁻¹ < K ≤ 200 g·L⁻¹ 的样品占 30.5%, 200 g·L⁻¹ < K ≤ 250 g·L⁻¹ 的样品占 21.6%, K > 250 g·L⁻¹ 的样品占 11.6% (图 2)。其中 150 g·L⁻¹ < K ≤ 200 g·L⁻¹ 的样品数量最多, 平均总矿化度达到 166 g·L⁻¹, 整体上属于矿化度较高的地层水。

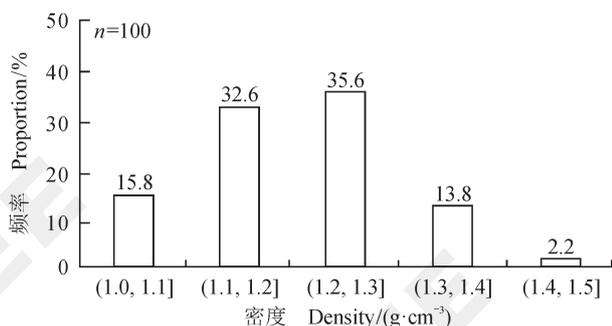


图 1 马家沟组马五₁ 亚段地层水密度分布直方图
Fig.1 Water density distribution histogram of Majiagou formation Ma5₁ submember

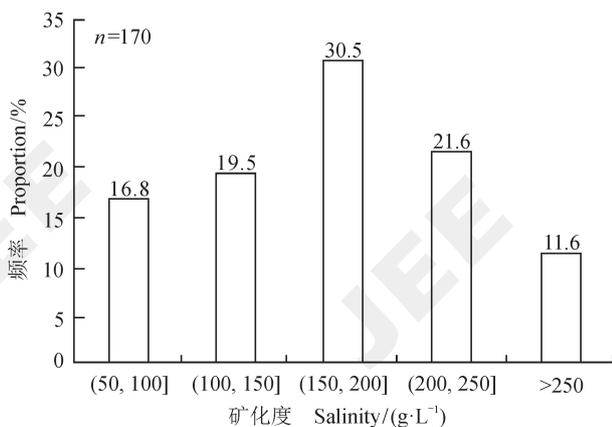


图 2 马家沟组马五₁ 亚段地层水矿化度分布直方图
Fig.2 Mineralization distribution histogram of Majiagou formation Ma5₁ submember

2.2.2 地层水化学组成

依据 12 口典型井所采集水样的分析结果(表 2), 马家沟组马五₁ 亚段地层水的化学组成具有以下特点:

(1) 阳离子组成: Na⁺+K⁺ 的离子质量浓度变化范围为 9956—43372 mg·L⁻¹, 平均 25257.7 mg·L⁻¹; Ca²⁺ 的离子质量浓度变化范围为 27166—55865 mg·L⁻¹, 平均 38697.6 mg·L⁻¹; Mg²⁺ 的离子质量浓度变化范围为 646—16068 mg·L⁻¹, 平均 6405.6 mg·L⁻¹。可见马五₁ 亚段地层水中 Ca²⁺ 含量最多, Na⁺ 和 K⁺ 次之, Mg²⁺ 含量最少, 马五₁ 亚段地层水总体上为富钙贫镁水型。

(2) 阴离子组成: Cl⁻ 的离子质量浓度变化范围 76060—177436 mg·L⁻¹, 平均 116821.3 mg·L⁻¹; HCO₃⁻ 的离子质量浓度变化范围为 88—682 mg·L⁻¹, 平均 320.3 mg·L⁻¹; SO₄²⁻ 的离子质量浓度变化范围为 0—460 mg·L⁻¹, 平均 87.2 mg·L⁻¹。马五₁ 亚段地层水中 Cl⁻ 含量占绝对优势, SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 很少, CO₃²⁻ 基本不存在。

依据以上马家沟组马五₁ 亚段地层水化学组成统计表绘制主要离子平均质量浓度对比图, 阴阳离子组成的对比显示: $rCl^- > rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+} > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ 。这种离子质量浓度组合特征是地质历史时期马家沟组碳酸盐岩地层水受多种因素综合作用的结果(徐国盛等, 2000)。即地层水的矿化度和化学组成受地下环境及此环境中一系列物理、化学、生物作用的共同影响。鄂尔多斯盆地马家沟组地层水主要离子浓度与总矿化度关系十分紧密。可以判断 Cl⁻ 浓度最高是由于膏盐岩类矿物溶解的结果。Cl⁻ 浓度随总矿化度增大而增高, 表现出很好的相关性。其他阳离子浓度也随总矿化度增大而升高, 其相关性较氯离子差。

2.3 马五₁ 亚段地层水类型

目前常用的地层水分类方案主要有两种: 一种是按矿化度分类, 另一种是按地层水化学组成分类。

2.3.1 矿化度分类

矿化度是无机盐含量在地层水中所占比例, 即质量浓度。地层水的矿化度是地下水动力场和化学场在不同的地质环境中长期作用于地下水的结果。按照矿化度由小到大, 可将地层水分为五类(Bethke et al, 1991): 淡水 ($M < 1 g \cdot L^{-1}$)、微咸水 ($1 g \cdot L^{-1} \leq M < 3 g \cdot L^{-1}$)、咸水 ($3 g \cdot L^{-1} \leq M < 10 g \cdot L^{-1}$)、盐水 ($10 g \cdot L^{-1} \leq M < 50 g \cdot L^{-1}$)、卤水 ($M \geq 50 g \cdot L^{-1}$)。对马五₁ 亚段 170 个地层水样品的分析测试表明: 马家沟组马五₁ 亚段地层水整体的矿化度非常高, 普遍大于 50 g·L⁻¹, 平均矿化度达 166 g·L⁻¹, 属于矿化度较高的卤水层。

表 2 马家沟组马五₁亚段地层水化学组成统计表
Tab.2 Water chemical composition statistics of Majiagou formation Ma5₁ submember

井号 Well No.	Na ⁺ +K ⁺ /(mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)
A1	21090	31445	6160	104050	345	350
A2	19720	31445	6750	102050	285	460
A3	26160	28410	4315	96735	340	236
A4	21740	50350	12825	154360	290	0
A5	29660	32205	6812	118560	210	0
A6	25386	53965	16068	177436	626	0
A7	13565	27166	3668	76060	88	0
A8	23920	34480	4925	108202	682	0
A9	9956	34701	6706	87245	290	0
A10	43372	38483	4480	120725	328	0
A11	28773	45856	646	106693	210	0
A12	39750	55865	3512	149739	150	0
平均值 Average	25258	38698	6406	116821	320	87

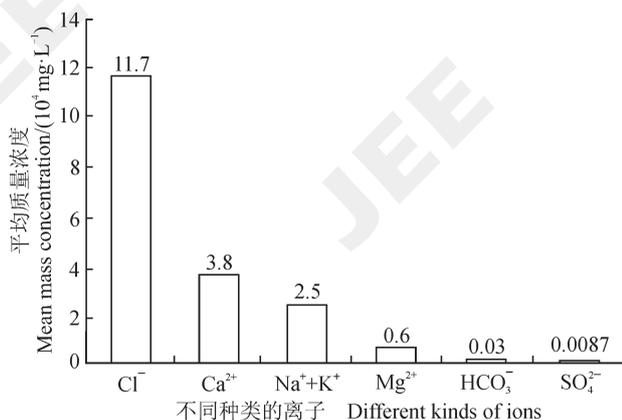


图 3 马家沟组马五₁亚段地层水主要离子平均质量浓度对比图

Fig.3 Comparison of the mean mass concentration of the main ions of Majiagou formation Ma5₁ submember

2.3.2 苏林分类

苏林的地层水分类方案主要是依据阴阳离子的质量浓度及其组成关系。此种方案将地层水划分为四种类型: Na₂SO₄ 型(大陆水)、NaHCO₃ 型(大陆水)、MgCl₂ 型(海水)、CaCl₂ 型(深层水)。其中, NaHCO₃ 型和 CaCl₂ 型在油气田中分布广泛, Na₂SO₄ 型和 MgCl₂ 型较少见(柯林斯, 1984)。根据马五₁亚段地层水中阴阳离子的组成及平均离子质量浓度的对比结果, 该段地层水属于 CaCl₂ 型。

2.4 马五₁亚段地层水的水化学特征参数

地层水的水化学特征参数不仅能够反映地层水

所处的水文地球化学环境, 还可以反映水岩相互作用的强度(赵卫卫等, 2012)。与 CO₂ 封存有关的水化学特征参数主要有钠氯系数(r_{Na^+}/r_{Cl^-})、氯镁系数($r_{Cl^-}/r_{Mg^{2+}}$)、脱硫系数($100 \times r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$)和镁钙系数($r_{Mg^{2+}}/r_{Ca^{2+}}$)。利用阴阳离子的测试结果, 可以计算出以上几个重要的参数。依据 12 口典型井所采集水样的分析结果(表 3), 马家沟组马五₁亚段地层水的水化学特征参数具有以下特点:

2.4.1 钠氯系数

钠氯系数又称作变质系数, 可以说明地下水的变质程度, 是地层封闭性、地层水变质作用程度和储层水文地球化学环境的重要指标。Cl⁻ 化学性质稳定, 很少与其他离子发生化学反应; Na⁺ 由于吸附、沉淀而含量减少, 因此一般封闭条件好的储层钠氯系数较小。该系数越大, 说明地层水受渗入水的影响越强; 该系数越小, 说明水体环境受渗入水影响较弱, 对地层水中 CO₂ 等的封存越有利(徐国盛等, 2000; 李贤庆等, 2002b; 赵卫卫等, 2012; 陈娟萍等, 2014; 张治波等, 2017)。由表 2 可知, 马家沟组马五₁亚段地层水钠氯系数变化范围在 0.18—0.55, 平均 0.34, 整体偏低, 说明马家沟组马五₁亚段地层水封闭性很好, 变质程度极低。

2.4.2 氯镁系数

氯镁系数是反映浓缩变质作用和阳离子吸附交换作用的重要水化学参数。Mg²⁺ 由于其吸附、

交换作用含量会减少, 而 Cl^- 化学性质相对稳定, 所以氯镁系数值一般较大。通常情况下, 地层水的封闭性越好, 封闭时间越长, 氯镁系数值越大, 储层保存条件越好 (李贤庆等, 2002b; 赵卫

卫等, 2012; 张治波等, 2017)。由表 2 可知, 马家沟组马五₁亚段地层水氯镁系数变化范围在 11.04—165.16, 平均 32.11, 氯镁系数的值普遍较大, 说明封闭性很好。

表 3 马家沟组马五₁亚段地层水水化学特征参数表
Tab.3 Water chemical characteristic parameters of Majiagou formation Ma5₁ member

井号 Well No.	钠氯系数 $r\text{Na}^+ / r\text{Cl}^-$	氯镁系数 $r\text{Cl}^- / r\text{Mg}^{2+}$	脱硫系数 $100 \times r\text{SO}_4^{2-} / r\text{Cl}^-$	镁钙系数 $r\text{Mg}^{2+} / r\text{Ca}^{2+}$
A1	0.31	16.89	0.34	0.20
A2	0.30	15.11	0.45	0.21
A3	0.42	22.42	0.24	0.15
A4	0.22	12.04	0.00	0.25
A5	0.39	17.40	0.00	0.21
A6	0.22	11.04	0.00	0.30
A7	0.28	20.74	0.00	0.14
A8	0.34	21.97	0.00	0.14
A9	0.18	13.01	0.00	0.20
A10	0.55	26.95	0.00	0.12
A11	0.42	165.16	0.00	0.01
A12	0.41	42.64	0.00	0.06
平均值 Average	0.34	32.11	0.09	0.17

2.4.3 脱硫系数

脱硫系数是地下水环境氧化还原程度的重要指标。还原环境中, 脱硫细菌将 SO_4^{2-} 还原为 H_2S , 地层水中 SO_4^{2-} 减少至消失。脱硫系数越小, 表明 SO_4^{2-} 含量越少, 还原环境越强, 地层封闭性越好, 对地层水中 CO_2 等的保存越有利。脱硫系数通常以 1 为界限。小于 1 表明地层水还原彻底, 封闭性好; 反之, 则认为还原不彻底, 可能受浅表层氧化作用的影响 (徐国盛等, 2000; 李贤庆等, 2002b; 赵卫卫等, 2012; 陈娟萍等, 2014; 张治波等, 2017)。由表 2 可知, 马家沟组马五₁亚段地层水脱硫系数变化范围在 0—0.45, 平均 0.09, 远小于 1, 说明马家沟组马五₁亚段地层水还原彻底。

2.4.4 镁钙系数

镁钙系数也是水化学的重要特性参数之一, 镁钙系数主要反映储层次生孔隙发育程度。镁钙系数值小, 说明 Ca^{2+} 含量多, 容易生成方解石矿物, 表明次生孔隙发育良好; 镁钙系数值大, 说明 Mg^{2+} 含量多, 容易生成白云石矿物, 与有机质生烃排酸反应不强烈, 导致次生孔隙发育不好 (李贤庆等, 2002b; 赵卫卫等, 2012; 张治波等,

2017)。由表 2 可知, 马家沟组马五₁亚段地层水镁钙系数变化范围在 0.01—0.30, 平均 0.17, 总体上镁钙系数值偏小, 说明马家沟组马五₁亚段地层水中 Ca^{2+} 含量多, 储层的次生孔隙发育良好。

3 水质分析

沉积盆地中的地层水首先受古气候条件的控制, 其次受沉积环境的制约, 最后受后期成岩作用的影响 (于红岩等, 2016; 张治波等, 2017)。地层水的成因及演化通常都比较复杂, 只有结合具体的地质条件与物理性质、化学性质等因素进行综合分析, 才能获取关于地层水的准确水文地质信息。分析水质并进行水质评价是一项繁琐而重要的工作。本文确立了科学合理的水质分析内容及方法, 以求最大限度地保证水质分析结果的准确性。本文水质分析的内容是: 物理性质、化学性质、地层水类型、水化学特征参数; 水质分析的方法是: 立足于具体的实验测试数据, 先进行单项指标分类评价, 再进行多项指标综合评价。前文已对马五₁亚段地层水的物理性质、化学性质、地层水类型、水化学特征参数展开了单

项指标的客观描述,下文将进行多项指标综合评价分析。

(1) 物理性质的研究是水质分析的基础。其中,颜色、透明度、气味通过观察可以直接判断,马五₁亚段地层水物理性质的突出特点是其pH和密度。大部分样品的pH在4.5—6.5,不符合饮用水标准(饮用水pH为6.5—8.5)。而密度普遍在1.1—1.3 g·cm⁻³,矿化度可能较高。因此,可以断定马五₁亚段地层水是密度较大且不能作为饮用水的地下水。

(2) 化学性质的研究是水质分析的关键。本文主要对样品的矿化度和阴阳离子组成进行了测定,目的是了解地层水的化学组成。矿化度的测试结果表明样品的矿化度普遍大于50 g·L⁻¹,平均达166 g·L⁻¹,如此高的矿化度也说明不宜作为饮用水。阴离子的组成及质量浓度表现为 $r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$,阳离子的组成及质量浓度表现为 $r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+}$ 。总的离子组成及质量浓度表现为: $r\text{Cl}^- > r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+} > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ 。充分说明Cl⁻和Ca²⁺在地层水中的含量占有绝对优势。可以断定马五₁亚段地层水是以Cl⁻和Ca²⁺为主导的高矿化度地层水。

(3) 地层水类型的研究是水质分析的核心。在明确了物理性质和化学性质的前提下,可以确定地层水的类型。本文采用“矿化度分类”和“苏林分类”两种分类标准,从不同角度对地层水的类型进行评价,进而取得全面而科学的认识。依据以上两种分类,可以断定马五₁亚段地层水属于矿化度较高的CaCl₂型卤水。

(4) 水化学特征参数是评价地层水是否适宜进行CO₂地质封存的重要影响因素。钠氯系数($r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$)、氯镁系数($r\text{Cl}^-/r\text{Mg}^{2+}$)、脱硫系数($100 \times r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$)和镁钙系数($r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$)的综合分析说明马五₁亚段地层水中Cl⁻和Ca²⁺含量较高,Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻含量偏低,整体上地层水还原较彻底、封闭性较好,另外,地层水信息指示马五₁亚段储层次生孔隙发育良好,也有利于CO₂的封存。

以上四方面的综合评价结果为:鄂尔多斯盆地马家沟组马五₁亚段地层水是密度较大、矿化度较高、偏酸性、封闭性较好,以Cl⁻和Ca²⁺为主导的CaCl₂型地层水。

4 马五₁亚段地层水特征对CO₂地质封存的意义

伴随鄂尔多斯盆地的形成、发展和消亡,马家沟组的地层水由沉积时期的海水逐渐过渡成地表渗入水、潜水,最后变成地下水。马家沟组地层水的演化依次经历了同生期、表生期、埋藏期三个阶段,最终演变成了现今的地层水(徐国盛等,2000)。采用单项指标分类评价和多项指标综合评价的方法对马五₁亚段地层水的物理性质、化学性质、地层水类型、水化学特征参数进行分析和评价之后,进一步明确了其对CO₂地质封存的意义。其意义体现在以下三方面:

(1) 马家沟组马五₁亚段地层水是矿化度极高的卤水层,不可作为饮用水,且在该层实施CO₂封存,不会污染人类赖以生存的淡水层。

(2) 对钠氯系数、氯镁系数、脱硫系数、镁钙系数的综合分析表明:马家沟组地层水处在较强的还原环境中,地层水封闭性很好,非常有利于CO₂的封存,大大降低了CO₂的泄露风险。

(3) 马家沟组马五₁亚段地层水中含量最多的是Cl⁻,其次是Ca²⁺。一方面,Cl⁻化学性质相对稳定,因此在CO₂封存之后大大减弱了CO₂-水-岩的相互反应,可降低CO₂的泄露风险;另一方面,CO₂溶解于地层水中可以与Ca²⁺缓慢反应,经历一定的反应时间之后,最终生成CaCO₃沉淀。这两方面都有利于延长CO₂封存的时间,达到碳封存的目的。

5 结论与思索

本文对马家沟组马五₁亚段地层水物理性质、化学性质、地层水类型和水化学特征参数的全面分析,说明马五₁亚段地层水非常有利于CO₂的封存。但是CO₂封存是一个地质与工程相结合的综合性环保问题,仅仅探究地层水对CO₂封存的意义是远远不够的,真正实现工业化的CO₂地质封存,还有许多问题需要做进一步研究:(1) CO₂封存机理与实验的研究:包括室内CO₂-水-岩反应室内实验的开展,CO₂注入地下之后各种封存机理的探究和储层物性实验、盖层突破压力实验的开展。(2) 地质封存影响因素及封存效果的分析:利用地质建模和数值模拟对封存影响因素及封存效果深入分析。(3) 封存有利区块优选与评价:根据大量地质资料,尤其是井数据,进行有利区

封存选址以及注入井与监测井的选择。(4) 封存潜力评价: 对优选的封存区块进行 CO₂ 封存量的评估与计算。(5) 泄漏风险评估: 通过室内实验、数值模拟、地震监测等手段进行 CO₂ 泄漏风险评估。(6) 公众认知度的提升和相关法律法规的学习。

参考文献

- 陈娟萍, 赵小会, 安文红, 等. 2014. 靖边气田西部奥陶系风化壳气藏气水关系研究 [J]. *石油化工应用*, 33(3): 81–84. [Chen J P, Zhao X H, An W H, et al. 2014. Study on water relations in Jingbian gas field of Ordovician weathering crust gas reservoirs [J]. *Petrochemical Industry Application*, 33(3): 81–84.]
- 郭刚. 2006. 鄂尔多斯盆地靖边气田陕 155 井区下奥陶统马家沟组马五储层水体分布规律研究 [J]. *天然气地球科学*, 17(6): 789–793. [Guo G. 2006. Study of regularities of distribution of water body in Ma5 reservoir of Majiagou formation of Lower Ordovician in Shan 155 well field of Jingbian Gas Field in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 17(6): 789–793.]
- 何小曲, 康妮. 2017. 油田水资料在油气勘探与开发中的应用 [J]. *产业与科技论坛*, 16(9): 93–94. [He X Q, Kang N. 2017. The application of water resources in oil and gas exploration and development [J]. *Industrial & Science Tribune*, 16(9): 93–94.]
- 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等. 2003. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征 [J]. *沉积学报*, 21(1): 106–112. [Hou F H, Fang S X, Dong Z X, et al. 2003. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 106–112.]
- 侯方浩, 方少仙, 何江, 等. 2011. 鄂尔多斯盆地靖边气田区中奥陶统马家沟组五₁—五₄亚段古岩溶型储层分布特征及综合评价 [J]. *海相油气地质*, 16(1): 1–13. [Hou F H, Fang S X, He J, et al. 2011. Distribution characters and comprehensive evaluation of Middle Ordovician Majiagou submembers reservoirs in Jingbian gas field area, Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 16(1): 1–13.]
- 柯林斯 A G. 1984. 油田水地球化学 [M]. 林文庄, 王秉忱, 译. 北京: 石油工业出版社. [Gollins A G. 1984. Geochemistry of oilfield waters [M]. Lin W Z, Wang B C, translated. Beijing: Petroleum Industry Press.]
- 雷卞军, 卢涛, 王东旭, 等. 2010. 靖边气田马五₁₋₄亚段沉积微相和成岩作用研究 [J]. *沉积学报*, 28(6): 1153–1164. [Lei B J, Lu T, Wang D X, et al. 2010. Research on the sedimentary microfacies and diageneses of Ma5₁₋₄ submember in Jingbian Gas Field [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1153–1164.]
- 李贤庆, 侯读杰, 胡国艺, 等. 2002a. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系地层水有机组分特征 [J]. *石油与天然气地质*, 23(1): 26–29. [Li X Q, Hou D J, Hu G Y, et al. 2002a. Characteristics of organic compositions in formation waters from central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 23(1): 26–29.]
- 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 等. 2001. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系地层水与水溶气的地球化学特征 [J]. *断块油气田*, 8(3): 1–5. [Li X Q, Hou D J, Liu C Q, et al. 2001. The geochemistry characteristics of Ordovician formation water and dissolved gas of central gas field in Erdos Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 8(3): 1–5.]
- 李贤庆, 侯读杰, 唐友军, 等. 2002b. 地层流体化学成分与天然气藏的关系初探——以鄂尔多斯盆地中部大气田为例 [J]. *断块油气田*, 9(5): 1–4. [Li X Q, Hou D J, Tang Y J, et al. 2002b. The preliminary discussion on relationships between chemical compositions of formation fluid and natural gas reservoirs — a case study of central large gas field in Erdos Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 9(5): 1–4.]
- 王起琮, 赵淑萍, 魏钦廉, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组海相碳酸盐岩储集层特征 [J]. *古地理学报*, 14(2): 229–242. [Wang Q C, Zhao S P, Wei Q L, et al. 2012. Marine carbonate reservoir characteristics of the Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(2): 229–242.]
- 徐国盛, 宋焕荣, 周文. 2000. 鄂尔多斯盆地中部气田水化学条件与天然气聚集 [J]. *石油实验地质*, 22(4): 330–335. [Xu G S, Song H R, Zhou W. 2000. Hydrochemical conditions and natural gas accumulation in the middle part gasfield of the Ordos Basin [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 22(4): 330–335.]
- 于红岩, 魏丽, 秦晓艳, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地西北部奥陶系马家沟组气水分布及成因 [J]. *石油勘探与开发*, 43(3): 396–402. [Yu H Y, Wei L, Qin X Y,

- et al. 2016. Gas and water distribution of Ordovician Majiagou Formation in northwest of Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 396–402.]
- 张治波, 黄敬, 李丽荣, 等. 2017. 油田水分类方法及应用的研究进展 [J]. *能源研究与管理*, (2): 21–23. [Zhang Z B, Huang J, Li L R, et al. 2017. Research progress of oil field water classification method and application [J]. *Energy Research and Management*, (2): 21–23.]
- 赵卫卫, 王秀娟, 杨兆林, 等. 2012. 苏里格地区下古生界马家沟组地层水化学特征与天然气聚集关系 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 27(1): 35–41. [Zhao W W, Wang X J, Yang Z L, et al. 2012. Relationship between hydrochemical characteristics of Majiagou formation water in Lower Paleozoic in Sulige region and natural gas accumulation [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 27(1): 35–41.]
- Aminu M D, Nabavi S A, Rochelle C A, et al. 2017. A review of developments in carbon dioxide storage [J]. *Applied Energy*, 208: 1389–1419.
- Bachu S. 2000. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change [J]. *Energy Conversion & Management*, 41(9): 953–970.
- Bachu S. 2015. Review of CO₂ storage efficiency in deep saline aquifers [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40: 188–202.
- Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. 1991. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75(5): 925–945.
- Li L, Zhao N, Wei W, et al. 2013. A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences [J]. *Fuel*, 108(11): 112–130.
- Li Q, Wei Y N, Liu G Z, et al. 2014. Combination of CO₂ geological storage with deep saline water recovery in western China: insights from numerical analyses [J]. *Applied Energy*, 116(3): 101–110.
- Underschultz J, Dodds K, Michael K, et al. 2016. Carbon capture and storage [M]// Devasahayam S, Dowling K, Mahapatra M K. Sustainability in the mineral and energy sectors. Boca Raton: CRC Press: 437–452.