

渤海石臼坨凸起上第三系 油田水化学及其形成演化规律^{*}

张宏达 汪 珊

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北正定)

摘 要 在论述地质环境背景的基础上,揭示了研究区上第三系明化镇组油田水化学的基本特征和空间分布规律,重溯其在地质历史过程中形成演化的阶段和特点,论证了油田水现代化学是遵循浓缩盐化、正向变质作用方向演变形成的。
关键词 油田水化学 形成演化 上第三系 石臼坨凸起

1 地质环境概况

石臼坨凸起是渤海盆地渤中坳陷的一个次级构造单元,其周边为凹陷围限,面积为 2 040 km²。渤海盆地基底由太古宇混合花岗岩、角闪岩等构成。中-上元古代、古生代为地台型碳酸盐岩沉积。中生代初地台抬升,二叠系遭受剥蚀,三叠系大面积缺失,中晚期燕山运动发生强烈断块运动,地台解体,仅在断陷带沉积了早、中侏罗世煤系地层。新生代进入裂谷形成发展的断陷阶段,早第三纪早、中期为裂谷形成扩展期,堆积了以湖相沉积环境为背景的近岸水下扇沉积体系,晚期为裂谷萎缩衰亡期,堆积了三角洲沉积体系。渐新世末发生的喜马拉雅运动,使盆地抬升遭受长期剥蚀和夷平作用。晚第三纪进入坳陷阶段,盆地周边山区上隆,盆内整体下降,堆积了河流相沉积体系。第四纪沉积覆盖使盆地陆区地形呈现为广阔舒展的平原,在海域 100 n mile 以内,坡度平缓,坡角为 0°02'~0°04'^[1]。渤海断裂活动主要发生在断陷阶段,主断裂在南北向拉张作用下,在前第三系基岩断块翘倾活动中生成,在坳陷阶段,断裂下盘派生的分支断裂发育,以复式 Y 型组合为基本形态,呈向上散开形态的分支断裂在上第三系愈加发育。

2 油田水现代化学成分的基本特征和分布规律

2.1 化学成分的基本特征

据大量水化学资料统计计算,并与海洋水化学资料对比(表 1)表明,明化镇组油田水具有如下基本特征:①溶解固体总量(TDS)的变动幅度较大,但远低于海洋水的浓度值;②宏量组分浓度变化幅度均较大,与海洋水相比,除 HCO₃⁻ 比海洋水的浓度高出 7 倍以外,其他组分均比海洋水的同名组分浓度要低;③微量组分中 I⁻ 比海洋水的要高出 2 个数量级,但 Br⁻ 比海洋水的要低得多;④离子比值 r_{Na}/r_{Ca} 、 r_{Ca}/r_{Mg} 、 r_{Na}/r_{Cl} 、 $SO_4 \cdot 10^2/Cl$ 比海洋水

^{*} 该文是国家自然科学基金资助项目(编号 49472154)研究成果之一
第一作者 张宏达,男,1969 年生,助理研究员,从事水文地质、环境地质研究,邮编 050803

的同名系数比值均高,但 $\sqrt{\text{SO}_4 \cdot \text{Ca}}$ 、 $\sqrt[3]{(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)_2 \cdot \text{Ca}}$ 、 IBE (碱交换指数)以及 $r\text{Mg}/r\text{Cl}$ 均比海洋水的同名参数值低;⑤河流相明化镇组油田水具有较高的 TDS 、高碘、低溴和大陆水化学成分的基本特点。

2.2 空间分布规律

2.2.1 面上分布规律性 溶解固体总量(TDS)和宏量组分 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} (HCO_3^- 除外)以及 $\sqrt{\text{SO}_4 \cdot \text{Ca}}$ 、 $\sqrt[3]{(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)_2 \cdot \text{Ca}}$ 、 IBE 高值带位于区内中部偏北,由北朝东、南、西方向呈递降变化(图 1、图 2);微量组分 I^- 、 B^{3+} 浓度高值带位于区内东北和东部,由此向西和南西方向呈降值变化, Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度的高值区和降值变化趋势均与 TDS 相似,但等值线分布形态发生了变异;离子比值 $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 、 $r\text{Na}/r\text{Ca}$ 均由 NW 向 SE 方向呈增值变化; $r\text{Ca}/r\text{Cl}$ 等值线增值变化态势与此正好相反; $r\text{Mg}/r\text{Cl}$ 比值由 SW 向 NE 方向呈降值变化态势,而 $r\text{Ca}/r\text{Mg}$ 增减变化相反, $\text{SO}_4 \cdot 10^2/\text{Cl}$ 与 $r\text{HCO}_3/r\text{SO}_4$ 两对比值的降值变化趋势正好相反,前者低值区位于区内中部偏北,后者的高值区与前者的低值区位置相比向东位移。

表 1 石臼坨凸起明化镇组油田水与海洋水化学参数对比

Table 1 Comparison of chemical parameter between oil-field water of Shijiutou Symon fault and ocean water

地 区		石 臼 坨 凸 起			现 代 海 洋 水
水 化 学 参 数	数 值	最小值	最大值	均 值	均 值
宏量组分/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Na^+	934	9268	3808.00	11044.00
	Mg^{2+}	2	1051	222.68	1317.00
	Ca^{2+}	8	653	178.45	420.00
	Cl^-	319	17122	5736.86	19324.00
	SO_4^{2-}	38	1844	568.45	2686.00
	HCO_3^-	43	2474	1005.18	150.00
微量组分/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Br^-	0	30	8.58	65.00
	I^-	0.07	1.90	0.71	0.06
	B^{3+}	0	5.79	2.13	4.70
	Fe^{2+}	0	39	2.52	
	Fe^{3+}	0	18.57	1.78	
$TDS/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	TDS	3.09	30.03	11.62	35.00
离子比值	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	0.91	4.51	1.51	0.87
	$r\text{Mg}/r\text{Cl}$	0.01	0.18	0.09	0.20
	$r\text{Ca}/r\text{Cl}$	0.02	0.08	0.04	0.039
	$r\text{Na}/r\text{Ca}$	10.8	124.67	44.94	25.00
	$r\text{Ca}/r\text{Mg}$	0.18	3.64	0.70	0.19
	$\text{SO}_4 \cdot 10^2/\text{Cl}$	1.29	45.14	13.54	10.20
	$r\text{HCO}_3/r\text{SO}_4$	0.06	21.22	5.55	0.04
离子浓度积	*	0.77	34.91	10.02	1175.17
	* *	2.76	9.24	5.30	4.69
碱交换指数	IBE	-0.98	-2.04	-0.23	3.13

注: * 为 $\sqrt{\text{SO}_4 \cdot \text{Ca}}$; * * 为 $\sqrt[3]{(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3)_2 \cdot \text{Ca}}$

2.2.2 垂向变化规律性 溶解固体总量(TDS)随着埋藏深度加大至 1 700 m 左右范围内 万方数据

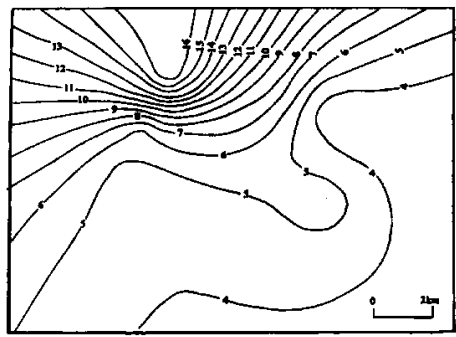


图 1 石臼坨凸起油田水 TDS 场

Fig.1 Sketch showing TDS field of oil-field water of Shijiutuo symon fault

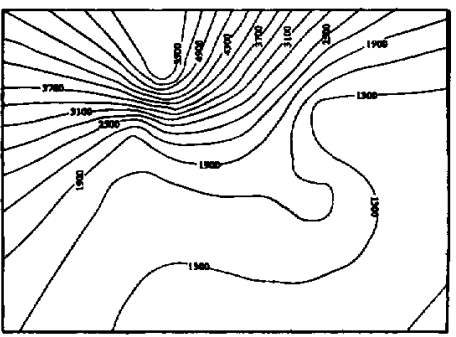


图 2 石臼坨凸起油田水 K⁺ + Na⁺ 浓度场

Fig.2 Sketch showing K⁺ + Na⁺ field of oil-field water of Shijiutuo symon fault

呈现降值变化态势,构成反向型剖面,约在 1 300~1 750 m 之间为最低值带,在深度 1 700m (下第三系)以下,呈增值变化趋势。宏量组分 Na⁺ + K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 浓度与深度关系的形态与 TDS 的相似,其中 Na⁺ + K⁺、Cl⁻、Ca²⁺ 与 TDS 的相似性最好(图 3)。微量组分 I⁻、B³⁺、Fe²⁺、Fe³⁺ 浓度与深度关系的形态基本相似,与 TDS 的增降变化相反。 rNa/rCl 、 $SO_4 \cdot 10^2/Cl$ 、 rNa/rCa 、 rCa/rMg 、 $rHCO_3/rSO_4$ 随深度加大均呈增值变化态势, rCa/rCl 、 rMg/rCl 呈降值变化; IBE 、 $\sqrt{SO_4 \cdot Ca}$ 、 $\sqrt[3]{(HCO_3 + CO_3)_2 \cdot Ca}$ 3 个水化学参数值与 TDS 和宏量组分浓度随着深度加大呈现的变化规律性是相似的。

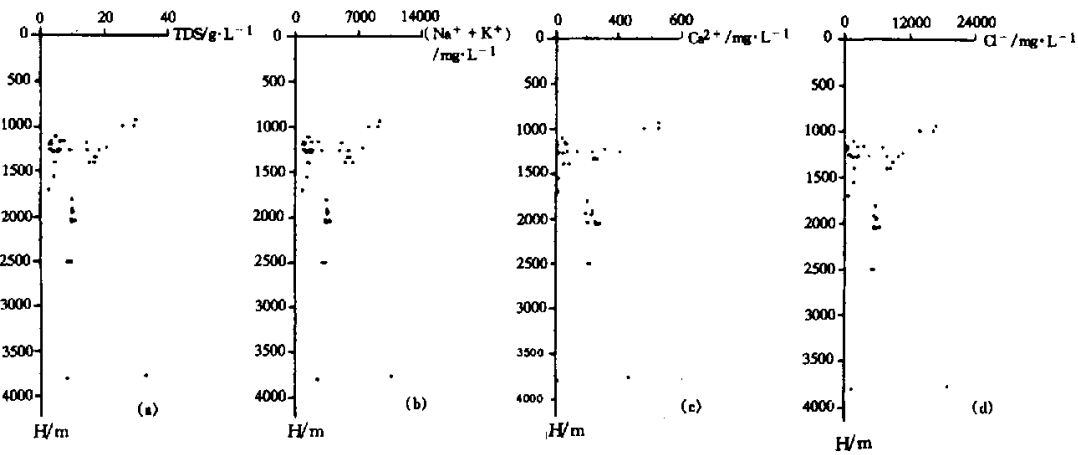


图 3 石臼坨凸起上第三系油田水 TDS、宏量组分浓度与深度相关散点图

Fig.3 Scatter plot of TDS, macrocomponent and depth of upper Tertiary oil-field water of Shijiutuo symon fault

研究表明 ,上第三系明化镇组底部(含馆陶组上部)油田水 TDS 是最低的 ,是第三系油田水化学垂向剖面上的一个淡化带。

3 油田水化学形成演化过程

明化镇组油田水化学的现代景观是在地质历史过程中经历了各种自然因素综合作用改造的结果。为追溯其形成演化至少要阐明它的初始化学组分及其浓度 ,经历了哪几个形成阶段 ,各阶段的主要作用、演化特点、方向以及演化规律性等问题。

3.1 初始化学再造

沉积盆地沉积体系中最早赋存的同生沉积成因水的组分浓度、化学属性与其沉积时蓄水盆地的水化学是同一的。根据沉积体系的岩性、岩相、生物种属和生态、气候环境、恢复计算古盐度等综合分析 ,可进行判定^[2 3]。

明化镇组沉积时赋存其沉积物中的同生沉积成因水主要为河流相孔隙淡水 , $TDS<0.5\text{ g/L}$,阳离子浓度 $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}$,阴离子浓度 $\text{HCO}_3^{-}>\text{Cl}^{-}$,为 HCO_3-Ca 型水 ,微量、痕量金属组分和生物成因组分含量甚微 ,有机质贫乏 ,以大气成因气体 O_2 、 CO_2 、 N_2 为主。

3.2 初始与现代化学之间的平衡差异

根据明化镇组油田水初始与现代化学成分对比(表 2)表明 ,两者存在着显著的化学平衡差异 ,明化镇组同生沉积成因水在地质历史进程中经历了后生作用的改造 ,其溶解固体总量、宏量组分浓度及其相对含量、水型等均发生了显著变化 ,朝着浓缩盐化、正向变质的地球化学作用方向演化发展。

表 2 明化镇组油田水初始与现代化学成分对比表
Table 2 Contrast between original and present chemical components
of oil - field water of Minghuazhen Formation

初始化学成分	现代化学成分	演化方向
$TDS<0.5\text{ g/L}$ $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}$, $\text{HCO}_3^{-}>\text{Cl}^{-}$ HCO_3-Ca 型 微量痕量组分、生物成因组分、有机组分 含量甚微 大气成因气体	$TDS=11.62\text{ g/L}$ $\text{Na}^{+}>\text{Ca}^{2+}$, $\text{Cl}^{-}>\text{HCO}_3^{-}$ HCO_3-Na 或 $\text{Cl}-\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型 微量痕量组分、生物成因组分、有机组分 含量显著增高 生物成因气体	浓缩盐化 正向变质

3.3 形成演化阶段

3.3.1 形成演化阶段的划分 盆地的沉积史、地壳运动史和剥蚀史从宏观上控制和影响地下水的形成过程。在不同的地质时期(阶段)地下水具有不同质的形成作用和条件 ,但在一个特定的地质时期(阶段)则具有相对稳定的形成作用和条件。根据研究区构造运动、水动力、地球物理场等的综合分析研究表明 ,明化镇组油田水经历了 3 个主要形成演化阶段 ,即经历了 3 个水文地质期。

(1)第Ⅰ阶段 明化镇组从沉积开始至结束这段时期 ,即沉积作用水文地质期 ,形成同生沉积成因淡水 ;

(2)第Ⅱ阶段 明化镇组沉积结束至第四纪沉积前这段时期 ,即海水入渗作用水文地质

期。明化镇组沉积成因淡水在海水的入渗作用下发生混合作用,朝浓缩盐化、正向变质的地球化学作用方向发展;

(3)第Ⅲ阶段 第四纪沉积开始直至现代。明化镇组沉积体系持续地被上覆第四纪沉积层和海水覆盖,处于封闭状态,即沉压埋藏作用水文地质期,沿着浓缩盐化、正向变质的地球化学作用方向演化。

3.3.2 各阶段主要形成作用和形成演化规律 各阶段主要形成作用和形成演化规律分述如下:

第Ⅰ阶段 ①早第三纪末发生区域性地壳上升,由渐新世的湖泊环境转为晚第三纪平原型河流环境,中新世以辫状河流沉积为主,上新世以低曲度河流沉积为主,泛滥平原相和岸后沼泽相发育。明化镇组同生沉积成因水为河流相孔隙淡水;②明化镇组沉积厚度为1 300~1 600 m,在其沉积作用进程中,随着沉积物持续不断地增厚,地静压力相应地持续增高,由于泥岩比砂岩抗压强度小,压缩强度大。因此,由泥岩中排挤出的水向上覆和下伏的砂岩中迁移,在明化镇组沉积体系内发生内循环型压挤式沉积水交替,使砂岩储集层的水向后生沉积成因水转化;③随着地静压力和地温的增高,封闭性、还原性等相应得到增强,而开启性、氧化性则相应减弱。沉积成因水发生浓缩盐化、正向变质。由于河流相沉积体系中可溶盐含量贫乏,因此,沉积成因水的 TDS 增高不大,化学组分中还原性组分浓度增高,而氧化性组分浓度则降低。

第Ⅱ阶段 ①当明化镇组沉积体系被海水淹埋,使其由原来的大陆环境转变为海洋环境,在海水的掩埋和入渗作用下,明化镇组沉积成因淡水浓度发生显著增高效应,沉积层的岩石综合体的含盐性亦相应增高,并由钙吸附离子的陆成综合体朝向钠吸附离子的海成综合体方向转变;②高盐度的海水沿着明化镇组沉积体系的强渗透地段(河道砂)通道断裂及其周边发育的裂缝、裂隙,以线状和面状形式向下渗透,发生混合作用。盐水与淡水混合作用是最迅速改变水化学成分的主要作用之一,明化镇组水的现代浓度(TDS)比初始浓度增高20多倍,这包含了第三阶段发生盐化作用的贡献。鉴于明化镇组下伏的第三系均是河湖相沉积,其沉积层中水的 TDS 不高,对明化镇组水的盐化作用影响较小。因此,海水入侵和下渗作用是明化镇组沉积成因淡水发生显著盐化的主要原因;③海水入渗引起的盐化作用的强度是随着明化镇组埋藏深度的加大渐趋减弱。明化镇组油田水的现代浓度(TDS)随深度加大呈现的降值变化构成的反向型剖面与海水入渗作用随着埋深加大渐次减弱有关;④第Ⅱ阶段,海水入渗发生混合作用,是导向明化镇组沉积成因水浓缩盐化的一个重要时期,并使沉积成因水演化成为沉积-渗入成因的变质咸水和盐水。

第Ⅲ阶段 明化镇组被持续堆积的、层厚为300~500 m第四纪沉积体系和浩瀚的海水覆盖,处于封闭围压状态。这种封闭型水文地质构造环境促使明化镇组盐化的沉积-渗入成因水发生改变的主要作用和特点是:①在沉压埋藏封闭型水文地质构造系统内,明化镇组沉积体系以压挤式沉积水交替为主要动力特征。其渗流场的形成取决于两种水循环效应,一是明化镇组沉积体系内部的迁移,在地静压力作用下,细粒的泥质岩压实释放的压实水向上覆和下伏的粗粒砂质岩中以面状形式垂向迁移,交替和更新砂岩中的水;石臼坨凸起周围被东南面的渤中凹陷、北面的秦南凹陷和西面的南堡凹陷围限,由于凹陷比凸起上的明化镇组埋深大,承受的地静压力高,泥岩释放的压实水量多,进入砂岩中的水量和砂岩层状

压力均要大,因此,凹陷砂岩中的水顺层朝凸起方向运移,凸起成为排泄区和泄压带;二是不同沉积体系之间的迁移,明化镇组下伏的下第三系为湖相沉积体系。研究表明:有机质丰度高,沙河街组为主力生油层,次为东营组生油岩。沉压埋藏作用阶段是油气运移时期。在地静压力和流体层状压力的驱动下,深层水运载着油气一起沿着复式Y型断裂系统及其旁侧伴生的裂缝系统、不整合面和砂岩连接的渗透带以线状形式上涌至凸起上的明化镇砂岩储集层中运移和聚集。②明化镇组系统内部的地球化学条件及其与外部系统的水循环作用控制了水化学成分的变化。明化镇组下伏的第三系流体上涌进入凸起的明化镇组,加剧其系统的还原性和有机物变质作用,并使水具有油田水化学的特性。明化镇组系统内部主要发生溶滤作用、有机物变质作用以及热地球化学作用等^[4]。根据镜下鉴定,砂岩中长石类矿物、石英的溶解,不同时期生成的碳酸盐及其胶结物、粉末状黄铁矿及其与有机物共生等十分发育。溶解作用结果,由固相转入水中的阳离子是 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,阴离子主要是 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} ,在这类组分中除 Na^+ 外均是水中的不稳定组分,很易生成难溶的Ca、Mg的碳酸盐矿物, HCO_3^- 也相应减少。气态烃和有机物抢夺 SO_4^{2-} 中的氧发生的脱硫酸盐作用进行得十分活跃, SO_4^{2-} 还原为 H_2S ,进而还原成更为稳定的黄铁矿,导致水中 SO_4^{2-} 贫化,但反应过程的产物 HCO_3^- 在水中浓集,生物成因 I^- 浓度甚高。热地球化学作用使水中化学组分浓度均可相应增高,但明化镇组最大埋深仅为2 km左右,地温为40~50℃,因此它不能成为水的盐化主导作用。

上述作用的综合结果,是水中稳定性组分(Cl^- 、 Na^+)和脱硫酸盐作用产物(HCO_3^-),以及表征油田水特征的有机组分(包含 I^-)和烷烃气体等组分聚集,不稳定性组分(SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)和氧化性组分贫化,水中成分分异纯化的正向变质作用,最终演化成为变质的陆相沉积成因油田水的现代化学景观。不含盐的河流相沉积层中的油田水浓度不会超过海水的浓度值。

参 考 文 献

- 1 吴崇筠,薛叔浩等著.中国含油气盆地沉积学.北京:石油工业出版社,1992.
- 2 汪蕴璞,汪珊等.西湖凹陷油气运聚成藏的水文地质论证.中国海上油气(地质),1997,11(5):305~312.
- 3 汪蕴璞等.油田古水文地质与水文地球化学.北京:科学出版社,1987.
- 4 B. И. 久宁著,杨立中译.深部地下径流的研究方法.北京:地质出版社,1990.

Chemistry of Upper Tertiary Oil-Field Water in Shijiutuo Symon Fault of Bohai Sea and Regularity of Its Formation and Evolution

Zhang Hongda Wang Shan

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Zhengding, Hebei)

Abstract Based on an investigation of regional geoenvironmental setting, this paper deals with the basic features and the spatial variations of the oil-field water of Minghuazhen Formation in the study area and describes the stages and characteristics of evolution in the process of geological history. It is pointed out that the modern evolutionary pattern of oil-field water chemistry follows the direction of concentrated salinization and normal metamorphism.

Key words oil-field water chemistry formation and evolution upper Tertiary Shijiutuo symon fault