

东濮凹陷胡状集—庆祖集油田地层水特征及其石油地质意义

计曙东¹, 王学军², 刘玉华³, 李西爱², 吕兰芳²

(1.中国石化华北油田分公司 油田开发处,河南 郑州 450000; 2.中国石化中原油田分公司 勘探开发科学研究院,河南 濮阳 457001; 3.中国石化中原石油勘探局 地球物理测井公司,河南 濮阳 457001)

摘要: 地层水动力场的形成、演化与油气的运移、聚集具有十分密切的关系,水文地质旋回的不同阶段对油气运移的影响也存在差异。东濮凹陷胡状集—庆祖集油田地层水分析结果表明,地层水主要为高矿化度的CaCl₂型水,地层水化学组分中Cl⁻和Na⁺占绝对优势,对地层水化学空间分布具有控制作用,其形成与东濮凹陷盐湖沉积环境有关;受水岩作用影响,Ca²⁺,Mg²⁺,CO₃²⁻和SO₄²⁻等消耗性离子与矿化度的相关性不明显。研究区可划分出古近纪和新近纪—第四纪2个地层水动力演化旋回,其中前者可进一步划分为盆地沉降期泥岩压实水离心流阶段和盆地抬升期大气水下渗向心流阶段。压实水离心流动力对东濮凹陷西部斜坡带的油气运聚具有建设作用,大气水下渗向心流动力对油藏具有破坏作用;2种水动力环境交汇区,即二台阶是研究区油气成藏的有利区;新近纪—第四纪,一台阶为滞流水动力环境,可形成“自生自储”型油气藏。

关键词: 地层水 矿化度 动力演化 油气运聚 胡状集—庆祖集油田 东濮凹陷

中图分类号: TE124.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0043-05

在含油气沉积盆地的形成演化过程中,地层水是油气生成、运移、聚集的动力和载体^[1],地层水文地球化学特征对油气的聚集、分布具有重要的指示作用^[2]。油田地层水的地球化学特征与油气运聚成藏关系研究受到许多地质工作者的重视^[3-11]。笔者对东濮凹陷胡状集—庆祖集油田大量的地层水分析结果进行统计,结合近年来的油气勘探成果,探讨了油田地层水化学特征与油气运聚的关系,以期为研究区的油气运聚规律研究提供借鉴。

1 区域地质概况

东濮凹陷是在中、古生界基底上发育起来的新生代裂陷盆地,其发育过程经历了古近纪裂陷发育阶段和新近纪—第四纪拗陷发育阶段^[12];自下而上沉积了古近系沙河街组和东营组、新近系馆陶组和明化镇组以及第四系平原组,沙河街组是主要的勘探目的层系。胡状集—庆祖集油田位于东濮凹陷西部斜坡带中部,西邻内黄隆起,东邻海通集洼陷,南、北分别与高平集、马寨构造相接,勘探面积约为

200 km²;探明石油地质储量占西部斜坡带总探明石油地质储量的50%以上。其沙河街组不同层段均有油气藏发现,但油气富集程度差异较大,95%以上的石油及天然气探明地质储量分布于沙三段。研究区自西向东发育五星集、石家集和长垣共3组北北东向正断层,倾向为东南向,形成断阶式构造;长垣断层下降盘为一台阶,长垣断层与石家集断层之间为二台阶,是胡状集—庆祖集油田的油气富集区,石家集断层与五星集断层之间为三台阶^[13]。受东营组沉积时期构造抬升运动的影响,研究区古近系受到不同程度的剥蚀,不同台阶地层保存状况差异较大;一台阶古近系保存较全,仅东营组上部受到轻微剥蚀;二台阶古近系遭受剥蚀,受古隆起控制,在其顶部出露沙三段中亚段,向南、北两端依次出露沙三段上亚段、沙二段和沙一段;三台阶古近系仅残留沙四段和沙三段下亚段。

西部斜坡带东侧的海通集洼陷是东濮凹陷第2大生油洼陷,沙四段上亚段和沙三段的暗色泥(页)岩、油页岩和灰质、白云质页岩具备良好的生油条件,并在东营组沉积时期达到生油高峰^[14],是西部

收稿日期:2013-07-09。

作者简介:计曙东,男,工程师,从事油田开发工作。联系电话:15083252813,E-mail:bjsy_wxj@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“东濮凹陷油气富集规律与增储领域”(2011ZX05006-004-1)。

斜坡带的主要油源区。受盆地西部物源的控制,西部斜坡带发育多个辫状河三角洲,胡状集—庆祖集油田为辫状河三角洲前缘沉积;储层岩性细,以粉砂岩为主,砂岩厚度较薄,厚度小于4 m的砂岩占95%以上;储层物性差,孔隙度为10%~30%,平均为18.83%,渗透率多小于 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $283.85 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,且孔隙度和渗透率均随埋深增加而逐渐减小。沙三段储层处于晚成岩阶段A期,以石英加大和白云石、含铁白云石胶结为特征,碳酸盐胶结物含量高,平均为9.95%,对储层物性产生重要的影响。整体上,靠近西部物源区,砂岩粒度变粗,厚度增大,储层物性变好。断层活动时期和生烃期次的匹配关系与油气运聚和分布具有非常密切的关系。长垣断层活动时期与海通集洼陷沙三段烃源岩大量生烃时期一致,该断层为油气运移的主要通道,将洼陷生成的油气向构造高部位输导;石家集断层在烃源岩生烃时期(东营组沉积时期)已停止活动,主要起封堵作用,使二台阶成为油气的主要富集区^[15]。

2 地层水化学特征

2.1 矿化度特征

地层水分为溶滤—渗入水、沉积—埋藏水和内生水,多数油田水属于与沉积物同时埋藏并保存下来的沉积水;沉积时水体的原始矿化度控制了地层水矿化度分布的整体格局^[16],在与周围介质接触的过程中经历了地球化学作用,从而改变或形成其化学组分。在一般情况下,保存条件较好的地层水的矿化度较高,反之则低。封闭能力强的盖层和断层可有效地阻止地层水的自由交替,地层水在储层内的渗滤浓缩过程中矿化度会逐渐增加,而沿断层快速流动过程中以断层越流淡化运移为特征,矿化度会降低^①;后期构造作用形成的地层剥蚀和断层也可为地表水向下渗流提供通道^[17],进而降低地层水的矿化度;因此,可以利用地层水的矿化度粗略判断油气的保存条件^[18]。

通过胡状集—庆祖集油田近200个地层水常规离子分析化验数据统计表明,沙三段地层水矿化度的变化范围较大,为6 766~342 048 mg/L,平均为157 698 mg/L,地层水的高矿化度特征反映出沙三段沉积时期可能为咸化湖盆沉积环境。研究区沙三段地层水矿化度在平面上的分布呈规律性变化。沙三段下亚段地层水分析数据主要集中于二台阶,矿化度高值区分布于二台阶高部位,与油气

藏发育位置一致,如胡5、胡7和胡12块等油气富集区块均为矿化度高值区(图1a);长垣断裂带胡68井区为地层水矿化度低值区,向二台阶地层水矿化度增大,一台阶无地层水分析数据。长垣断裂带内的胡44—胡68—胡82—胡71—胡74井一带为沙三段中亚段地层水矿化度低值区,向西至二台阶地层水矿化度逐渐增大,长垣断裂带东侧的胡86—胡83井一带为地层水矿化度高值区(图1b)。整体上沙三段下亚段地层水矿化度与沙三段中亚段的分布规律相似。研究区沙三段地层水矿化度的平面分布特征表明,石家集断层的封堵性强、保存条件好,地

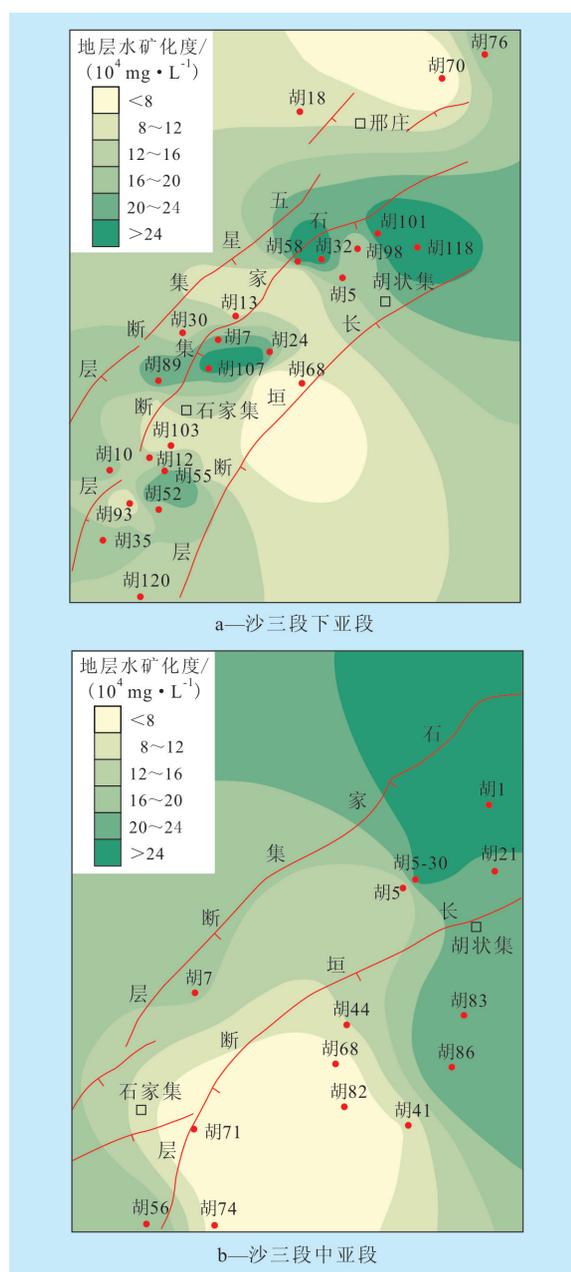


图1 胡状集—庆祖集油田地层水矿化度平面分布

①楼章华.东濮凹陷南部古近系油气成藏机理及分布规律.浙江大学,2010.

层水沿储层向高部位运移过程中发生渗滤浓缩作用,矿化度不断增大;长垣断裂带内地层水矿化度较低,可能是海通集洼陷内的地质流体沿断层运移过程中发生了断层越流淡化作用,也可能是地表水的淡化淋滤作用。

2.2 常规组分特征

研究区沙三段地层水pH值为6~7,呈弱酸性,多属于大陆型的CaCl₂型水,以及少量NaHCO₃,MgCl₂和Na₂SO₄型水,其中NaHCO₃,MgCl₂和Na₂SO₄型水分别占3%,2.3%和1.5%。依据陆相油田水分类标准,胡状集—庆祖集油田地层水的Cl⁻含量高,主要成因可能与原始沉积有关。常规离子检测结果表明,阳离子含量由高到低为Na⁺,Ca²⁺和Mg²⁺,其平均含量分别为51 826.5,7 541和1 063.3 mg/L;阴离子含量由高到低为Cl⁻,SO₄²⁻和HCO₃⁻,其平均含量分别为97 315.2,2 000.7和421.7 mg/L。

2.3 化学组分分析

胡状集—庆祖集油田的地层水主要由Cl⁻和Na⁺组成,二者矿化度之和约占总矿化度的94.6%;其中Cl⁻矿化度约占阴离子矿化度的97.6%,Na⁺矿化度约占阳离子矿化度的85.8%;且Cl⁻和Na⁺与地层水矿化度均具有较好的线性关系(图2),对地层水矿化度具有绝对的控制作用,而其他离子含量较低,且与矿化度的相关性较差。研究区地层水中,Cl⁻主要来自盐类物质的溶解及母源物质的风化溶滤作用,由于其一般不易被植物及细菌所摄取,也不被粘土矿物吸附,因此具有溶解度大、不易沉淀析出、受氧化还原作用影响较小等特征,是地层水最稳定的离子^[7]。东濮凹陷古近系沙三段下亚段、中亚段的下部和上部、沙一段发育4套盐膏层,盐岩、膏岩、碳酸盐岩和页岩在垂向上具有明显的沉积序列^[19],盆地内广泛发育的盐类沉积可能是地层水中Cl⁻富集的主要因素。中国东部盆地地层水普遍富集Na⁺^[17,20],在成岩演化过程中,Na⁺很少参与成岩作用过程,且

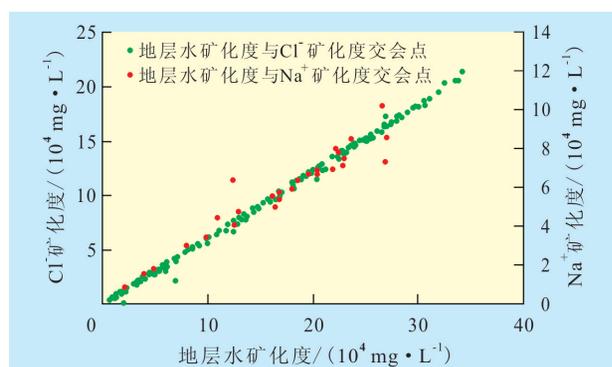


图2 胡状集—庆祖集油田地层水矿化度与各离子含量的关系

长石的溶解作用会增加孔隙水中Na⁺的含量;随着地层水的浓缩和Ca²⁺的不断消耗,阳离子的交换吸附作用发生了逆转(长石的钠长石化)和自生微晶钠长石的沉淀,消耗部分Na⁺,Na⁺含量随地层水矿化度增加而增大的幅度变缓。Ca²⁺和Mg²⁺均为消耗型离子,在研究区地层水中含量较低,且随地层水矿化度的增加而缓慢增大;主要原因为成岩过程中自生方解石和自生硬石膏的形成消耗了大量的Ca²⁺,白云石化和自生绿泥石的形成消耗了Mg²⁺。SO₄²⁻含量一方面受孔隙水来源的影响,出现与Cl⁻相似的变化规律;另一方面受脱硫作用和硬石膏、重晶石等自生矿物沉淀的影响,导致SO₄²⁻与地层水矿化度之间的关系不明显。HCO₃⁻与地层水矿化度的相关性较差,长垣断裂带和二台阶高部位个别样品HCO₃⁻含量较高,可能与地表溶入的CO₂水解有关。

2.4 化学参数特征

变质系数反映地层水的变质程度,是间接反映地层封闭性的水文地球化学参数。正常海水的变质系数约为0.85,岩盐层溶滤形成的地层水的变质系数约为1,受大气降水淋滤作用影响的地层水质数大于1^①。胡状集—庆祖集油田沙三段地层水的变质系数为0.09~1.27,平均为0.8,反映地层封闭性较好;其中,一台阶地层封闭性最好,二台阶地层封闭性变化较大,长垣断裂带封闭条件较差(表1)。变质系数大于1的数据点均分布在长垣断裂带附近和二台阶构造高部位,表明这2个地区可能受到大气降水的淋滤作用影响。

脱硫系数是地层水环境氧化还原程度的重要指标。脱硫系数越小,表明还原程度越强,地层封闭性越好,越有利于油气保存。胡状集—庆祖集油田沙三段地层水的脱硫系数为0~5.73,平均为0.803(表1),表明地层封闭性较好,有利于油气保存。研究区脱硫系数高值区同样分布于长垣断裂带和二台阶构造高部位。

盐化系数主要反映地层水的浓缩演化程度。在离心流方向上,由于Cl⁻的渗滤浓缩,CO₃²⁻与Ca²⁺结合沉淀形成自生方解石,降低了CO₃²⁻和HCO₃⁻含量,导致盐化系数增大。在大气水下渗向心流区,盐化系数与大气水的下渗强度成反比。在越流浓缩区,Cl⁻含量不断增加,而CO₃²⁻和HCO₃⁻含量由于方解石等自生矿物的沉淀而增加缓慢,导致地层水盐化,盐化系数增加,蒸发浓缩作用导致高矿化度、

①楼章华.东濮凹陷南部古近系油气成藏机理及分布规律.浙江大学,2010.

表1 胡状集—庆祖集油田沙三段地层水化学参数统计

构造单元	样品数/个	变质系数		脱硫系数		盐化系数	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
一台阶	9	0.67~0.91	0.79	0.52~1.29	0.67		
二台阶	38	0.09~1.27	0.78	0~5.73	0.91	46.49~3 105.19	770.52
长垣断裂带	9	0.78~1.05	0.91	0.058~3.37	0.83	21.01~896.04	250.05

高盐化的地层水化学特征。因此,在离心流、向心流的流动方向上,盐化系数增大,在越流和蒸发泄水区形成盐化系数的高值区。胡状集—庆祖集油田沙三段地层水盐化系数为21.01~3 105.19(表1),平均为510.29,高值区分布在二台阶构造高部位,可能为越流和蒸发泄水所形成。

3 地层水动力演化

根据含油气盆地地层水的能量、流动、压力及水势面特征等将盆地按地层水动力环境划分为压实流盆地、重力流盆地和滞流盆地3种类型^[21]。地层水动力场在沉积盆地的初始阶段往往是压实流盆地,大气水下渗向心流影响范围小、时间短。构造抬升剥蚀作用导致大气水下渗向心流的影响程度增加、范围扩大,泥岩压实水离心流范围缩小、消失,形成重力流盆地。盆地不同部位具有多种水动力环境,形成具有过渡性特征的叠合盆地,即压实流—重力流叠合盆地和重力流—滞流叠合盆地。

古近纪裂陷期,东濮凹陷经历了完整的裂陷盆地发展阶段,包括沙四段沉积时期的初始裂陷期、沙三段沉积时期的主裂陷期、沙二段—沙一段沉积时期的继承发展期和东营组沉积时期的裂陷消退期,东营组沉积末期整体抬升并遭受剥蚀。在新近纪—第四纪,东濮凹陷与整个渤海湾地区同步发生区域性拗陷,盆地内部断块的差异升降运动基本停止^[22]。因此,根据盆地的构造演化过程可将东濮凹陷划分为古近纪和新近纪—第四纪2个地层水动力演化旋回,其中,前者可进一步划分为盆地沉降期和盆地抬升期大气水下渗向心流阶段。盆地沉降期,东濮凹陷西部斜坡带东侧的海通集洼陷持续沉降,沙三段烃源岩在东营组沉积时期开始大量生烃^[14],由于泥岩压实作用和生烃作用,沉积埋藏水、成岩水和烃类流体被大量挤出,经长垣断裂带进入二台阶形成泥岩压实水离心流,而大气水下渗向心流影响范围较小,可能仅至三台阶;盆地抬升期,压实作用减弱甚至停止,地层水的流动主要受重力控制,二台阶高部位和长垣断

裂带均可能受到大气水下渗向心流的影响(图3)。在新近纪—第四纪,东濮凹陷西部地区断裂活动减弱,海通集洼陷过补偿沉积,压实水流和二次生烃形成的地层流体难以通过长垣断层运移,在一台阶形成滞流,二台阶和三台阶形成大气水下渗向心流。

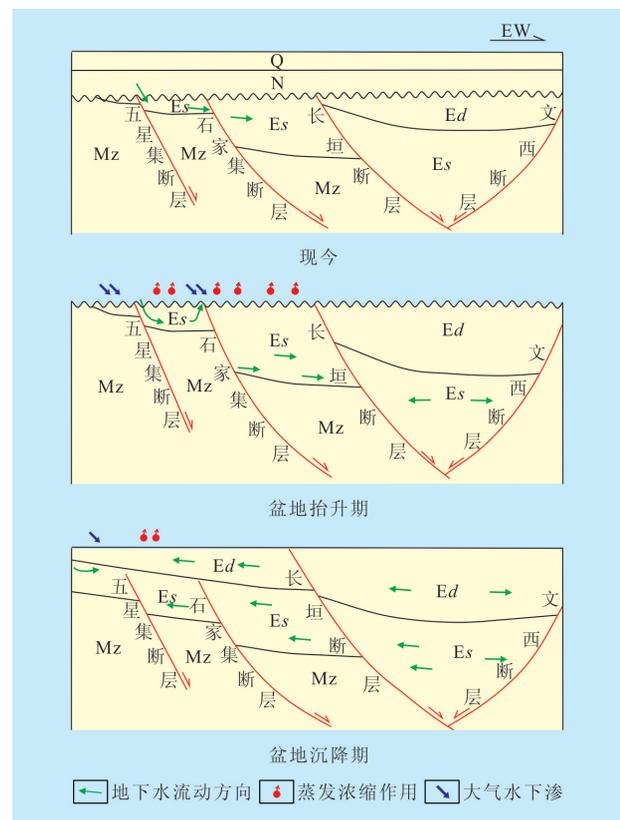


图3 东濮凹陷西部斜坡带地层水动力演化模式

4 地层水动力对油气运聚的影响

盆地内不同的地层水动力演化阶段对油气运聚具有不同的影响。古近纪盆地沉降期泥岩压实水离心流阶段,油气随地层水以离心流状态从海通集洼陷经长垣断裂带向胡状集—庆祖集油田运移,主要存在沿断裂垂向运移和储层侧向运移2种形式,在油气二次运移过程中,若与有利圈闭相匹配,即可聚集成藏。在沿储层侧向运移过程中,地层水受到越流—压滤浓缩作用,矿化度逐渐增加;流体

沿断裂垂向运移过程中,地层水受到断裂带越流淡化作用,矿化度变化较小。受长垣断层活动和异常流体压力作用影响,海通集洼陷带内流体沿断层快速上涌,越流浓缩程度小,表现为靠近长垣断裂带的油藏地层水矿化度较低(图1);地层流体经长垣断裂带进入储层后开始侧向运移,在运移过程中不断越流浓缩,形成矿化度、Cl⁻含量高值区,压实水流与重力水流交汇地带,即二台阶成为油气聚集的有利地区。盆地抬升期大气水下渗向心流阶段,西部斜坡带的重力水流对泥岩压实水离心流阶段形成的油气藏进行改造和调整,使二台阶高部位和三台阶发育的油藏受到水洗、氧化甚至破坏;长垣断裂带内油藏可能也受到大气水下渗淡化淋滤作用影响。新近纪—第四纪,东濮凹陷西部地区断裂活动减弱,海通集洼陷地层水进入滞留阶段,生成的油气在一台阶聚集形成“自生自储”型油气藏。

5 结束语

东濮凹陷西部斜坡带胡状集—庆祖集油田地层水矿化度高,水型为CaCl₂型,化学组分主要由Cl⁻和Na⁺组成,其在阴、阳离子含量中均占绝对优势,控制了地层水矿化度的形成与分布。东濮凹陷盐湖沉积环境的形成及后期成岩作用消耗Ca²⁺,Mg²⁺,CO₃²⁻和SO₄²⁻,可能是形成现今地层水化学组分特征的主要原因。

研究区划分为古近纪和新近纪—第四纪2个地层水动力演化旋回,前者可进一步划分为盆地沉降期泥岩压实水离心流阶段和盆地抬升期大气水下渗向心流阶段。盆地沉降期,西部斜坡带为泥岩压实水离心流水动力环境,三台阶局部可能有大气水下渗向心流;盆地抬升期,压实水离心流水动力作用停止,大气水下渗向心流的影响范围增大,对二台阶油藏进行改造和调整。新近纪—第四纪,一台阶为滞流水动力环境。古近纪盆地沉降期泥岩压实水离心流导致油气经长垣断裂带大规模向二台阶运移,由于石家集断层的有效封堵,油气不断在二台阶圈闭中聚集,地层水在越流—压滤浓缩作用下矿化度增加,现今的油藏分布与地层水矿化度高值区相吻合。今后应进一步研究地层水动力场分布与油气成藏及保存的关系,分析地层水中氢和氧同位素的组成,综合判别地层水的成因以及不同水型的地层水所代表的环境。

参考文献:

- [1] 汪蕴璞,林锦璇,汪林.论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分——以东海西湖凹陷为例[J].地球科学——中国地质大学学报,1995,20(4):393-398.
- [2] 刘崇禧.水化学找油的理论与应用效果[J].地球化学,1989,18(2):175-180.
- [3] 王学军,苏惠,曾溅辉,等.东濮凹陷西部斜坡带长垣断层封闭性及其输导模式[J].油气地质与采收率,2012,19(4):5-9.
- [4] 王威,胡晓凤,宋焕荣,等.江汉平原震旦系储层古水动力场演化及其与油气运聚的关系[J].油气地质与采收率,2009,16(6):24-29.
- [5] 楼章华,金爱民,李华明,等.吐鲁番坳陷侏罗系地下水动力与油气成藏[J].石油与天然气地质,2008,29(4):471-479.
- [6] 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):53-56.
- [7] 薛会,张金川,王毅,等.塔里木盆地塔中低凸起地层水与油气关系[J].石油实验地质,2007,29(6):593-597.
- [8] 郭望,陈践发,曹青,等.油气藏中气态地层水的存在及其意义[J].油气地质与采收率,2013,20(1):36-39,43.
- [9] 李晓燕.东营凹陷地层水成因类型及其与油气运移方向的关系[J].油气地质与采收率,2012,19(3):18-21.
- [10] 张守鹏,张林晔,王伟庆,等.含油气盆地地层水演化过程中含烃酸性流体的浸入效应——以东营凹陷胜坨油田为例[J].油气地质与采收率,2011,18(4):10-12,20.
- [11] 银燕.东营凹陷地层水水化学纵向分带性与成岩耗水系统划分[J].油气地质与采收率,2011,18(3):32-35.
- [12] 陈书平,漆家福,王德仁,等.东濮凹陷断裂系统及变换构造[J].石油学报,2007,28(1):43-49.
- [13] 曾溅辉.台北凹陷地下水动力特征及其对油气运移和聚集的影响[J].沉积学报,2000,18(2):273-278.
- [14] 苏惠,朱述坤,张金川,等.东濮凹陷晚期洼陷成藏系统的油气勘探[J].断块油气田,2005,12(5):13-17.
- [15] 韩小琴,王立志,何锋,等.东濮凹陷胡—庆断阶带油气成藏条件及潜力分析[J].河南石油,2003,17(4):10-13.
- [16] 陈恭洋.潜江凹陷南部地层水化学特征与油气成藏的关系[J].江汉石油学院学报,2003,25(3):15-17.
- [17] 严金泉,胡晓凤.江汉盆地三叠统—石炭系水文地质条件及对油气保存条件的影响[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(2):42-44.
- [18] 贾倩,赵彦超,方度,等.伊通盆地岔路河断陷地层水化学特征与油气保存关系[J].地质科技情报,2008,27(2):63-67.
- [19] 苏惠,许化政,张金川,等.东濮凹陷沙三段盐岩成因[J].石油勘探与开发,2006,33(5):600-605.
- [20] 李亚辉.高邮凹陷古水动力场及其与油气运聚的关系[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(3):12-16.
- [21] 楼章华,金爱民,田炜,等.论陆相含油气沉积盆地地下水动力场与油气运移、聚集[J].地质科学,2005,40(3):305-318.
- [22] 张克鑫,漆家福,赵衍彬,等.新生代东濮凹陷构造特征及其演化[J].新疆石油地质,2007,28(6):714-717.