

文章编号:0253-9985(2008)04-0479-07

鄂尔多斯盆地中部中生界地下水动力系统

王晓梅^{1,2}, 王震亮²

(1. 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学“大陆动力学”国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:地下水是油气运移的载体,地下水赋存状态必将影响盆地中油气的运移、聚集和分布规律,正确划分地下水动力系统对油气田勘探和开发具有重要的指导意义。通过分析鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组至白垩系的现今地下水压力场、化学场和同位素特征,尝试性地划分出3种不同性质的地下水动力系统:浅部相对开启带、中部过渡带和深部相对封闭带。深部相对封闭带对油气藏的保存条件最为有利,是油气勘探的有利目标区域。

关键词:重力流;压实流;动力系统;地下水;中生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Analysis on groundwater hydrodynamic systems of the Mesozoic in the central Ordos Basin

Wang Xiaomei^{1,2}, Wang Zhenliang²

(1. School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Groundwater serves as the carrier for hydrocarbon migration. The modes of groundwater occurrence have an effect on hydrocarbon migration, accumulation, and distribution in a basin. Therefore, a correct division of groundwater hydrodynamic systems can be a useful guidance for hydrocarbon exploration and development. The analyses of the present groundwater pressure field, geochemical field and stable isotope features of the Mesozoic (T₃-K) in central Ordos Basin revealed three kinds of groundwater hydrodynamic systems of various characteristics. They are the relative open zone in the shallower part, the transitional zone in the middle part, and the relative confining zone in the deeper part. The relative confining zone in the deeper part has the most favorable conditions for hydrocarbon preservation and can be the target for future exploration.

Key words: gravity flow; compaction flow; dynamic system; groundwater; Mesozoic; Ordos Basin

流体是地质作用过程中最积极、最活跃的因素,关于盆地流体的研究是地球科学中的前沿领域,同时也是研究最薄弱、难度最大的部分^[1]。流体研究是目前进行油气运移、成藏研究的一个有效途径^[2]。因此,盆地流体研究正在成为有重大意义和新方向的核心内容,如成藏动力学和许多金属矿床的成矿动力学。20世纪80年代国内许多知名学者如陈荷立、陶一川、李明诚和田世澄等,主要通过泥岩压实曲线研究确定古孔隙流体压力,进一步分析油气运移条件^[3~7]。在此期间,流体势是驱动油

气运移聚集的流体动力的观点得到认可^[8]。20世纪90年代在恢复地层埋藏史的基础上,古流体势的分布和演化规律成为重要的研究方向^[9~11]。一个沉积盆地由于其地下水动力学背景既不是一个统一的整体,又不是各处互不相关,正确划分盆地地下水动力系统是指导油气勘探和开发的一条重要途径^[12]。20世纪90年代末期至今,康永尚和田世澄等引入了油气成藏动力系统的概念^[13,14]。

鄂尔多斯盆地以往的地下水研究主要是集中在白垩系及其以上地层,以供水为目的的浅层地

收稿日期:2008-02-06。

第一作者简介:王晓梅(1975—),女,讲师、硕士,石油地质。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB214600)。

下水研究。1999—2001年,国土资源部门组织的鄂尔多斯盆地地下水找水项目系统研究了鄂尔多斯白垩系自流盆地地下水系统赋存特征^[15]。目前,盆地深层地下水的系统研究比较薄弱,开展深层地下水的研究对油气的勘探和开发都具有重要的研究价值。研究区位于鄂尔多斯盆地中部,构造上横跨陕北斜坡、天环坳陷,西接西缘冲断带。

和地表水而言,即大气降水和地表水构成地下水的主要补给来源,由地形高差造成的流体势差地下水由补给区向排泄区流动。浅部的相对开启带埋深一般小于1 000 m,包括的层位有白垩系、侏罗系安定组、直罗组和东部局部沟壑露头处的延安组和延长组,地层水为矿化度小于20 g/L的 Na_2SO_4 型水和 NaHCO_3 型水。

起区下渗补给的大气降水和地表水,沿基底断裂上升的基底流体甚至地幔流体。

盆地流体主要有压实流和重力流两种运移机理。在大气降水和地表水为地下水补给源的情况下,地下水在重力作用下由高地势区向低排泄区流动,这种流动方式即为重力流。在压实过程中随沉积水的排出而出现独特的压实流,在地静压力下压实水由盆地沉降中心向边缘和浅部流动。杨绪充参考国外的水动力模式,根据地下水的流动特征和地下水的势能特征,提出了按地下水动力系统命名的盆地分类:压实流盆地、重力流盆地和滞流盆地^[16]。在这3种基本类型之间,往往存在过渡性的叠合型盆地,即压实流-重力流叠合盆地和重力流-滞流叠合盆地等类型。

根据流体来源和运动特征的不同,研究区中生界地下水动力系统由浅至深可划分为3个带:浅部相对开启带、中部过渡带和深部相对封闭带。

2 地下水动力系统的划分

2.1 浅部相对开启带

浅部的相对开启带,开启是相对于大气降水

度值比较低。根据苏林分类,白垩系地层水大部分属 Na_2SO_4 水型。研究区氢氧同位素资料进一步证明,氢氧同位素值接近鄂尔多斯盆地大气降水氢氧同位素组成,具大气起源水特征。随埋深的不同地下水径流条件有所不同,因而具有不同的地下水年龄,据 ^{14}C 测定白垩系地层水年龄为4 130~17 930 a,远远小于盆地白垩系沉积的时代^①。

根据目前的研究程度,白垩系地层水主要来源于大气降水,符合重力流特征,因此将其划入浅部的相对开启带。

2.1.2 延安组和延长组局部沟壑露头处地下水

研究区西部边界为西缘逆冲断层,地层由东向西倾覆于盆地内部,三叠系和侏罗系地层依次自东向西出露。这种地层格架决定了每套地层局部露头处都会受到渗入水的影响。在靖边—青杨树坪—一线以东延安组8段(延8段)受到大气渗入水的明显影响,延8段地层水为矿化度小于10 g/L的 NaHCO_3 型水, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ 平均值为2.19。根据朱明恭等的研究^②,在盆地东缘甘谷驿—永坪—南沟岔

① 孙继朝. 鄂尔多斯白垩系自流水盆地地下水赋存规律研究. 2004

② 朱明恭. 陕甘宁盆地东部油田石油地质规律及勘探开发经验总结. 2002

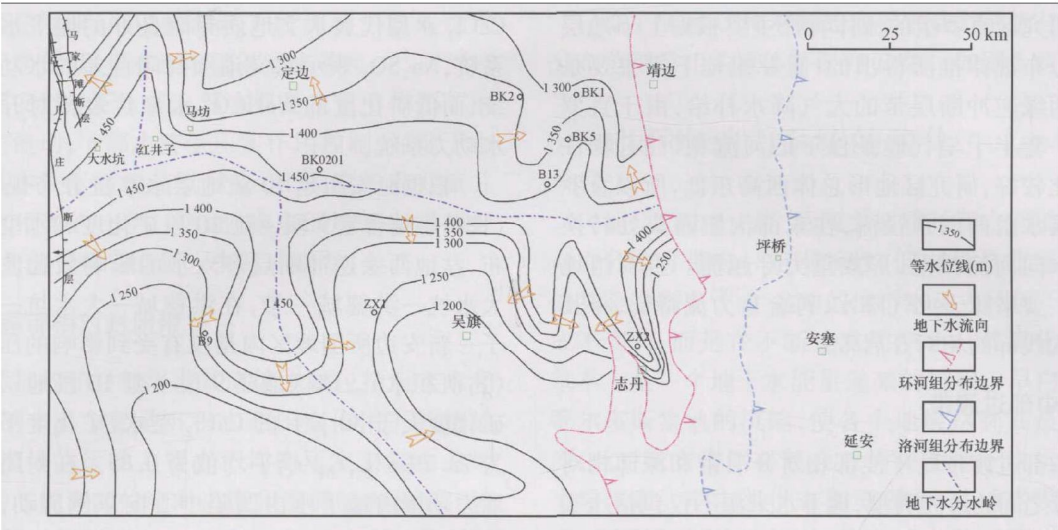


图 1 盆地中部环河组等水位线图

Fig. 1 Groundwater level contour map of the Huanhe Fm in central Ordos Basin

一带以东延长组 6 段(长 6 段)地层水盐度向东逐渐降低,亦表明其地层水受到大气降水的影响。

2004 年 12 月安塞地区取了 5 口井的油田水样,在中国地质科学院水文地质环境地质研究所进行了氢氧同位素测试。碾 12-14 井测试的是地层水,其他 4 口井均为进行油水分离处理的水样(加入有机溶剂加温)。侯 9-28 井长 6 段地层水偏离鄂尔多斯盆地大气降水线,显示其与大气降水无水力联系。其他 4 口井的同位素与大气降水的氢氧同位素值靠近(图 2),具大气起源水特征。因此,靠近露头处的延安组和延长组地层水亦划入浅部的相对开启带。

2.1.3 安定组和直罗组地层水

安定组沉积相以湖相沉积为主,岩性主要为

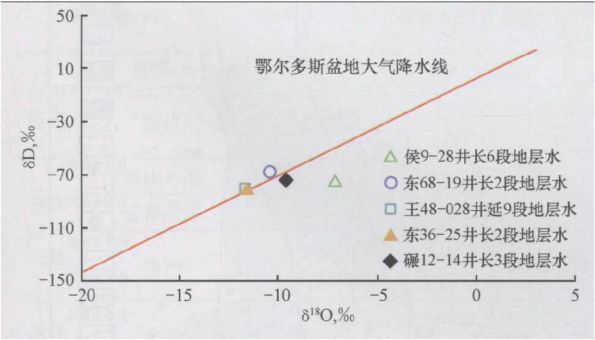


图 2 安塞地区地层水氢氧同位素组成

Fig. 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of groundwater in Ansai area

泥岩,岩性致密。安 48 井岩电特征曲线可以看出(图 3),安定组以泥岩为主,其上段泥岩厚度达 40 m。安定组可阻断上覆白垩系与侏罗系之间地层水的联系,视作区域性的隔水底板。

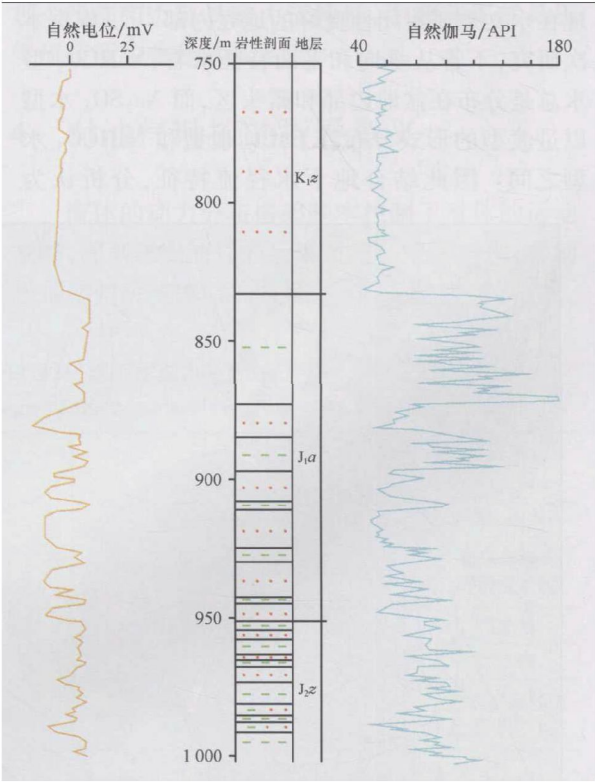


图 3 定边地区安 48 井岩-电特征曲线

Fig. 3 Curves of lithologic and electric properties of Well An-48 in Dingbian area

研究区直罗组的流体特征主要根据上下地层水的分布规律推测得出的:直罗组地下水主要是接受西缘逆冲断层带的大气降水补给,由于直罗组为一套半干旱气候条件下的河流相沉积,物性条件比较好,研究区地形总体西高东低,所以直罗组地层水由西向东径流,在东部沟壑露头处转换成潜水向河流排泄,形成重力穿越流。直罗组地层水主要来源于大气降水,符合重力流特征,将其亦划入浅部的相对开启带。

2.2 中部过渡带

中部过渡带处于浅部相对开启带和深部相对封闭带之间的过渡类型,地下水来源不仅包括承压水,也包括大气降水和地表水,地下水为具有混合成因的混合水。该带埋深一般为1 000~1 300 m,包括的主体层位是延安组,地层水既包括高矿化度的 CaCl_2 型水,也包括20~30 g/L的 Na_2SO_4 型水和10~20 g/L的 NaHCO_3 型水,流体的运移机理既有压实流又包括重力流。

苏林根据大量实际资料研究, CaCl_2 水型常出现在水文地质封闭性良好的地壳内部^[17]。根据本次研究,不管从垂向和平面特征来看, NaHCO_3 型水总是分布在盆地边部和露头区,而 Na_2SO_4 水型以过渡型的形式分布在 CaCl_2 水型和 NaHCO_3 水型之间。因此结合地下水径流特征,分析认为

CaCl_2 水型代表水文地质封闭良好的地下水动力系统, Na_2SO_4 表示水文地质封闭性差的水动力系统,而低矿化度的 NaHCO_3 水型代表相对开启的水动力系统。

根据延安组延10段地层水水位分布规律^[18](图4),结合延9段+延10段矿化度和水型的分布,盆地西缘逆冲断层渗入水的影响最远波及到大水坑—洪德城一带,在洪德城—大水坑—白湾子—新安边所围地区内是没有受到影响的承压水(古沉积水)。该区域延9段+延10段地层水为矿化度大于30 g/L的 CaCl_2 型水,矿化度平均值为73.79 g/L, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ 平均值为0.85。在封闭型水动力环境内地下水由凹陷中心向东侧流动,在其外围受盆地西缘和东部露头区大气降水和地表水的影响地下水动力系统由封闭型向开启型转换。在封闭型水动力环境的外围向西延展到逆冲带,向东扩展到定边—张天赐—沙集一线的范围为过渡类型的地下水动力系统,地下水为 Na_2SO_4 型水。 Na_2SO_4 型水的矿化度平均值为27.24 g/L, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ 平均值为1.09。定边—张天赐—沙集一线以东为相对开启的地下水动力系统,地下水为 NaHCO_3 型水。

延安组延8段 CaCl_2 型水范围明显缩小,大部分区域为相对开启的地下水动力环境,地下水为 NaHCO_3 型水。由延9段+延10段到延8段地层

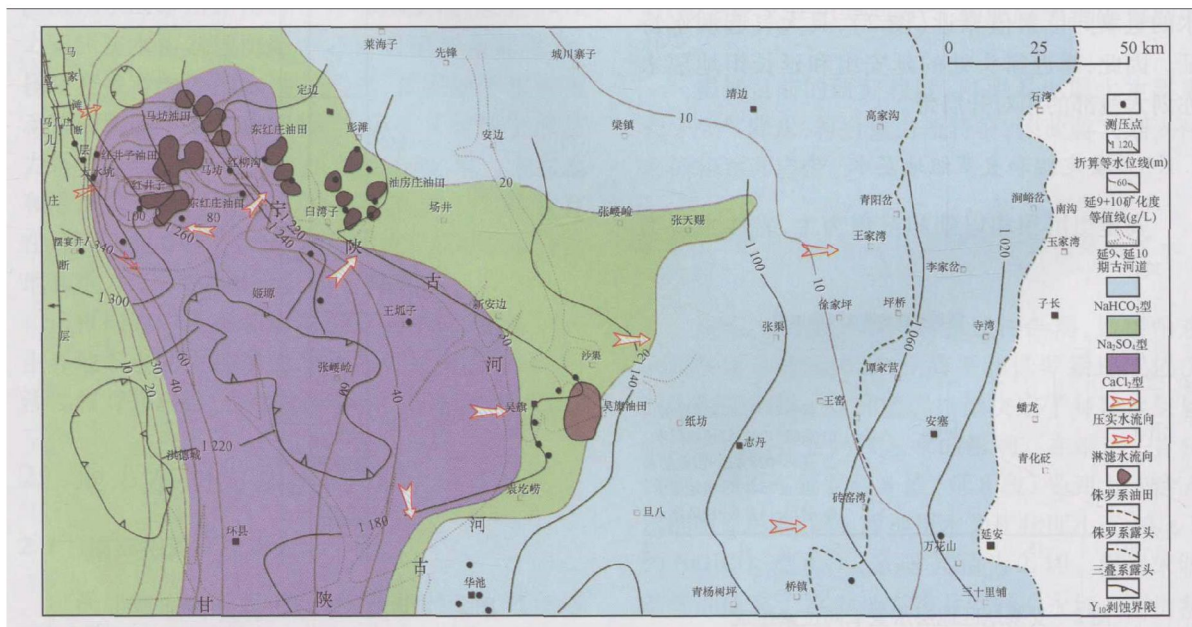


图4 盆地中部延安组延10段等水位线图

Fig. 4 Groundwater level contour map of the 10th Member of Yan'an Fm in central Ordos Basin

水的变化规律,可以推测延1段到延7段地层水更趋于淡化,压实水逐渐被淋滤水替换。

延安组地下水在上部主要是在重力作用下由西向东流动,下部主要受压实作用控制,而地下水流也基本处于缓慢流动状态,压实流和重力流并存并占相当的比例。因此,除东部局部出露的地层外,大部分延安组划入中部过渡带。

2.3 深部相对封闭带

深部的相对封闭带其流体主要包括压实水和油,水的来源主要是沉积水在压实作用下补给地下水,流体的运动主要由不平衡压实引起由盆地沉降中心的深部位流向边缘和浅部的离心流。该带埋深一般大于1 300 m,包括的层位主要是延长组,地层水为矿化度大于30 g/L的 CaCl_2 型水。

除东部局部出露地层的地下水受到大气降水的影响外,延长组大部分地下水属于深部的相对封闭带。除局部范围外绝大部分地区长1+2段地层水为 CaCl_2 型水,矿化度平均值为68.05 g/L, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ 平均值为0.8。长6段地层 CaCl_2 型水矿化度平均值为74.95 g/L, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ 平均值为0.45。长6段地层水矿化度呈变化区间很大的块状分布,没有侧向水交替所发生的高低变化趋向明显的特征^[18]。

深部的相对封闭带地层水流主要是在压实作用下由凹陷中心向盆地边缘流动,研究区西侧为逆冲断层带,因此地下水主要由西向东极缓慢流动,并趋于停滞状态。

综上所述,3种不同的地下水动力系统分带的分布范围及相关流体特征列于表1,如图5所示。

3 地下水动力系统的演化

地质历史上,前、后两个地质时期之间的流体动力分布可带有一定继承性,但也可非继承性的甚至是剧变^[10]。盆地的地下水动力环境不是一成不变的,而是在不断地发展演化。其演化过程基本上是一个地下水能量递减的过程。早白垩世鄂尔多斯盆地的沉陷,使各个地层达到其最大埋深,此时压实作用必然会成为促使地下水运动的主导因素。早白垩世末期至现今,盆地内发生东升西降的翘倾构造运动,使盆地内的沉积岩系遭到一次大规模的剥蚀,从东向西依次出露上三叠统延长组,侏罗系,白垩系。这时大气降水和地表水开始侵入地下,渗入水的运动主要受重力作用控制,因而地形因素的作用便显得突出出来。该次构造运动使延长组真正受到一次大规模的剥蚀和渗入水的形成,破坏了流体的封闭性,形成了现今浅部和边部具重力流特征,中部和深部具压实流特征的叠合盆地类型。

4 对油气勘探的指导意义

流体的动力分布格架基本控制了流体的运动规律,深刻影响油气的运聚过程和规律条件,有助于最终解决流体(油、气和水)的多期聚、(成)藏、

表1 研究区中生界(上三叠统一白垩系)地下水动力系统划分

Table 1 Division of groundwater hydrodynamic systems of the Mesozoic (T₃y—K) in the study area

主要特征		浅部相对开启带			中部过渡带			深部相对封闭带
分布范围	埋深/m	一般<1 000			一般1 000~1 300			一般>1 300
	层位	白垩系	安定组 直罗组	延安组和延长组 局部沟壑露头	除局部露头外的延安组			除局部露头外的延长组
流体动力特征	流体来源	大气降水和地表水			大气降水和地表水、压实水			压实水
	运移机理	重力流			压实流、重力流			压实流
	流向	分水岭为界 向南、向北径流	由西向东径流	垂向径流为主	由西向东径流缓慢			由西向东径流 趋于停滞状态
流体地球化学特征	水型	Na_2SO_4	NaHCO_3 Na_2SO_4	NaHCO_3	NaHCO_3	Na_2SO_4	CaCl_2	CaCl_2
	矿化度/(g·L ⁻¹)	<10		<10	10~20	20~30	>30	>30
	$r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$	1.05~3.17			1.17~1.75	1.09~1.22	0.81~0.85	0.45~0.80

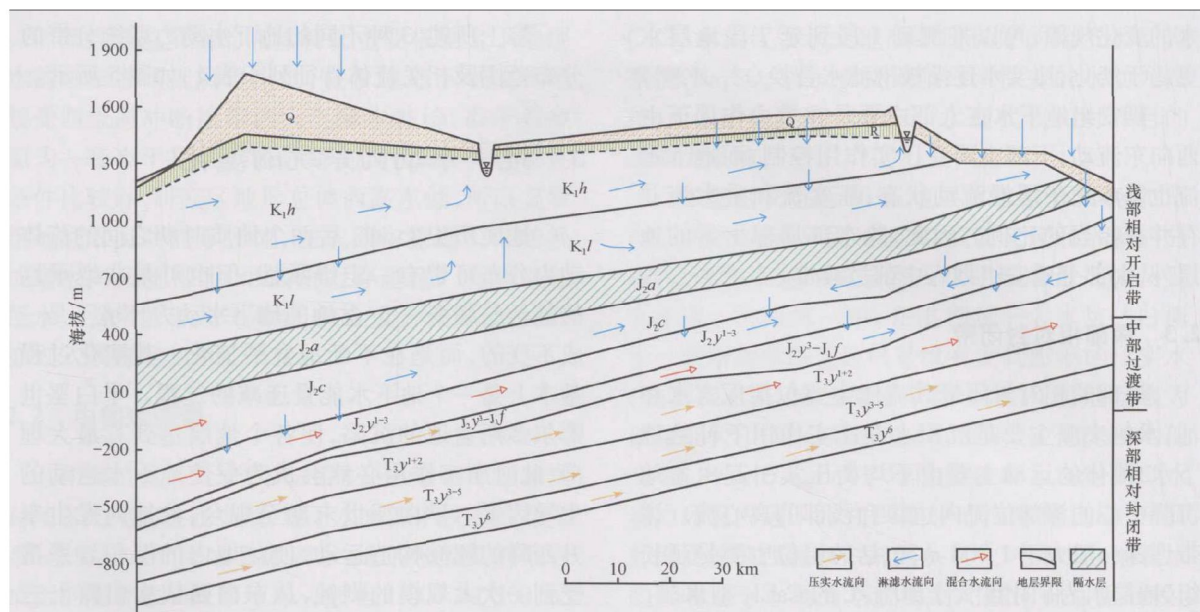


图5 盆地中部中生界地下水动力系统划分示意图

Fig. 5 Sketch map showing division of groundwater hydrodynamic systems of the Mesozoic in central Ordos Basin

散(失)问题^[10],关于流体的研究具有一定实用价值。从油气藏的保存条件出发,一般讲具有压实流运移特征的深部相对封闭带对油气藏的保存条件最为有利。

研究区中生界延长组除局部露头外,其水动力系统属深部相对封闭带,是油气勘探的有利目标区域。研究区中安塞油田和志丹油田等三叠系油田均位于深部相对封闭带,油气藏的保存条件很好。延安组除局部露头外,在洪德城—大水坑—白湾子—新安边所围地区内,属于压实水流控制的封闭型水动力环境,是油气勘探的有利目标区;向东扩展到定边—张天赐—沙集一线的范围是压实流和重力流两种水体交接的过渡类型水动力环境,亦是油气聚集的有利区带。鄂尔多斯盆地早期石油勘探发现的马坊、红井子、东红庄和油房庄等侏罗系油田主要位于上述中部过渡带中的有利目标区域。

5 结论

1) 浅部相对开启带,包括的层位有白垩系、侏罗系安定组、直罗组及局部沟壑出露的延安组和延长组,地下水补给源为大气降水和地表水,流体运动机理主要为重力流,埋深一般小于1 000 m,地层水有 Na_2SO_4 和 NaHCO_3 型。

2) 中部过渡带,包括的层位主要是延安组,地下水来源为压实水、大气降水和地表水,流体的运移机理有压实流和重力流,埋深一般在1 000 ~ 1 300 m,地层水有 CaCl_2 , Na_2SO_4 和 NaHCO_3 型。

3) 深部相对封闭带,包括的层位是延长组,包含的流体主要为压实水和油,流体的运动主要为从盆地深部流向边缘和浅部的离心流,埋深一般大于1 300 m,地层水为矿化度大于30 g/L的 CaCl_2 型水。

致谢:本文系笔者在西北大学读硕士期间研究的成果,在此对提供过无私帮助的老师 and 同学们表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

- 王震亮,张立宽. 沉积盆地流体研究的现状与前沿问题[A]. 见:刘池洋,编. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展[C]. 北京:科学出版社,2005. 26~49
- 王震亮. 盆地流体动力学及油气运移研究进展[J]. 石油实验地质,2002,24(2):99~103
- 陈荷立,罗晓容. 泥岩压实曲线研究与油气运移条件分析[J]. 石油与天然气地质,1987,8(3):233~241
- 陈荷立,罗晓容. 砂泥岩中异常高流体压力的定量计算及其地质应用[J]. 地质论评,1988,34(1):54~63
- 陶一川,范士芝,陈义贤,等. 辽河西部凹陷超压带的分布及某些初步认识[J]. 地球科学,1986,11(3):315~322

(下转第501页)

- Sea's Judy oilfield[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 641-644
- 24 Thie'rya R, Pironon J, Walgenwitz F, et al. PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 701-704
- 25 Liu D H, Xiao X M, Mi J K, et al. Determination of trapping pressure and temperature of petroleum inclusion using PVT simulation inclusion of Lower Ordovician carbonates from the Lunnan low uplift, Tarim Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 29-43
- 26 刘德汉, 宫色, 刘东鹰. 江苏句容-黄桥地区有机包裹体形成期次和捕获温度、压力 PVTsim 模拟计算[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1 435-1 448
- 27 Teinturier S, Pironon J. Experimental growth of quartz in petroleum environment, Part I: procedures and fluid trapping [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 2 495-2 507
- 28 Bourdet J, Pironon J. Strain response and re-equilibration of CH₄-rich synthetic aqueous fluid inclusion in calcite during pressure drops [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 2 946-2 959
- 29 刘超英, 周瑶琪, 陈勇, 等. 高温高压合成碳酸盐岩流体包裹体实验[J]. *硅酸盐通报*, 2007, 26(1): 168-172
- 30 倪培, 王一刚. 人工合成烃包裹体的实验研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2 033-2 038
- (编辑 李 军)

(上接第 478 页)

- 15 楼章华, 朱蓉, 金爱民, 等. 东营凹陷地下水动力场的形成与演化[J]. *地质科学*, 2003, 38(1): 85-96
- 16 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——以冀中坳陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- 17 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 18 楼章华, 高瑞祺, 蔡希源. 论松辽盆地地下水动力场演化与油气运移、聚集[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 115-120
- 19 Magara. Compaction and fluid migration—practical petroleum geology [J]. Amsterdam, Elsevier: 1978
- 20 Villegas M E, Bachu S, Ramon J C, et al. Flow of formation waters in the Cretaceous-Miocene succession of the Llanos basin, Colombia [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(11): 1 843-1 862
- 21 Tóth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1963, 68(12): 4 795-4 812
- 22 Tóth J. Gravity induced cross-formational flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada—analysis, patterns, and evolution [J]. *Water Resources Research*, 1987, 14(5): 805-843
- 23 Tóth J. Cross-formational gravity-induced flow of groundwater: a mechanism of transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration) [A]. In: Roberts III W H, Cordell R J, eds. Problems of petroleum migration [C]. AAPG Bulletin, 1980, 10(1): 121-167
- 24 李明诚. 石油与天然气运移(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994
- (编辑 高 岩)

(上接第 484 页)

- 6 李明诚. 在油气初次运移研究中压实曲线的应用[J]. *地球科学*, 1986, 11(3): 309-314
- 7 田世澄, 李纯菊. 泌阳凹陷孔隙流体压力及油气运移特征[J]. *地球科学*, 1986, 11(3): 323-327
- 8 陶一川. 油气运移聚集的流体动力学机理问题[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(3): 255-267
- 9 杜强, 胡伏生, 万力, 等. 鄂尔多斯北部盆地古流体动力场的演化特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(6): 23-27
- 10 王震亮. 改造型盆地流体动力学的发育特点[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 24-27
- 11 邓林, 汤磊, 康志宏, 等. 盆地三维古水动力数值模拟方法及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 7-11
- 12 康永尚, 庞雄奇. 油气成藏流体动力系统分析原理及应用[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 80-84
- 13 田世澄, 陈永进, 张兴国, 等. 论成藏动力系统流体动力学机制[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 329-335
- 14 康永尚, 王捷. 流体动力系统与油气成藏作用[J]. *石油学报*, 1999, 20(1): 30-33
- 15 王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 23(1): 6-14
- 16 杨绪充. 含油气区地下温压环境[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1991
- 17 刘方槐, 颜婉荪. 油田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 18 杨俊杰, 李克勤, 张东生, 等. 中国石油地质志(12卷), 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992
- (编辑 高 岩)