

文章编号: 1001-6112(2010)05-0453-06

海拉尔盆地乌尔逊凹陷 水文地质特征与油气运聚关系

张 秋, 聂志阳, 谭志伟, 张作祥, 刘凤霞

(中国石油天然气股份有限公司 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 沉积盆地内的地下水是油气运移的重要载体, 水文地质特征是控制或影响油气藏的边界条件。在划分盆地内含水岩系的基础上, 采用水动力场与水化学场相结合的方法, 对海拉尔盆地乌尔逊凹陷主要含水岩系的水文地质条件进行研究, 划分出 3 个不同性质的水文地质区带: 交替活跃—氧化区带, 开启程度高, 不利于油气赋存; 交替缓慢—弱还原区带, 较有利于油气藏形成; 交替阻滞—还原区带, 封闭程度高, 有利于油气藏形成, 是油气勘探最有利的目标区域。

关键词: 地下水; 水动力; 水化学; 油气藏; 乌尔逊凹陷; 海拉尔盆地

中图分类号: TE144

文献标识码: A

RELATIONSHIP BETWEEN HYDROGEOLOGY FEATURES AND HYDROCARBON ACCUMULATION IN WUERXUN SAG, HAILAER BASIN

Zhang Qiu, Nie Zhiyang, Tan Zhiwei, Zhang Zuoxiang, Liu Fengxia

(Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: Groundwater is an important carrier of hydrocarbon migration in sedimentary basins. Hydrogeological characteristics can control or influence reservoir boundary. On the basis of classifying water-bearing rock series, combining hydrodynamic field with hydrochemical field, the hydrogeological conditions of main water-bearing rock series have been studied in the Wuerxun Sag of the Hailaer Basin. It is divided into 3 different types of hydrogeological zones: a) actively alternating—oxidation zone, which is highly open and is unfavorable for oil and gas accumulation; b) slowly alternating—weak reduction zone, which is more favorable for reservoir formation; c) alternation blocked—reduction zone, which is closed in high degree and is conducive for reservoir formation, hence is the most favorable target area for exploration.

Key words: underground water; hydrodynamic; hydrochemical parameter; hydrocarbon reservoirs; Wuerxun Sag; Hailaer Basin

地下水是沉积盆地流体的重要组成部分, 油气的生、运、聚、散都是在水的参与下进行的, 长期以来是地质工作者研究的热点课题^[1-6]。笔者在生产实践中积累了丰富的水文地质资料, 从水动力场与水化学场统一的观点, 以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例, 研究地下水与油气藏的关系, 为油气勘探提供依据。

1 地质背景

乌尔逊凹陷是海拉尔盆地中部的 1 个二级构造单元, 呈南北向展布, 其东部为巴彦山隆起带, 西

部为嵯岗隆起, 北与红旗凹陷相接, 南与贝尔凹陷相连。该凹陷主要发育有 3 个方向的构造, 其中南北向构造最为发育, 北东向和北东东向次之。主要地层有: 下白垩统苏德尔特组、铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组、伊敏组, 上白垩统青元岗组, 第三系呼查山组和第四系^[7-8]。主要储集层为南屯组、铜钵庙组和苏德尔特组的砂岩、凝灰质砂砾岩和凝灰岩以及基岩风化壳, 其次为大磨拐河组一段和伊敏组一段砂岩。目前已在某些局部构造的钻孔中获工业油流或油气显示, 预示本区南屯组等储集层具有良好的油气勘探前景。

收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2010-08-11。

作者简介: 张秋(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事油气水文地球化学研究。E-mail: qiuzhang@petrochina.com.cn。

根据研究区地层岩性特征、沉积岩相、构造活动(包括断裂生成与消亡的时代等)、油气的生、储、盖条件、水动力状态及水化学性质等,将本区划分为 3 个含水岩系,即:下部含水岩系——布达特群;中部含水岩系——铜钵庙组—伊敏组;上部含水岩系——青云岗组以上地层。

下部含水岩系包括苏德尔特组以下地层,岩性以灰岩和火山碎屑岩为主,地下水类型为裂隙水,由于接近基岩,埋藏较深,封闭性较好,对油气的聚集和保存较好。中部含水岩系,岩性以泥岩、砂岩、砂砾岩为主,地下水类型以孔隙水为主,封闭性好,有利于油气的聚集和保存。上部含水岩系,岩性以粘土、泥岩和砂岩为主,地下水类型为孔隙水,多处于开启环境,不利于油气的聚集和保存。地下水动力条件与水化学成分(包括古代与现代)在同一岩系的纵向变化中是有规律的,而不同含水岩系之间是相对隔绝的。

2 区域水动力特征

2.1 古水动力条件

古水动力、古水化学和古地(水)温都属于古水文地质学的研究范畴,通过恢复含水岩系在不同地质历史时期存在的水文地质条件,以重建同地下水活动有密切联系的油气成藏规律,为油气勘探开发服务^[9-13]。

古水动力条件通常按照水文地质旋回的概念^[12-13]和水动力能量的来源,分为沉积水文地质和渗入水文地质 2 个阶段,前者主要形成沉积水压力系统,其压头主要是由上覆地层重量所引起的地静压力及其引起的异常孔隙压力所形成,表现为内循环压挤式水交替,即所谓的“离心流”;后者主要形成渗透水压系统,其压头主要是由大气降水和地表水向储集层渗入而形成的,即水静压力系统,以外循环渗入式水交替为特征,也称为“向心流”^[14-15]。

乌尔逊凹陷在地质历史发展过程中,白垩纪早期主要表现为构造下沉,湖水侵入接受沉积。该阶段的水为同生沉积水,其分布范围大体与同期沉积界限一致,油气的生成主要发育在该时期的沉积水文地质阶段,促使油气与沉积成因水从高压的凹陷中心向周边运动或穿层垂向运移。白垩纪末的燕山运动,使得凹陷隆起上升,发生剥蚀,进入渗入水文地质阶段,地下水从边缘向凹陷中心推进。其后的第三纪、第四纪时期,凹陷进入下一个水文地质旋回,其地下水动态与流动方向与上一个旋回基本相似。总之,本区白垩纪早期及其以后的古水动力

条件变化不大,即沉积成因水的离心流和渗入成因水的向心流长期处于同一个水动力体系内。古水文地质的这一特征,使得地下水的低势能—滞留区在时空上的分布比较稳定、集中,有利于油气聚集与保存。现以本区油气主要勘探目的层的中部含水岩系为例,讨论古动力条件与油气的关系。

从图 1 可以看出,沉积水动力场的基本特点为:南北水压系统分隔性显著,凹陷南部(乌南次凹)高压带集中分布在新乌 14、乌 17、海参 11 井所圈定的中心地带,向周边压力或折算水头有序地降低;乌中次凹北部有一高压区,使得地下水向乌南和乌北 2 个次凹运动;凹陷北部主要受乌中次凹北部高压区影响,水头呈现阶梯状降低。总体而言,折算水位从高压中心向周边呈递降变化,径流强度与水力坡度西部最大,北部和南部次之,而东部最小。从古水动力的角度来看,油气藏主要赋存在偏离高压区的沉积水动力与渗透水动力平衡带附近。



图 1 海拉尔盆地乌尔逊凹陷中部含水岩系沉积水动力场
Fig. 1 Hydrodynamic fields of water-bearing rock series in central Wuerxun Sag, Hailaer Basin

2.2 现代水动力条件

根据钻井实测地层压力,换算为钻井水位的上升高度(折算水位),编制地下水测压图,来反映地下水流动特征。

本区中部含水岩在凹陷东部和西部被隆起区域边缘断裂带所围限,自成为一个独立的沉积系统和水动力系统。赋存于砂岩、泥岩中的孔隙型地下水,在凹陷内外埋藏条件有所差异,自然构成了开启的水文地质系统。东部的巴彦山隆起带和西部的低山丘陵区成为中部含水岩系地下水的补给源,大气降水渗入后,沿地层倾斜方向,向凹陷内部运动,构成现代地下水的渗入循环系统。由于含水砂岩分布自凹陷边缘向中心部位由厚变薄,逐渐相变为泥岩,而终止了现代渗入成因水的分布范围,最终以越流形式发生内泄,或在凹陷内部与同期的沉积成因水相遇后,形成水动力平衡体系。结合水化学成分特征,在凹陷南部可分为3个水动力区(表1)。

3 区域水化学特征

3.1 矿化度

矿化度系指地下水中所含盐分的总量,所以它在时空上的变化规律与主要离子的浓度变化趋势一致^[14-18]。

乌尔逊凹陷主要储集层的地下水矿化度为902~41 000 mg/L,平均值为11 532 mg/L。中部含水岩系的矿化度虽然变化较大,但有一定规律可循,总体沿地下水流向有序增高。2种不同成分的地下水相遇时,压力平衡带或地下锋面内侧矿化度最高,因此,矿化度在水平剖面上呈正向抛物线状。这是因为在渗入成因水的供给区(凹陷边缘),主要接受含盐量较低的大气降水的补给;而沉积成因水的生成区(高压中心)的低值与古湖盆水体趋向碳酸盐类型的性质和压实排水的淡化作用有关。该参数在凹陷内的分布南北有别,凹陷南部高值点集中出现在巴彥塔拉地区乌尔逊河流域附近,向北或东逐渐降低,至乌126井(凹陷中心)附近出现最低值,再向北(或东)又增高,沿着地下水流向增高的现象比较突出,这是地下水在运动过程中溶解沉积物中组分、浓缩的结果。凹陷北部地区矿化度变化

比较复杂,存在着高值、低值分割混杂的现象。

2种不同成因地下水交汇的结果,使矿化度高值带沿着沉积(生油)中心分布,本区已探明富的油田或见油气的钻井,基本上都分布在矿化度相对较高的地区(图2)。

3.2 脱硫酸数

系指 rSO_4^{2-}/rCl^- ,由于油田水中 SO_4^{2-} 含量低,通常将其扩大100倍,再与 Cl^- 相比,即: $rSO_4^{2-} \times 100/rCl^-$ 。

在含油气盆地内,由于烃类直接与水中的硫酸



图2 海拉尔盆地乌尔逊凹陷中部含水岩系矿化度等值线
Fig.2 Salinity contour map of water-bearing rock series in central Wuerxun Sag, Hailaer Basin

表1 海拉尔盆地乌尔逊凹陷中部含水岩系现代水动力分区

Table 1 Modern hydrodynamic division of water-bearing rock series in central Wuerxun Sag, Hailaer Basin

分区	矿化度/(g·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(g·L ⁻¹)	Cl ⁻ /(g·L ⁻¹)	(K ⁺ +Na ⁺)/(g·L ⁻¹)	折算水位/m
供水区	0.45~0.15	0.1~0.5	<0.05	<0.2	2 700~2 500
径流区	0.45~0.75	0.07~0.50	0.05~1.00	0.2~0.4	2 500~2 300
泄水区	>0.75	<0.07	1.0~3.3	>0.4	<2 300

盐发生作用,导致 SO_4^{2-} 和 Cl^- 向相反的方向发展,脱硫系数是对 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的综合应用。该系数越小,表明地下水所处环境越有利于油气的聚集和保存。本区脱硫系数在平面上的分布,同矿化度一样有南北分区的特点。在凹陷南部有相对统一的区域变化,在以沉积成因水为主体、由乌 122、乌 126 井为中心组成的高压带,该比值增高(压实作用导致 Cl^- 含量降低)速率较快,向周边有序降低;在凹陷边缘,大气降水的渗入使该比值增高(Cl^- 增高的速度低于 SO_4^{2-}),向凹陷内部方向降低。其变化趋势与矿化度互为对称的消长关系。而在凹陷北部地区,该参数起伏变化甚大,高低相间,分隔性强,但也显示了随接近油气藏(井)变小的趋势。

3.3 有机组分

地下水含有丰富的有机物质,本文着重讨论苯酚及其同系物、脂肪酸及芳烃指数 3 个参数。盆地内地下水中的芳烃化合物,主要与石油中芳烃物质的溶解有关。本区芳烃指数(反映水中芳烃总量)低者不足 1,高者达 12.26,平均值为 3.03;苯酚及其同系物的含量在 0.02~2.57 mg/L 之间,平均值为 0.35 mg/L;脂肪酸的含量变化范围较大,最低为 23 mg/L,最高达 2 188 mg/L,平均值为 675 mg/L;中部含水岩系上述参数在平面上的分布有以下特点:

1) 凹陷南北含量差异较大,南部高值点集中连片分布,北部高值点多呈星点状出现。各参数的均值均是南部大于北部。

2) 凹陷南部有机组分随地下水运动呈有序分布,而凹陷北部分割性较强,含量高低起伏较大。

3) 有机组分的高含量在油田水中出现的几率远远高于深层非油田水。统计资料表明,统计油田水与非油田水的含量界限值(符合率以 75% 为准):苯酚及其同系物为 0.25 mg/L;脂肪酸为 540 mg/L;

芳烃指数为 3.32。

4) 结合地质物探资料分析,本区地下水中有有机物质的高含量与圈闭的封闭程度有关,封闭好的构造有机质含量高,反之亦然。

3.4 微量组分

含油气盆地的地下水含有多种微量元素,其在水中的富集同石油的形成、演化及围岩成分密切相关,两者同步消长现象明显,该指标是判别含油气性的间接指标。乌尔逊凹陷地下水中普遍含有 Li, Ni, Mn, Cu, Br, I, B, V, Cr, Sr, Co, Cs, Rb 等微量元素,现以 B 为例讨论之。B 的化合物(如硼酸钠等)易溶于水,其富集程度与地下水化学类型有关。本区 NaHCO_3 类型水有利于 B 的赋存,含量最高达 17.81 mg/L,平均值为 2.5 mg/L,在平面上的分布也有南北分区的特点。凹陷南部,高值点比较集中,分布在乌南次凹的西南方向,向西北至海参 11 井逐步降低,然后再升高;而凹陷北部高值点与低值点交叉分布,但在油气藏附近增高的趋势异常明显。Br, I 等元素与 B 的上述变化基本一致。实践证明,微量组分单个元素应用效果欠佳,多解性较多,按元素的化学性质分组应用,可为预测含油气性或含油气远景提供有用信息^[13]。另外对微量元素组合而言,绝对含量高低不是唯一应用评价标准,更重要的是要考虑其与区域背景值或临界值之间的关系,通常将超过区域背景值的高含量组合视为有效的水化学参数。本区油田水和非油田水中微量元素组合与含量有一定的差异。

综上所述,本区地下水化学成分比较复杂,含量差异较大,在水动力条件的控制下有南北分区的特点,在不同成因水交汇处的锋面附近,水化学成分趋向变质。油田水与深层非油田水相比,许多水化学参数有一定差异,油田水矿化度较高, $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$, $r\text{Na}/r\text{Cl}^-$ 等降低, Cl^- 含量增高速率加快,有机组分和微量元素含量增大(表 2)。

表 2 海拉尔盆地乌尔逊凹陷中部含水岩系油田水与深层非油田水化学成分平均值

Table 2 Average of water chemical composition between central oil-field water and deep non-oil-field water in Wuerxun Sag, Hailaer Basin mg/L

油田水				深层非油田水			
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	2 139.13	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	6.15	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	2 978.94	$r\text{Na}/r\text{Cl}$	5.07
Ca^{2+}	20	脱硫系数	135.23	Ca^{2+}	21.77	脱硫系数	101.39
Mg^{2+}	20.23	Br	1.66	Mg^{2+}	15.73	Br	1.89
Cl^-	648.19	B	2.26	Cl^-	959.78	B	2.95
SO_4^{2-}	511.07	脂肪酸	549.84	SO_4^{2-}	353.51	脂肪酸	699.45
CO_3^{2-}	6 308.24	芳烃指数	2.4	CO_3^{2-}	5 657.82	芳烃指数	4.46
矿化度	8 211.44	苯酚	0.33	矿化度	9 978.63	苯酚	0.44

4 含油气远景预测与评价

从水文地质观点出发,对区域含油气远景进行预测与评价,需要综合考虑水动力场和水化学场特征,选取有效参数,结合地质条件划分水文地质区带,不同水文地质区带含油气远景有一定差异。从表 3 可以看出,水文地质区带是地下水循环过程中水动力与水化学具有内在联系的统一体,是研究沉积盆地或凹陷内流体特征的重要环节,同油气的生成、聚集、保存有密切关系,油气主要聚集在水文阻(停)滞带内,为区域含油气性预测和评价提供了手段和依据。

上述 3 个水文地质区带在乌尔逊凹陷的分布,既有一定的统一性,又在各次凹内存在着独立或分隔性。如水文交替活跃—氧化带区域上主要分布在凹陷的东部和西部,而在各次凹内又存在局部变化;水文交替缓慢—弱还原带主要分布在各次凹的斜坡地带;而水文交替阻滞—还原带主要呈环带状或面状围绕生油中心分布。

根据水文地质特征,本区中部含水岩系有 3 个油气勘探有利区块(图 3):一是位于乌南次凹的西南部乌尔逊河一带,面积约 60 km²,属于水文交替

阻滞—还原区带,地下水矿化度高值区,为 Cl⁻—HCO₃⁻—Na⁺ 组合;有机组分中的苯酚及其同系物、脂肪酸、芳烃指数等为区域最高值,可溶气态烃的重组分所占比例高于区域平均值的 1.5 倍;氢、氧同位素密度值与本区油田水类似,水头高度在 1 900~1 200 m,水运动处于停滞状态。二是乌北次凹中部,面积约 25 km²,也属于水文交替阻滞—还原区带,水运动处于阻滞状态,水化学特征与前述类似。三是乌南次凹的东部,面积约 50 km²,属于水文交替缓慢—弱还原带,矿化度平均在 5.2 g/L,以 HCO₃⁻—Cl⁻—Na⁺ 组合为主,脱硫系数和 rNa⁺/rCl⁻ 比值处于中等,有机组分比较齐全,但丰度较前两区偏低,稍高于区域平均丰度,水头高度在 2 300~1 800 m,地下水处于缓慢的渗流状态。上述 3 个地区都处于 2 种不同程度地下水交汇区,是油气运移的指向区,在孔隙压力下降和水流方向突然改变的圈闭内,促使油气聚集成藏,它们是最有希望突破出油的主要地区。

5 结论

沉积盆地内地下水动力场、水化学场同油气藏相关,沉积成因水与渗入成因水形成的锋面是油气

表 3 海拉尔盆地乌尔逊凹陷水文地质区带与含油气盆地远景的关系
Table 3 Relationship between hydro-geological zone and hydrocarbon-bearing basin vision in Wuerxun Sag, Hailaer Basin

区带	交替活跃—氧化区带	交替缓慢—弱还原区带	交替阻滞—还原区带
水动力场	渗入成因水的向心流,水活动活跃,冲刷和交替作用强,水溶滤岩石的化学成分,分布在凹陷边部或淋滤区	沉积与渗入成因水的混合带,临近峰面外侧,水活动相对较弱,氧化与还原作用的交会处,水岩交换作用较弱,分布在凹陷的斜坡带	沉积成因水的离心流,位于峰面内侧,水流动缓慢,还原作用强,水与岩石(油气)成分处于平衡状态,分布在生油凹陷的周边地带
常量组分	以 HCO ₃ ⁻ —Ca ²⁺ —Na ⁺ 组合为主,矿化度低(1.5~4.5 g/L),脱硫系数 350~450, rNa ⁺ /rCl ⁻ 大于 1	Cl ⁻ 增加速率快,以 HCO ₃ ⁻ —Cl ⁻ —Na ⁺ 组合为主,矿化度为 4.5~7.5 g/L,脱硫系数(250~350)和 rNa ⁺ /rCl ⁻ (1 左右)开始降低	Cl ⁻ 突然增高,以 Cl ⁻ —HCO ₃ ⁻ —Na ⁺ 组合为主,矿化度增至本区最高值(大于 7.5 g/L),脱硫系数和 rNa ⁺ /rCl ⁻ 处于最低值,前者小于 250,后者小于 1
水化学场	有机组分	大部分含量低或不含,可溶气态烃以甲烷为主	组分增多,含量增高,可溶气态烃在以甲烷为背景的前提下,重烃组分增多
	微量组分	组分少,各单元元素含量低	组分增多,含量增高
氢氧同位素	同位素密度低,δD 和 δ ¹⁸ O 的变化值在 -90‰ 和 -12‰ 左右,临近大气降水曲线	δD 和 δ ¹⁸ O 的变化值在 -85‰ 和 10‰ 左右,偏离大气降水曲线右侧	δD 和 δ ¹⁸ O 的变化值在 -80‰ 和 10‰ 以下,偏离大气降水曲线右侧较远
地下水封闭程度	开启型	半封闭型	封闭型
石油地质特征	远离油源区,含油气地层埋藏浅或缺失,油气保存条件差	处于油气运移的指向地带(水平与垂直),离油源较近,圈闭相对发育,断裂较多,是油气聚集较有利地带,以稠油和天然气藏为主	邻近油气源区,油层埋藏较深,断裂活动减弱,圈闭发育,是油气成藏的有力场所,以原生油气藏为主

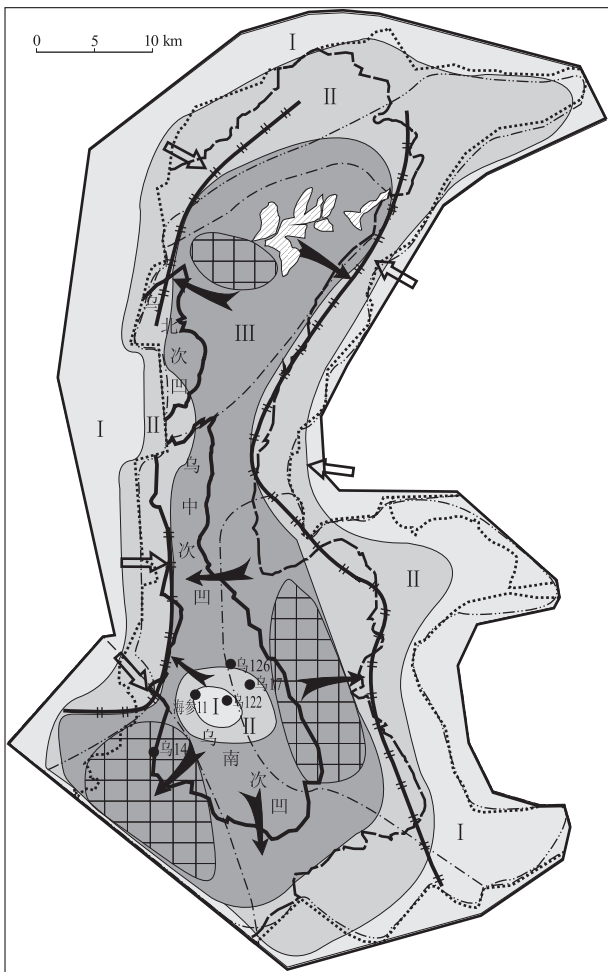


图 3 海拉尔盆地乌尔逊凹陷有利区块预测
 Fig. 3 Favorable hydrocarbon area forecast map of Wuerxun Sag, Hailaer Basin

聚集成藏的主要场所,水化学成分演变特征印证了油气的存在。水文地质条件研究可为含油气远景预测与评价提供依据,水文地质区带控制着油气田的分布规律,水文交替阻滞—还原区带是油气勘探的主要地区。乌尔逊凹陷具有良好的油气勘探远景,水文地质研究成果为乌南次凹突破出油关提供了可信的依据。

致谢:本文是在中国石油化工股份有限公司石

油勘探开发研究院化探研究所刘崇禧教授的指导下完成的,在此表示诚挚的谢意!

参考文献:

[1] 地矿部水文地质工程地质研究所. 油田水文地质与水文地球化学[M]. 北京:科学出版社,1987;3-108.

[2] 刘方槐,颜婉荪. 油田水文地质原理[M]. 北京:石油工业出版社,1991;2-97.

[3] 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.

[4] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3版. 北京:石油工业出版社,2004;227-234.

[5] 赵克斌,刘崇禧,李伟. 含油气盆地水文地球化学规律[J]. 石油实验地质,2008,30(2):154-161.

[6] 李伟,赵克斌,刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究[M]. 北京:地质出版社,2008;17-22.

[7] 刘新颖,邓宏文,邸永香,等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷南屯组优质烃源岩发育特征[J]. 石油实验地质,2009,31(1):68-73.

[8] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等. 海拉尔盆地乌尔逊及贝尔凹陷烃源岩有机质丰度的恢复[J]. 石油实验地质,2008,30(1):82-85.

[9] 巴斯科夫 E A. 成矿规律研究中的古水文地质分析[M]. 沈照理,译. 北京:科学出版社,2008;30-108.

[10] 王建荣,张达景,赵文智,等. 吐—哈盆地古水动力条件与油气聚集规律[J]. 石油与天然气地质,1997,18(1):28-33.

[11] 李继宏,李荣西,韩天佑,等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区地层水与油气成藏关系研究[J]. 石油实验地质,2009,31(3):253-257.

[12] 李国林. 水文地质旋回在临清地区油气勘探中的应用[J]. 油气地质与采收率,2009,16(6):53-55.

[13] 刘崇禧. 刘崇禧论文选[M]. 北京:地质出版社,2008;99-103.

[14] 许洪东,王朋岩,金曙光. 松辽盆地西斜坡水动力场演化特征与油气聚集[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(6):13-15.

[15] 楼章华,李梅,金爱民,等. 松辽盆地油田水化学的垂直分带性[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):195-202.

[16] 朱玉双,王小军,李莉,等. 准噶尔盆地彩南油田流体性质变化特征及其意义[J]. 石油实验地质,2009,31(4):329-332.

[17] 周晓芬. 塔里木盆地北部油田水特征离子及意义[J]. 石油与天然气地质,2000,21(4):372-374.

[18] 袁政文,全书进,乔桂林. 焉耆盆地油田水与油气藏的关系[J]. 石油与天然气地质,2002,23(4):406-409.

[19] 张毅,夏斌,姜兰兰. 泌阳凹陷油田水化学特征及水—岩相互作用[J]. 油气地质与采收率,2009,16(3):44-47.

(编辑 韩 或)