

文章编号:1001-6112(2000)04-0330-06

鄂尔多斯盆地中部气田 水化学条件与天然气聚集

徐国盛,宋焕荣,周文

(成都理工学院“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:该文旨在通过现代水文地质特征和形迹的研究,判明储层所处的地球化学环境,指明储层的含油气性,并建立油气判识指标。鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马家沟组地层水具有浓度高、正变质程度深、均为 CaCl_2 型水的特点,表明其进入水文完全交替停止带,封闭条件好。它经过了从碳酸盐岩同沉积海水到风化剥蚀期的淋滤水,再经埋藏期的高矿化度的浓缩变质水到成藏期的气田伴生水的水化学场演变过程。与海水室内蒸发浓缩曲线相比较,马五₁气田水富集 Cl^- 、 Ca^{2+} ,消耗 Na^+ 、 Mg^{2+} ,反映完全封闭的还原环境有利于天然气的聚集与保存。文中还讨论了水化学特征参数与天然气富集的关系,并建立了马五₁储层利用现今水化学特征判别含气性的指标体系。

关键词:指标体系;天然气聚集;现代水文地质;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P632.3

文献标识码:A

地下水对储集层演化的影响与水文地球化学作用紧密联系。在漫长的地质历史时期中,导致储层发生变化的基本作用包括溶解作用、沉淀作用、重结晶作用、交代置换作用、压溶作用等等。这些作用是在各自特殊的水文地质条件下进行的,作用过程进行的最终结果导致形成现今地层水的特征和储层剖面中的水化学残余形迹。对现代水文特征和形迹的研究有助于判明储层所处的地球化学环境并指明储层的含油气性及有利的油气聚集区。本文以鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马家沟组储层(马五₁)为主要研究对象,详细阐述了现代水文地质条件与天然气聚集的关系。

鄂尔多斯盆地在长期的历史发展中,除周缘地区外,内部从未经过足以引起地层变形的水平挤压运动。在大范围内地层基本保持水平,但同沉积的垂直升降活动比较活跃。其特征是贺兰裂谷肩的均衡翘升活动和贺兰裂谷区与盆地内部的差异沉降始终居首要地位。在长时期内盆地内部的构造面貌起初是西高东低,而到燕山运动中期由于山西地块的上隆始将盆地从东部掀起,转变成为一向西微倾的大单斜或大向斜。因此,鄂尔多斯盆地的天然气基

本为自生自储、原地聚储的非构造气藏。正由于气水就地小范围内进行分异且分异不彻底,从而导致气水分布关系的复杂性,表现为目前气水界限不明显,呈众多区块星罗棋布式分布的格局。

以鄂尔多斯盆地为例,就是为了寻找在地层平缓、以古岩溶岩性圈闭为主的含油气系统现代水文地质分析的理论与方法,以解决此类盆地现代水文地质条件与天然气运移、聚集、成藏规律的关系。

1 马五₁ 地层水化学特征

据几十口井的水质资料分析(表1),鄂尔多斯盆地长庆气田地层水矿化度较高,但变化也较大,最高可达 230.38g/L(陕20井),低者为 23.31g/L(陕52井)。按苏林分类,本地区马五₁地层水水型几乎全为 CaCl_2 型水。阳离子以钙、钾、钠占优势, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 变化范围为 1.768 ~ 44.152g/L, Ca^{2+} 变化范围为 11.437 ~ 49.803g/L;其次是镁, Mg^{2+} 的变化范围为 1.615 ~ 12.54g/L。阴离子以氯为主,其值变化范围为 39.505 ~ 170.009g/L,它占阴离子总量的 99.86%;而 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 分别只占有 0.045%和

收稿日期:2000-03-13.

作者简介:徐国盛(1962-),男(汉族),江苏泰兴人,博士,主要从事石油地质方面的研究工作。

表1 鄂尔多斯盆地中部气田马五₁地层水化学特征统计Table 1 Statistics of chemical characteristics for M5₁ formation water in the middle part gas field of the Ordos Basin

井号	层位	取样日期	矿化度 /(g/L)	水型	水化学特征/(mg/L)						pH	测 试	
					Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		Q _g /(10 ⁴ m ³ /d)	Q _w /(m ³ /d)
陕52	马五 ₁₋₃	93.11.8	23.31	CaCl ₂	3 760	3 944	658	14 196	354	401	6.0	5.019 2	29.9
陕166	马五 ₁₋₃	94.6.7	142.06	CaCl ₂	23 363	23 171	3 009	92 189	0	324	6.0	4.143 4	11.09
陕93	马五 ₁₋₂	93.7.19	159.79	CaCl ₂	19 253	35 182	3 393	101 599	0	367	6.0	0.001 5	25.0
陕20	马五 ₁₋₃	92.6.20	230.38	CaCl ₂	2 045	35 567	3 420	103 945	0	326		4.085 7	240.0
陕48	马五 ₁₋₂	92.7.16	181.4	CaCl ₂	738	5 387	1 198	13 344	0	311	6.1	3.355 5	64.0
G22-5	马五 ₁	93.8.6	131.49	CaCl ₂	18 474	26 818	2 513	82 959	0	485	6.0	0.028 9	7.76
陕164	马五 ₁₋₂	94.4.4	124.16	CaCl ₂	9 885	11 437	1 615	39 507	473	554	6.0	0.392 9	3.9
陕84	马五 ₁₋₂	94.5.12	55.03	CaCl ₂	6 560	11 629	1 488	34 180	1 061	107	6.0	11.03	0.351

0.135%。在马五₁储层地层水中还含有一定量的微量元素, I⁻ 0.3~10.2mg/L, Br⁻ 0.2~1 389mg/L, Ba²⁺ 0.3~1 825mg/L。

从总体特征看,鄂尔多斯盆地中部气田马五₁地层水具有浓度高、正变质程度较深的特点。其最大矿化度比现代海洋水(矿化度为35g/L)浓缩了6.58倍。尤其水型均为CaCl₂型水,表明马五₁储层已进入水文完全交替停止带,封闭条件好。

1.1 矿化度

马五₁地层水矿化度在23.31~230.38g/L之间,平均值为130.953g/L。与其它水体的对比说明,本区马五₁地层水属中、高浓度,为长期的地层内循环、水岩相互长期作用和经浓缩变质的结果。由矿化度看,马五₁地层水具有深循环、封盖良好的地层水特征,对天然气保存十分有利。然而,不同井区矿化度的差异较大,说明储层中不同富水带之间水力联系很差,径流阻力很大。

1.2 地下水水型

按苏林分类,氯化钙型和重碳酸钠型水在油气田中广泛分布。其中,氯化钙型是油气田中最有利的标志水型,一般为深盆地滞留型水。本区马五₁储层经判定的地层水均属氯化钙型。区内少数水质化验为重碳酸钠型或硫酸钠型,这与其它因素(例如钻井过程中淡水的加入)或邻近地层中膏盐的溶解有关。因此,非氯化钙型水的出现并不说明马五₁储层地下水层已经受到氧化、水洗等不良影响。

1.3 地层水特征系数

本区地下水特征系数按矿化度变化分为四级。

假定脱硫系数<1、钠氯比<0.85、氯镁比>5.13、氯钙比<26.8、镁钙比>5.26作为油气藏地下水标志(通常的指标界线),统计结果表明,矿化度超过100g/L的水有93%为典型油气田水,矿化度为100~50g/L的水有88%属油气储层水,矿化度为50~10g/L的水有84%达到油储水标准,而矿化度小于10g/L的水有一半以上为非油气田水质。

2 马五₁地层水化学场演化

目前中部气田马五₁储层中地层水的形成经历了复杂而漫长的水文地质过程。随着盆地的形成、发展和消亡,它经沉积时的海水变为地表渗入水、潜水到地下水,由承压流动状态变为相对滞留承压状态。它是伴随着天然气的生成、运移,由气-水-岩相互作用而逐渐形成的。由于地下水深埋于地下,长期发生的水-岩作用及与岩石之间的元素交换使其水化学成分和特征不断地发生变化^[1]。因此,要对目前的地层水特征有明确认识,必须追溯其成因及水化学成分的形成与演变历程。

2.1 沉积时期(同生期)的孔隙水特征

马五₁地层属湖相沉积环境,沉积并经同生期白云化作用形成一套以微晶白云岩、含有石膏晶体的泥晶云岩为主的地层。经同位素分析,准同生期白云岩化形成的白云岩碳、氧同位素分布主要集中在¹³C为-0.20‰(PDB)、¹⁸O为-0.85‰(PDB)左右,显示为典型蒸发湖环境;其白云石经探针分析仍然保持富钙、镁的特点(Mg²⁺为99 211

$\times 10^{-6}$, Ca^{2+} 为 $244\ 674 \times 10^{-6}$)。这一时间地层中的孔隙水仍然为沉积时的海水,有经一定成岩改造的残余海水特征。

2.2 表生岩溶期的孔隙水特征

马五₁ 地层沉积末,经历了一次大规模的抬升运动,使马五₁ 地层遭受了长期风化侵蚀,形成了其顶部高低不平的古岩溶地貌景观。这一时期,大量的地表淡水侵入马五₁ 地层,一方面对岩石进行溶蚀和充填,另一方面则全面地替换了地层孔隙中原有的残余海水。

表生期的溶蚀作用大大改善了马五₁ 地层的储渗性能,形成了该套古岩溶储层^[2]。根据该期充填物的碳、氧同位素测定结果,其 ^{18}O 值主要分布在 -10% (PDB) 左右,反映出孔隙介质水为淡水环境。

2.3 浅埋藏压释水阶段的孔隙水特征

表生期结束后,随着地壳的沉降,研究区接受了石炭系本溪组的泥沼相沉积。据太原组部分泥岩样品的微量元素分析,石炭系地层中 B(硼)元素含量为 77.6×10^{-6} ,反映为海陆过渡(半咸水)相环境; $\text{B}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 5.39,则反映出水介质为咸水; B/Ca 比值为 3.19,也反映出咸水环境。估算的盐度为 12.25%(SP)。因此说明,研究区马五₁ 地层孔隙中的水已被盐度为 12.25% 而富含 B^{2+} 的海水置换。

随着上覆沉积物的堆积,本溪组砂泥岩地层发生机械压实作用而逐渐地排出孔隙水。这些孔隙水多半进入下伏的马五₁ 地层中,而逐渐地置换了其中的泥沼相海水。这些水对马五₁ 储层具有一定的侵蚀作用,水特征基本上与原来的孔隙介质水相近。

2.4 深埋藏期有机水及析出的泥岩结晶水相混合的孔隙水特征

前人的大量研究成果表明,马五₁ 地层中的天然气源有两个:一为上覆本溪组地层的泥沼相泥岩及煤层生成的天然气;一为奥陶系本身有机质热演化生成的天然气。马五₁ 气藏属混源气藏。

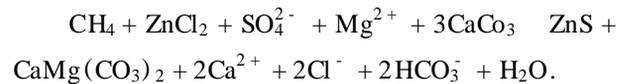
无论是上覆煤系烃源岩还是奥陶系本身,其有机质在热演化形成烃类的过程中都能够析出大量的水。这些水中常伴随有大量的有机酸及 CO_2 ,具有较强的侵蚀性。它们通过排出进入马五₁ 储层后,不仅可以造成溶蚀形成溶蚀孔隙,而且也改变了原来的孔隙水性质。

上述混合孔隙水随着地层的进一步埋深及地温的升高不断地蒸发、浓缩并发生脱硫酸作用,逐步形成高矿化度浓缩的变质水。

2.5 天然气运移聚集后形成的碳酸盐岩气田水特征

自有机水-结晶水析出的承压水流动阶段开始,油气也开始进入了运移聚集期。燕山期构造运动使研究区地层从原来的西高东低到构造反转后而成为东北高-西南低的单斜构造,使马五₁ 储层中原来的气水分布格局发生改变。浮力作用使烃类气体由西向东运移同时向西排水而重新分异。

在天然气的运移成藏过程中,由于温度、压力发生变化,原来地层水的物理-化学平衡被打破,水化学成分再度改变。甲烷等烃类物质在水中的溶解度与地层压力、温度等有关系。压力越大,温度越高,其溶解度越大。当马五₁ 储层中携带大量烃类物质的地层水进入相对高部位的圈闭时,由于温度、压力突然降低,烃类物质溶解度减小,由此产生气水分异而形成天然气藏,并最终形成富含 Cl^- 、 Ca^{2+} 的碳酸盐岩气田水。同时,地层水携带有一些重金属(如 Fe、Ba、Zn 等),它们可以金属化合物、无机物及有机络合物等形式随之运移。由于化学环境的改变,分离出的石油又是很强的还原剂,这些重金属可以形成硫化物沉淀^[3],如



中部气田马五₁ 储层中碳酸盐岩溶洞孔隙中大量的黄铁矿、萤石、重晶石等次生矿物就是如此形成的。

综上所述,可将鄂尔多斯盆地马五₁ 储层地层水化学场的形成与演化归纳为图 1 所示的模式。

3 鄂尔多斯盆地马五₁ 气田水化学成分的形成与演化

与成油生气有关的多种物理化学条件中,温度因素特别活跃。温度在油气田水化学成分的形成和演化过程中是一个非常重要的因素。在温度的影响下,蒸发浓缩作用可以引起气田水化学成分的一系列变化^[4]。例如马五₁ 地层水中 Cl^- 含量最高达 170.099g/L,比海水浓缩了 8.8 倍。这说明气田水在形成和演变过程中相应浓缩了若干倍,同时水中化学成分也发生了量的甚至质的改变。

A·G 科林斯在研究海相油田卤水的演变时,是通过蒸发海水进行比较的。笔者据海水室内蒸发浓缩实验的资料数据,绘制了海水蒸发浓缩曲线图

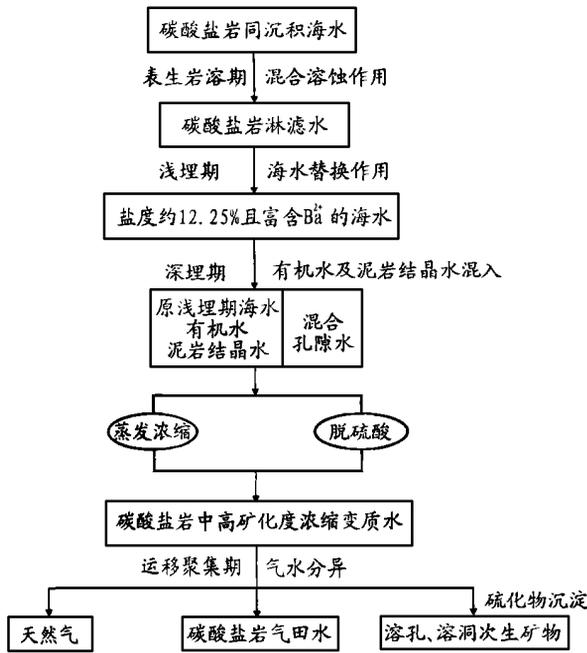


图 1 鄂尔多斯盆地中部气田马五₁气田水化学场演化模式

Fig. 1 Evolutionary model of the chemical field for M5₁ gas field water in the middle part gas field of the Ordos Basin

(图 2)。用这套曲线与马五₁气田水进行比较,着落于曲线左方的点表示了气田水在演变过程中的富集离子,着落于曲线右方的点表示了气田水在演化过程中的消耗离子。

据实际资料情况编制马五₁气藏伴生水与室内海水蒸发浓缩曲线比较图。从鄂尔多斯盆地中部气田马五₁气藏伴生水的浓缩变质曲线上可以看出,地层水富集 Cl⁻、Ca²⁺,消耗 Na⁺、Mg²⁺,水型几乎全为 CaCl₂型,矿化度普遍为每升几十克至一百多

克。这些反映出马五₁储层完全处于全封闭的还原环境,对油气保存十分有利。

4 地下水化学与气聚集的关系

4.1 水化学特征与气聚集的关系

鄂尔多斯盆地中区的马五₁地层水自沉积物形成至现代,经历了若干亿年的漫长历程,由最初的海水沉积水,经受了各次的构造运动影响,导致区域性剥蚀期大气降水和地表水的交替取代以及以后的埋藏压释水的置换和水-岩-烃复杂的相间作用,水化学成分发生了根本性变化。研究地层水的化学特征和变化,有助于判别储层的水文地球化学环境,有助于说明天然气的聚集成藏条件。

4.1.1 钠氯比 Na⁺/Cl⁻

钠氯比同油气聚集成藏无直接关系,但是它能反映地层水的变质程度和储层的水文地球化学环境。博雅尔斯基研究了大量油气田地下水后,将钠氯系数分为五类,以第三、四、五类为有利于油气保存的水文地球化学环境。

按博氏分类可以看出,长庆气田马五₁储层的地层水包括受酸化影响较大的地层水均属第五类,说明马五₁储层具有良好的封存条件。据统计,鄂尔多斯长庆气田矿化度大于 10~50g/L,钠氯系数一般小于 0.5 的地层水属于深部马五₁气藏伴生水性质。

4.1.2 脱硫系数 SO₄²⁻ × 100 / Cl⁻

在深部环境或油气影响范围内,水中的硫酸盐减小,脱硫系数变小,硫化氢可能在水中聚集。据国内外大量油气田水的研究,脱硫系数 1 可以作为还原条件好坏的界线指标。脱硫系数小于 1 的地层

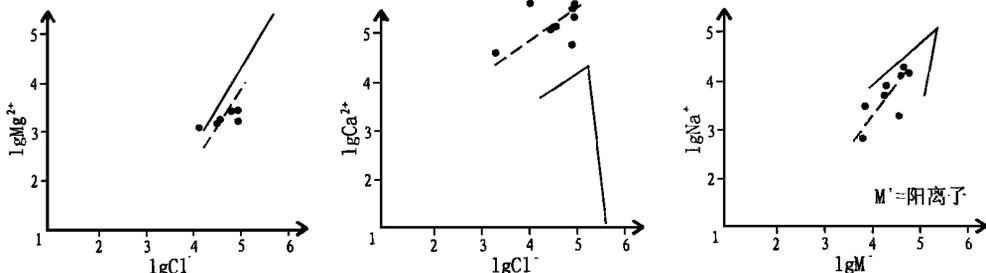


图 2 鄂尔多斯盆地长庆气田马五₁气藏伴生水与室内海水蒸发浓缩曲线比较图

Fig. 2 Comparison of changing trends when evaporated and condensed for in-house sea-water and M5₁ gas-pool associated water in the Changqing gasfield of the Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地中部气田马五₁ 储层现今气田水判别指标Table 2 Identification indexes of present gasfield water for M5₁ formation in the middle part gasfield of the Ordos Basin

层位	化 学 指 标								判别
	矿化度 /(g/L)	pH 值	Na ⁺ /Cl ⁻	$\frac{SO_4^{2-} \times 100}{Cl^-}$	Cl ⁻ /Br ⁻	Br ⁻ /(mg/L)	I ⁻ /(mg/L)	NH ₄ ⁺ /(mg/L)	
马五 ₁	>50	中偏酸性	<0.5	<1	<180~120	>6~11	>2.0	>30	气田水

水,通常是埋藏于封闭条件良好的地区;反之,则认为还原作用不彻底,可能受浅表层氧化作用的影响。

经统计,鄂尔多斯盆地中部气田马五₁ 储层中矿化度在 50g/L 以上的水有 91.2% 属于脱硫作用彻底之列;矿化度小于 50g/L 的水,只有 38% 脱硫较彻底;62% 的水受氧化作用影响较大,可能是非地层水混入所致。因此,从脱硫系数可以初步判断,马五₁ 储层中地层水矿化度超过 50g/L 的水绝大多数为气藏伴生水,或者水中含气藏伴生水的比例很大。

4.1.3 铵含量

马五₁ 储层地下水中铵含量为 3.1~317mg/L。其中,矿化度超过 10g/L 的水样其最低铵含量为 12mg/L,矿化度大于 100g/L 的水样其铵含量大于 250mg/L,比塔里木盆地许多油气储层都高,比地表淡水和海水大几十倍至几百倍。从铵的含量可以看出,鄂尔多斯盆地马五₁ 地层水无疑为气藏伴生水,在存在良好圈闭的场所一定富集大量的天然气。

4.2 判别气田伴生水的水化学指标

应用地下水化学成分寻找埋藏的油气矿床,预测潜在的含油气构造,乃是油田现代水文地球化学研究的主要内容之一^[4]。前述的大量研究成果表明:地下水与油气之间进行着积极的元素交换作用,由于元素迁移引起的水文地球化学作用(过程)使水化学成分发生变化;同时,油气藏的存在必然引起元素的迁移,并与水的化学成分趋向或达到动态平衡(浓度等)。因此,通过地下水化学成分的研究,可以预测富集油气的有利地区或构造。

油气水在形成过程中,经历了溶滤、交换、浓缩、脱硫酸、脱碳酸及变质等作用,使其化学成分异常复杂。元素的浓度差异,尤其在压力和温度差异条件下,更易导致扩散作用的发生,使水化学成分在垂直剖面上和平面上呈现有规律的变化。前面已讨论过,水化学特征与油气聚集存在各种各样的密切联

系。为此,我们可根据水化学成分变化的规律性建立判别含油气性的定量指标,旨在指导油气的勘探与开发。

表 2 为鄂尔多斯盆地长庆气田马五₁ 储层现今水化学特征判别含气性的指标值统计表。如表所示,马五₁ 储层的地层水矿化度大于 50g/L, pH 值中偏酸性, Na⁺/Cl⁻ 小于 0.5, 脱硫系数小于 1, Cl⁻/Br⁻ 小于 180~120, Br⁻ 含量大于 6~11mg/L, I⁻ 含量大于 2.0mg/L, NH₄⁺ 含量大于 30mg/L, 由此判定该地层水为马五₁ 气藏伴生水。

上述依据马五₁ 储层实际的地层水资料及现今的勘探结果而制定的利用现今水化学特征判别含气性的指标,也许个别跟讨论的理论评判值有出入,但在实际应用中综合所有指标值加以判别,则准确程度相当高。为此,可以积极地使用上述各种指标对地层水是否是气田伴生水作出判断,再结合其研究成果以便较快地发现新的、更多的天然气藏。

5 结论

综上所述,从奥陶系马家沟组储层水化学条件与天然气聚集关系的研究可得出以下认识。

(1) 鄂尔多斯盆地长庆气田马五₁ 地层水具有浓度高、正变质程度深的特点。其最大矿化度比现代海水浓缩了 6.58 倍,水型均为 CaCl₂ 型,可基本判断马五₁ 储层已进入水文交替停止带,封闭条件好。

(2) 马五₁ 气田水的水化学演化首先是碳酸盐岩的同沉积海水经过古风化剥蚀期的混合溶蚀作用形成碳酸盐岩淋滤水。然后进入埋藏期,发生岩溶作用,经过有机溶蚀、蒸发浓缩、脱硫酸等过程,形成碳酸盐岩高矿化度浓缩变质水。最后进入天然气运移聚集期,发生气水分异作用,一方面天然气从水中脱

出进入圈闭高部位不断聚集成藏,另一方面地层水流向圈闭低部位形成碳酸盐岩气田水;同时,地层水携带的一些重金属在很强的还原作用下形成硫化物沉淀。

(3) 编制了马五₁气藏伴生水与室内海水蒸发浓缩曲线比较图。由分析可知,马五₁气藏伴生水富集 Cl^- 、 Ca^{2+} ,消耗 Na^+ 、 Mg^{2+} ,水型几乎全为 CaCl_2 型,反映演变至今的马五₁储层完全处于全封闭的还原环境,有利于天然气的保存。

(4) 研究表明,地下水与油气之间进行着积极的元素交换作用,由于元素迁移引起的水文地球化学作用使水化学成分发生变化;同时,油气藏的存在必然引起元素的迁移,并与水化学成分趋向或达到动

态平衡。通过对现代地下水化学成分的研究,建立了马五₁层系利用现今水化学特征判别含气性的指标体系。

参考文献:

- [1] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中化学元素的背景特征及形成[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 262 - 269.
- [2] 覃建雄, 徐国盛. 鄂尔多斯盆地奥陶统碳酸盐岩储层深埋次生孔隙研究[J]. 西安石油学院学报, 1995, 10(4): 9 - 14.
- [3] 刘崇禧. 寻找油气田的水文地球化学标志[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(1): 44 - 50.
- [4] 地质矿产部水文地质工程地质研究所. 油田古水文地质与水文地球化学——以冀中拗陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 148 - 248.

HYDROCHEMICAL CONDITIONS AND NATURAL GAS ACCUMULATION IN THE MIDDLE PART GASFIELD OF THE ORDOS BASIN

XU Guo-sheng, SONG Huan-rong, ZHOU Wen

(State Key Lab of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploration,
Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This paper aims at ascertaining the geochemical environment of reservoirs, calculating the oil/gas prospects of reservoirs and establishing the identification indexes of hydrocarbon by the research of modern hydrogeologic characteristics and trackways. The Ordovician Majiagou formation water in the middle part gasfield of the Ordos Basin has high concentration and deep orthometamorphic degree, and is all CaCl_2 -typed. This indicates that it enters into the complete hydrologic exchanging-stagnant zone and has good sealing conditions. It experienced the evolutionary process of the hydrochemical field, from carbonate rock synsedimentary sea-water to the leached water in the weathering and denuding period, and from the condensed metamorphic water with high mineralization degree in the burial period to the gasfield associated water in the pool-forming period. Compared with sea-water in house evaporating and condensing curves, M5₁ gasfield water enriches Cl^- and Ca^{2+} and expends Na^+ and Mg^{2+} , showing that the completely isolated setting of reduction is favorable to the accumulation and preservation of natural gas. In this paper, the relationship between hydrochemical characteristic parameters and natural gas accumulation is discussed, and the index system to identify gas prospects by modern hydrochemical characteristics in M5₁ reservoir is set up.

Key words: index systems; natural gas accumulation; modern hydrogeology; the Ordos Basin