

库车坳陷东部阿合组地层水化学特征及其油气响应

张海祖¹, 徐同^{2,3}, 谢亚妮¹, 张慧芳¹, 凡闪¹, 陈常超¹, 朱传庆^{2,3}

(1. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 【研究目的】地层水作为油气运移的载体, 对油气成藏具有重要意义。塔里木盆地库车坳陷东部侏罗系阿合组油气藏的油水分布关系复杂, 地层水特征及其与油气藏的关系缺少系统研究。【研究方法】为了明确地层水化学特征及其与油气藏之间的关系, 在对地层水样品进行筛选的基础上, 对库车东部阿合组的地层水测试数据进行分析, 研究地层水的水型、矿化度、离子比例系数的分布特征及其油气意义。【研究方法】研究结果表明: 阿合组的地层水主要为 NaHCO₃ 型, 其次为 CaCl₂ 型和 MgCl₂ 型, 矿化度相对较低。地层水的矿化度、离子比例系数具有受构造控制的特点: 在构造的开启区、地层的尖灭区, 地层水主要为低矿化度的 NaHCO₃ 型, 钠氯系数、脱硫酸系数较高且变质系数为负值, 而封闭性的地层中地层水具有相反的化学特征。【结论】地层水化学特征与油水层的平面分布特征有较好的耦合关系, 以迪北油气藏为例, 依奇克里克断裂以北虽经历过油气的充注, 但已经生成的油气沿着断裂逸散, 低矿化度、高钠氯系数、高脱硫酸系数、低变质系数及高高岭石含量可以看出地层受到了沿断裂进入地层的大气降水的影响; 而断裂以南相反的地层水化学特征及高岭石含量反映地层封闭性较好, 受大气降水影响小, 对应了气藏的分布。地层水的化学特征与油气藏的分布关系为后续致密油气藏的勘探开发和评价提供了一定依据。

关键词: 地层水; 离子比例系数; 油水分布; 油气勘查工程; 库车东部; 塔里木盆地; 新疆

Hydrochemical characteristics of Ahe Formation in eastern Kuqa depression, and its hydrocarbon response

ZHANG Haizu¹, XU Tong^{2,3}, XIE Yani¹, ZHANG Huifang¹, FAN Shan¹, CHEN Changchao¹, HU Chuanqing^{2,3}

(1. *Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

Abstract: 【Objective】As the carrier during the oil and gas migration, formation water plays an important role in oil and gas accumulation. The oil-water distribution of the Jurassic Ahe Formation (J1a) oil and gas reservoirs in the eastern Kuqa Depression of the Tarim Basin is complicated, and the characteristics of formation water and its relationship with oil and gas reservoirs are lack of systematic study. 【Methods】In order to clarify the chemical characteristics of formation water and its relationship with reservoirs, based on the selection among formation water samples, the test data of Ahe Formation in eastern Kuqa Depression are obtained to study the distribution of water type, TDS and ion-proportionality coefficients of formation water and its significance to reservoirs.

【Results】The results show that the formation water of J1a is mainly NaHCO₃ type, followed by CaCl₂ and MgCl₂ type, and has relatively low salinity. The TDS and ion-proportionality coefficients of formation water are controlled by tectonics. In the structure opening area and the pinch-out area of the strata, the formation water is characterized by NaHCO₃ type with low TDS, the sodium-chloride coefficient and desulfurization coefficient are high and the metamorphic coefficient is negative. Nevertheless, the formation water in the closed strata has the opposite hydrochemical feature. 【Conclusion】There is a good coupling relation between the hydrochemical characteristics of formation water and the plane distribution of oil and water, with Dibeil oilfield as an example, although the strata north of the Yiqikelike fault had been charged, the generated oil and gas had escaped along the fault. The low TDS, high sodium-chloride coefficient, high desulfurization coefficient, low metamorphic coefficient and high kaolinite content indicate that the strata was affected by the meteoric water that entered along

作者简介: 张海祖, 男, 1976, 博士, 高级工程师, 石油地质。Email: zhanghz-tlm@petrochina.com.cn。

通讯作者: 徐同, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程。Email: 1113822424@qq.com。

the fault. On the contrary, the hydrochemical characteristics and kaolinite content in the strata south of the fault reflect that the formation was well sealed and less affected by meteoric water, which corresponds to the distribution of gas layers. The connection between the hydrochemical characteristics and the distribution of reservoirs provides a basis for subsequent exploration, development and evaluation of tight oil and gas reservoirs.

Key words: formation water; ionic ratio coefficients; oil-water distribution; oil-gas exploration engineering; eastern Kuqa Depression; Tarim Basin

About the first author: ZHANG Haizu, male, born in 1976, Ph.D., senior engineer, major in petroleum geology; Email: zhanghz-tlm@petrochina.com.cn.

About the corresponding author: XU Tong, male, born in 1997, master student, major in geological resources and geological engineering; Email: 1113822424@qq.com.

1 前言

地层水作为含油气盆地中流体的重要组成部分,是油气运聚成藏的动力和载体,与油、气、储层矿物之间存在复杂的物理化学作用及物质成分的交流(Davission et al.1994; Hanor, 1994)。地层水的水型、矿化度及离子比例系数等参数可以用来反映地层水的来源、地下水动力环境、水岩相互作用的强度等,进而对油气成藏有一定的指示意义(曾溅辉等, 2021)。

国内学者对地层水化学特征及其与油气藏的关系进行了大量的研究,主要集中在我国一些典型的盆地和坳陷内,如鄂尔多斯盆地(窦伟坦等, 2010; 王晓梅等, 2012)、塔里木盆地(Chen et al., 2018; 曾溅辉等, 2008; Li et al.2017)、四川盆地(Li et al., 2009; 雍自权等, 2006)、东营凹陷(钱诗友等, 2009; 孙向阳等, 2001; Zhang et al., 2012)等,对地层水化学特征、成因演化及其与油气藏之间的关系进行了大量分析,普遍存在着地层水高矿化度、低钠氯系数、高变质系数及低脱硫酸系数对应着油气藏分布这一特征规律。

塔里木盆地是我国最大的沉积盆地,蕴含丰富的油气资源。不同学者对从沉积、构造、成藏等方面对塔里木盆地进行了大量的研究并取得了丰富的成果,但是对于地层水的研究则相对较少,主要集中在塔中、塔北地区(Cai et al., 2008; Chen et al., 2013),而对库车地区的地层水研究较少。库车坳陷是盆地内重要的天然气产区,近年来在库车东部钻探的 YN2、DX1 井等获得了高产油气流,拓宽了致密气的勘探领域,使得侏罗系地层成为“西气东输”的储备层系(刘立炜等, 2016; 张荣虎等, 2019)。但是由于库车东部构造复杂,气水分布关系不清晰,储层物性在平面上差异性大、成藏控制因素不明确等因素,导致优质储层展布规律不清(王珂等, 2020; 张妮妮等, 2015),在后续勘探开发中出现了 YS4、YN4、MN1 井等失利井。本文通过收集库车东部阿合组地层水分析化验数据,对地层水化学特征进行分析,明确了地层水成因演化的主控因素,并与油气藏的结合,从地层水化学特征方面分析失利井的原因,为后续致密油气的勘探开发提供一定的指示意义。

2 研究区概况

库车坳陷位于塔里木盆地的北部,北依天山南麓,南邻塔北隆起,在平面上呈 NEE-SWW 向展布,面积约为 $3.7 \times 10^4 \text{km}^2$,是我国重要的油气勘探开发资源区,蕴藏丰富的天然气和

凝析油资源(梁狄刚等, 2002)。可进一步划分为克拉苏构造带、依奇克里克构造带、秋里塔格构造带、乌什凹陷、拜城凹陷、阳霞凹陷、北部单斜带及南部斜坡带(图 1a)。库车坳陷是一个以中、新生代沉积为主的复合前陆盆地, 受多期构造运动的影响(王伟峰等, 2018; Qin et al., 2021), 其形成演化过程可以大致划分为晚二叠纪—三叠纪的南北向挤压阶段、侏罗纪—古近纪的伸展坳陷阶段以及新近纪以来的再生前陆盆地阶段(何登发等, 2009)。复杂的构造运动使得库车坳陷具有“东西分带, 南北分段, 上下分层”的特点。

本次研究区位于库车坳陷东部的依奇克里克构造带, 在东西向可划分为迪北段和吐格尔明段, 南北向发育有依奇克里克构造带、迪北斜坡带及吐格尔明隆起带(图 1b)。钻井结果显示地层层序正常, 自上而下分别为古生界石炭系, 中生界三叠系、侏罗系、白垩系(缺失下白垩统巴什基奇克组、巴西改组)和新生界古近系、新近系(缺失库车组)、第四系, 其中三叠系黄山街组、侏罗系恰克马克组湖相泥岩及三叠系塔里奇克组、侏罗系克孜勒努尔组、阳霞组的煤系源岩是研究区内的主力烃源岩层(卢斌等, 2015; 王祥等, 2016)。侏罗系阿合组主要为辫状河三角洲平原水下分流河道以及辫状河三角洲前缘水下分流河道、河口坝、支流间湾亚相(李国欣等, 2018)。阿合组储层致密、发育连片, 有利于形成致密气藏, 是已发现油气藏的主要产层段。

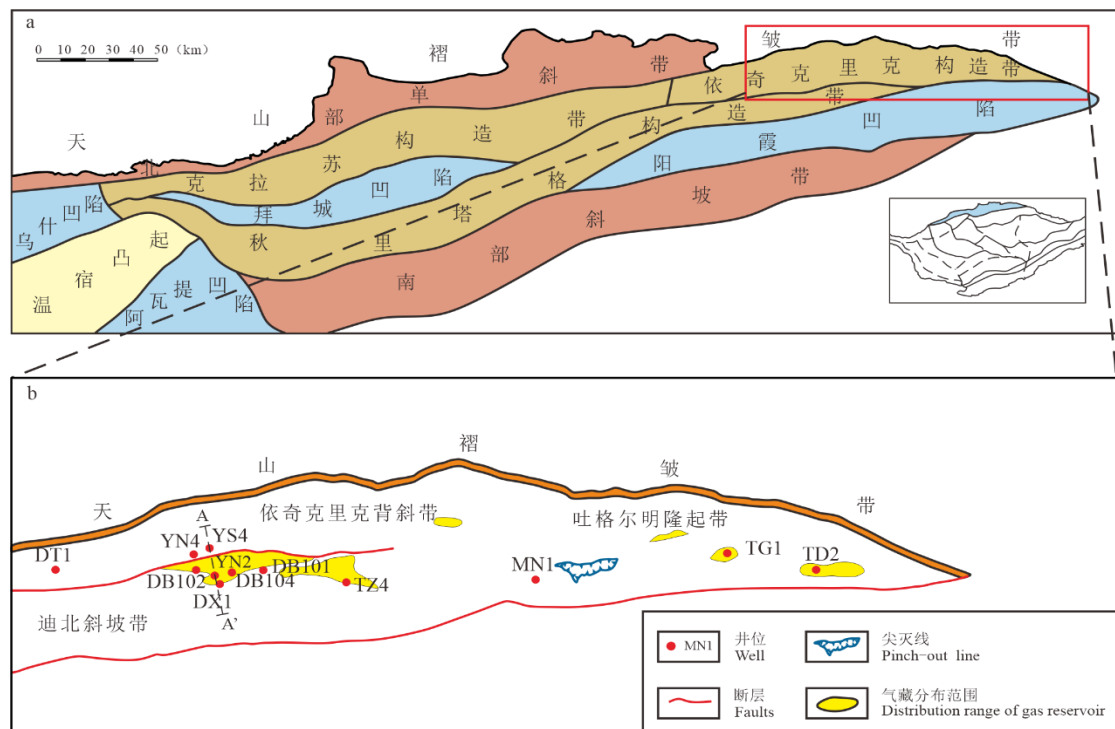


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

3 地层水化学特征

3.1 地层水数据筛选

库车东部阿合组油气藏为典型的致密砂岩油气藏，储集层物性差，在开采过程中，经历了压裂、酸化等储层改造过程。而地下的地层水在储层改造的过程中极易受到钻井液、清水、酸化液、压裂液等的影响，造成地层水的化学组分与实际组分有巨大偏差，这种地层水分析化验得到的结果不能用来真实的反应地下的地层环境(关云梅等，2011)。此外，在取样过程中受到原油、钻具等其他因素的影响也会对地层水组分造成干扰，所以需要在地层水数据进行筛选。

关于地层水的数据筛选的标准已经有学者进行过讨论，并建立了一系列可行的标准，常规对真实地层水数据筛选的指标包括地层水数据不全、pH 过高或过低、矿化度偏离背景值等(张宝收等，2009；陶小晚等，2010)，除剔除此类数据以外，结合库车东部钻井开发实际情况，对高钾离子含量的数据进行了筛选：在正常的地层水中，由于钾离子大量地参与形成不溶于水的次生矿物，导致钾离子的含量远远的小于钠离子的含量。从库车东部钻井完井报告中可以看出，库车东部的井在钻井、压裂过程中使用了高含钾钻井液、压裂液，当其与地层水混合，会造成地层水中钾离子的含量大大提高，甚至超过钠离子，所以应对这种失真的数据进行剔除。

3.2 地层水化学组分

基于筛选过后的地层水数据，对库车东部阿合组地层水进行分析：库车东部地区地层水矿化度分布范围较大，介于 12.16~74.15g/L 之间，整体而言以较低矿化度(15~45g/L)地层水为主(图 2a)。按照苏林分类，地层水可以划分为 NaHCO_3 型、 CaCl_2 型及 MgCl_2 型。其中以 NaHCO_3 型地层水为主体，可占总水样的 58.4%，其次为 CaCl_2 型和 MgCl_2 型，分别占样品总数的 33.3%和 8.3%(图 2b)。

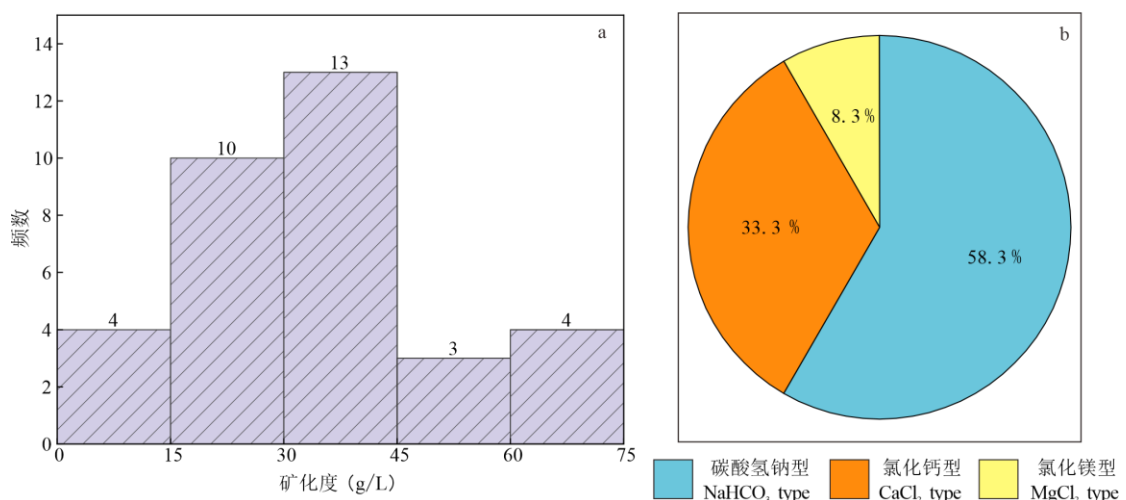


图 2 地层水矿化度频率直方图及水型分类图

Fig.2 Formation water salinity frequency histogram and water type classification map

地层水中的阳离子组分中, $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ 的含量最高, 其次为 Ca^{2+} , Mg^{2+} 的含量在水样中最低; 阴离子中以 Cl^- 为主, 其次为 HCO_3^- , 在 NaHCO_3 型地层水中 HCO_3^- 的含量较高但仍少于 Cl^- , SO_4^{2-} 含量最少。地层水矿化度主要受 $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ 及 Cl^- 控制。

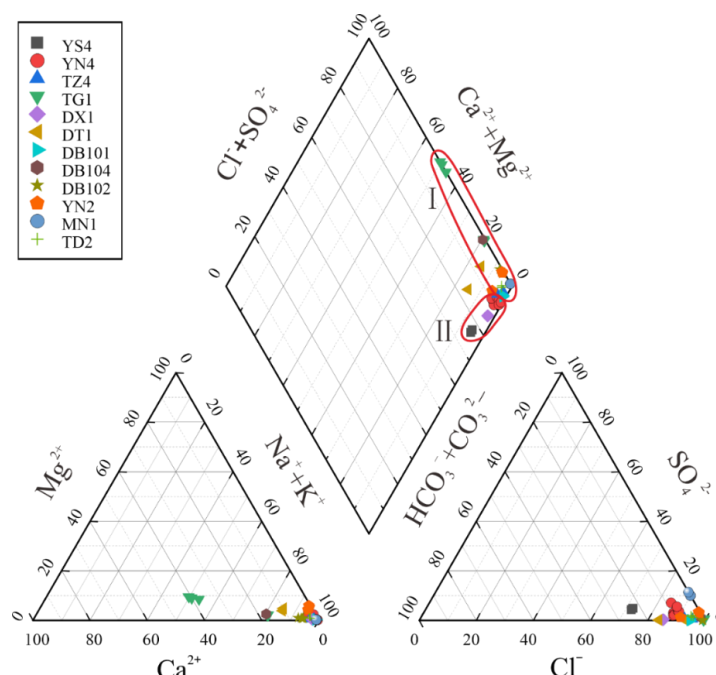


图3 库车坳陷东部阿合组地层水 Piper 三线图

Fig.3 The Piper diagram of formation water in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

Piper 三线图可以直观的反映地层水的组分特征 (Piper, 1944; Birkle et al., 2009)。从库车东部阿合组地层水 Piper 三线图(图 3)中可以看出, 库车东部地层水可以大致划分为两类: I 类地层水包括 CaCl_2 型和 MgCl_2 型地层水及大部分高矿化度的 NaHCO_3 型地层水($>30\text{g/L}$), 这类地层水主要出现在封闭性的地层环境中, 反映地层水经历了较强的水岩反应; II 类地层水包括 YS4 井、YN4 井等, 属于低矿化度的 NaHCO_3 型地层水($<20\text{g/L}$), 这类的地层水的化学特征表明地层在地质历史有一定程度的开启, 地层水受到了溶滤—渗入水的影响, 造成现今地层水矿化度较低。

从矿化度的平面分布图(图 4)中可以看出, 较低矿化度的井主要有 DT1 井、YN4 井、YS4 井及 MN1 井等, 较高矿化度的井包括 DB102 井、DB101 井、YN2 井、TZ4 井、TG1 井等。这种矿化度的平面分布规律主要受构造控制: 位于依奇克里克断裂以北的 DT1 井、YN4 井、YS4 井, 由于断裂直达地表, 大气降水得以沿着断裂进入地层, 与地层水混合、替代, 导致地层水的矿化度降低; MN1 井则是由于处在侏罗系地层尖灭线附近, 大气降水沿着不整合面进入到侏罗系地层中, 造成地层水矿化度的降低。而 DB102 井、DB101 井、YN2 井、TZ4 井、TG1 井等由于地层的封闭性较好, 地层水受到外界的影响较小, 地层水

的矿化度较高，水型主要为 CaCl_2 型、 MgCl_2 型及高矿化度的 NaHCO_3 型。

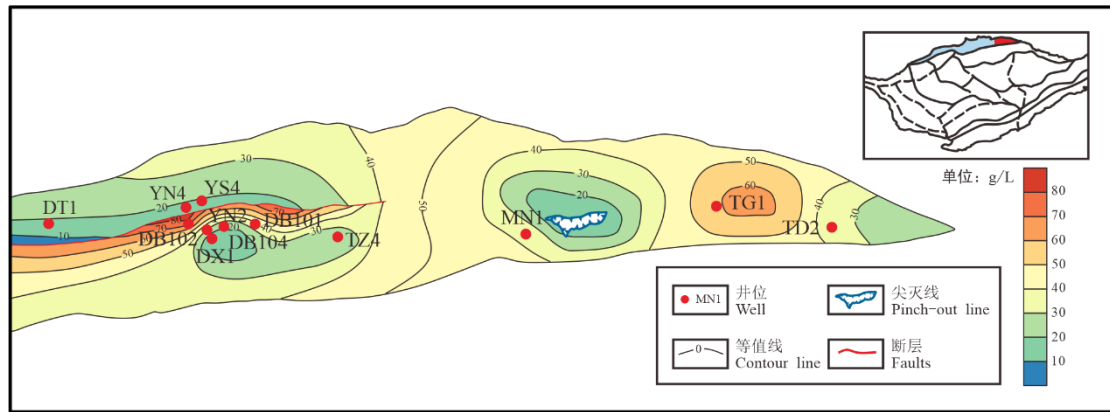
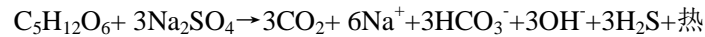


图 4 库车坳陷东部阿合组地层水矿化度分布图

Fig.4 Distribution of formation water salinity in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

这种高矿化度的 NaHCO_3 型地层水形成的原因可能是由于脱硫酸作用的影响。脱硫酸作用使地层水中 SO_4^{2-} 还原，同时产生 HCO_3^- 和 CO_2 并伴有碳酸盐平衡作用下的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 沉淀，其结果造成水型向 NaHCO_3 型演化、pH 升高及较低的脱硫酸系数，这类地层水可以用来指示烃类的充注和保存，主要反应(陈中红等，2013)如下：



3.3 地层水离子比例参数

地层水离子比例系数可以一定程度上反应地层水的来源、地层环境及水岩反应的强度等(钱诗友等，2009)。在地层水化学特征研究中主要利用的离子比例系数包括钠氯系数($\gamma_{\text{Na}^+/\text{Cl}^-}$)、脱硫酸系数($\gamma_{\text{SO}_4^{2-}} \times 100 / \gamma_{\text{Cl}^-}$)以及变质系数($[(\gamma_{\text{Cl}^-} - \gamma_{\text{Na}^+}) / \gamma_{\text{Mg}^{2+}}]$)。

钠氯系数可以用来反应地层水的来源、地层的水动力条件及地层水的水岩反应程度。一般海水的钠氯系数约为 0.85，经历阳离子交替吸附和蒸发浓缩作用的地层水钠氯系数小于 0.85，而受大气降水淋滤或溶滤岩盐层形成的地层水钠氯系数一般接近或大于 1；脱硫酸系数用来表征地层水脱硫酸作用的程度，可以作为反应地层封闭性的指标。当脱硫酸系数小于 1 时，表明地层是完全封闭的；脱硫酸系数介于 1~3 之间时，地层是较封闭的；当脱硫酸系数大于 3 时，表明地层是部分开启或者开启的；变质系数可以用来反映地层水经历的水岩反应的强度，变质系数小于 0，表明地层水有溶滤水的混入，地层封闭性较差；变质系数大于 0，表明地层水经历了较强的水岩反应，变质系数越大，地层封闭性越好，水岩反应越强烈(李鹏春等，2007；钱诗友等，2009；孟旺才等，2018)。

从库车东部阿合组地层水化学特征参数平面分布图中可以看出，地层水化学特征参数与地层水矿化度的平面分布特征相似，主要受构造的影响。DT1 井、YN4 井、YS4 井、MN1 井由于受到断裂、尖灭线的影响，在化学特征平面图上表现出钠氯系数高(图 5)，脱硫酸系数高(图 6)，变质系数低(图 7)的特点，反应出地下地层环境封闭性较差，地层水经历的水岩反应较弱，并受到大气降水的影响。而 DB102 井、DB101 井、YN2 井、TZ4 井、TG1 井等，

地层水的钠氯系数小于 0.85，脱硫酸系数小于 3，变质系数大于 0，表明现今地层的封闭性较好，地层水经历了较强的水岩反应。

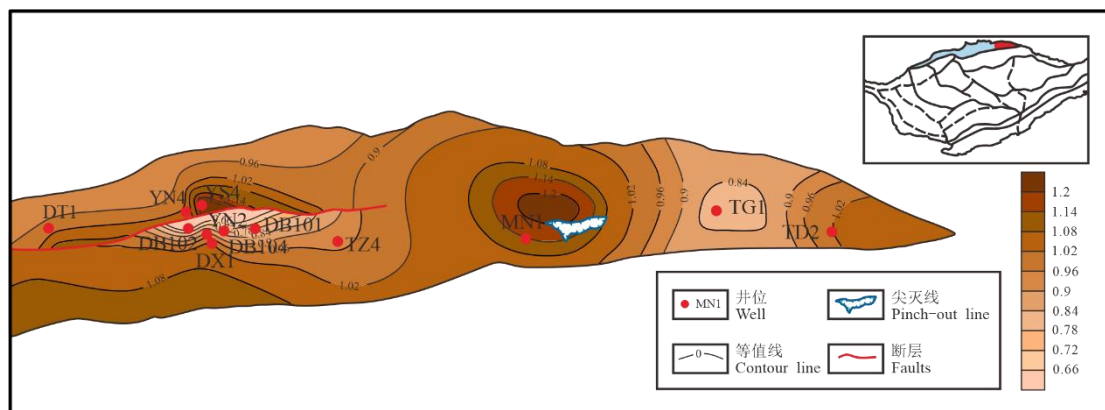


图 5 库车坳陷东部阿合组钠氯系数分布图

Fig.5 Distribution of sodium chloride coefficient in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

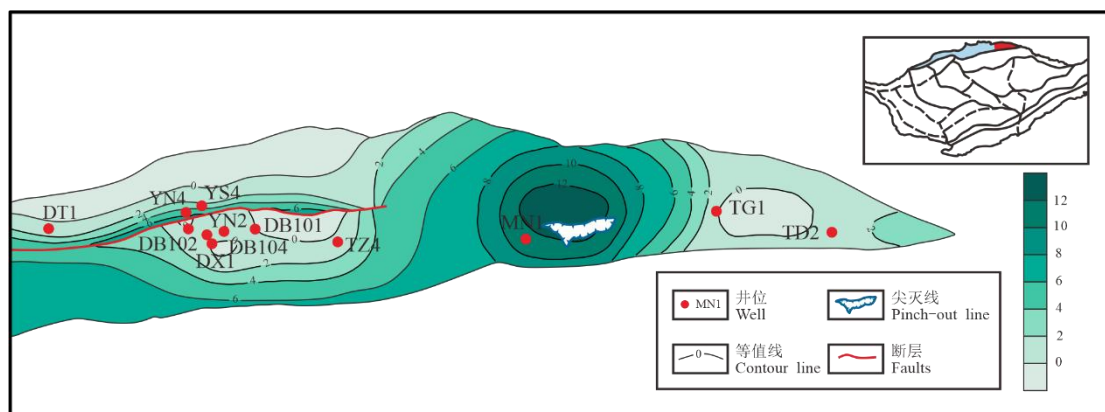


图 6 库车坳陷东部阿合组脱硫酸系数分布图

Fig.6 Distribution of desulfurization coefficient in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

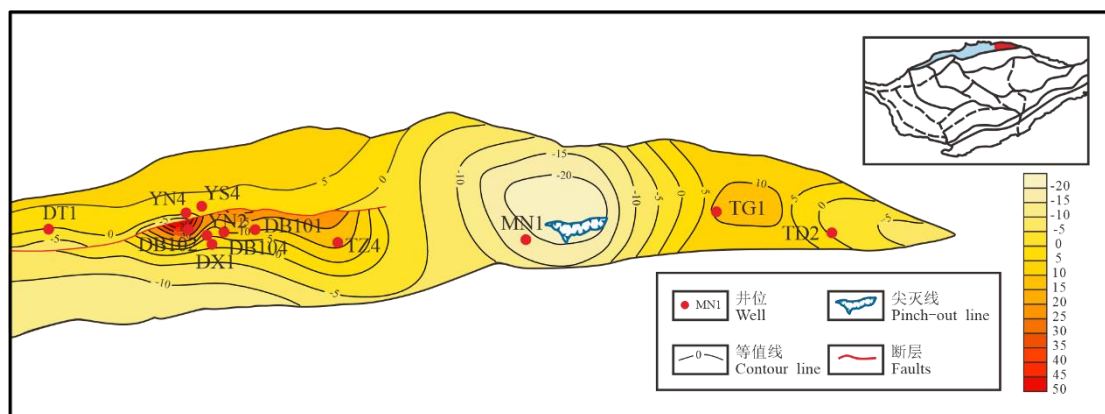


图 7 库车坳陷东部阿合组变质系数分布图

Fig.7 Distribution of metamorphic coefficient in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

4 地层水与油气藏响应关系

从库车东部阿合组油水平面分布图(图 8)中可以看出，油气藏及水层的平面分布与地层水矿化度及离子比例系数有较好的对应关系：地层水矿化度、变质系数的低值区，钠氯系数、脱硫酸系数的高值区，对应着水层的分布；而地层水矿化度、变质系数的高值区，钠氯系数、

脱硫酸系数的低值区则对应着油气藏的分布。

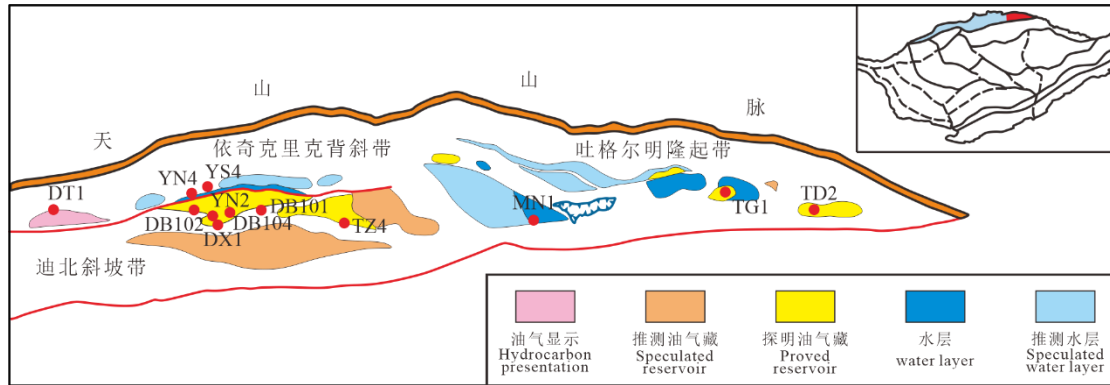
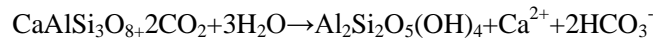
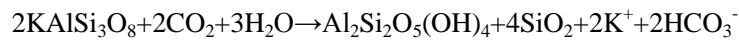
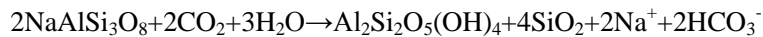


图 8 库车东部阿合组油水水平面分布图

Fig.8 Distribution of oil and water in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

以迪北油气藏为例进行分析(图 9)，不同学者对迪北油气藏从构造演化、储层物性、油气运移输导体系、油气生排烃史(黄梧桓等，2016；姜振学等，2015；李峰等，2014；刘建良等，2015；尚晓庆等，2012；王华超等，2019)等方面进行了研究，认为 YS4 井、YN4 井相对于 YN2 井具有较好的储层物性，在历史时期经历过油气的充注，但是由于受到新近纪吉迪克期至第四纪西域期断层活动的影响，油气沿着断至地表的断层逸散，而大气降水也沿着断裂进入到地层中，形成低矿化度的 NaHCO_3 型地层水，地层水的离子比例系数反映地层封闭性较差。而 YN2 井附近的断裂沟通了三叠系烃源岩及侏罗系阿合组致密储层且仅断至盐下，可以作为有利的输导体系形成油气藏，地层水的水型为 CaCl_2 型和 MgCl_2 型，油气藏的分布也与高矿化度及好的离子比例系数耦合。YS4 井、YN4 井地层压力系数分别为 1.31 和 1.38，相对于 DX1 井及 YN2 井较高的压力系数(1.76 和 1.84)(图 9)，进一步证明地层的封闭性相对较差，不利于油气的保存。含 CO_2 的大气降水进入到地层中可以形成长石的次生淋滤孔隙，其溶蚀作用的机理(张永旺等，2015)是：



这种溶蚀作用的存在也是 YN4 井、YS4 井的孔隙度高于 YN2 井的孔隙度的主要原因之一。

此外溶蚀产生的高岭石的含量也与地层水的类型有关。在受含 CO_2 地层水溶蚀的部位，高岭石含量较高，且高岭石为自生的六方片状。从表 1 中可以明显看出，YS4 井 2715~3432m、3434~3995m 井段，YN2 井在 3216~4378m 井段高岭石含量高，分别在在 13.0%~70.0%和 21.0%~60.0%之间，对应的层段试油地层水类型 NaHCO_3 型；而在 YN2 井 4334~4583m、4612~4964m 井段高岭石含量较低，介于 0~15%，对应的层段试油地层水类型为 CaCl_2 型和 MgCl_2 型。

所以在库车东部阿合组地层中，地层水的水型、矿化度及离子比例系数等化学特征与油气藏的分布有较好的耦合关系，可以为后续库车东部油气藏的勘探开发和评价提供一定的指示意义。

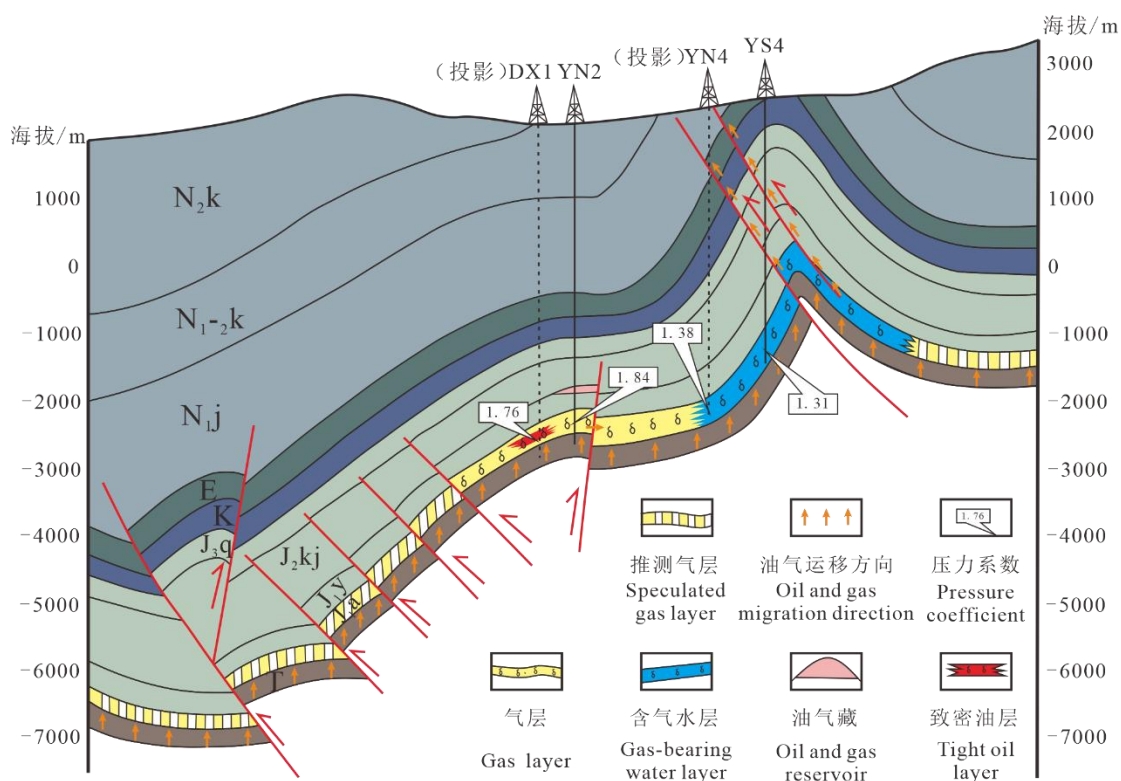


图9 迪北斜坡带油气藏剖面(据李瑾等, 2019 修改)(剖面位置在图1中用 A-A'表示)

Fig.9 Reservoir profile of Dibe slope zone (modified by Li Jin et al., 2019) (The section position is represented by A-A' in Fig 1)

表1 库车坳陷东部阿合组高岭石含量统计表

Table 1 Statistical table of kaolinite content in Ahe formation of eastern Kuqa Depression

井号	井段	层位	高岭石含量/%			水分析		
			最大	最小	平均	Cl/mg/L	矿化度/mg/L	水型
YN2	4334~4583	J ₂ kz-J ₁ y	8.0	0.0	1.6	20456.0	37068.0	CaCl ₂
	4612~4946	J ₁ y-J ₁ a	15.0	0.0	7.2	18063.0	33502.0	MgCl ₂
YS4	3216~4378	J ₂ kz-J ₁ y	60.0	21.0	34.6	23902.0	42270.0	NaHCO ₃
	2715~3432	J ₂ kz-J ₁ y	70.0	27.0	46.3	7237.0	15279.0	NaHCO ₃
	3434~3995	J ₁ y	58.0	13.0	32.3	8967.8	20190.5	NaHCO ₃

5 结论

(1)库车东部地层水矿化度相对较低，主要为 NaHCO₃ 型，其次为 CaCl₂ 型和 MgCl₂ 型；地层水的水型、矿化度及离子比例系数受构造控制：在地层的开启区，地层水为低矿化度的 NaHCO₃ 型地层水，离子比例系数表明地层水曾受到过大气降水的影响。而地层较封闭地区的地层水为高矿化度的 NaHCO₃ 型、CaCl₂ 型和 MgCl₂ 型，离子比例系数反映地层的封闭性较好。

(2)地层水矿化度及离子比例系数的平面分布特征与阿合组油水平面分布有较好的耦合关系:高矿化度、变质系数,低钠氯系数、脱硫酸系数分布的区域与油气藏的平面分布对应,而断裂开启区、地层尖灭区的水层则具有相反的地层水化学特征。从长石淋滤的次生孔隙及高岭石含量中可以得知YS4井等受到了大气降水的影响,虽在地质历史时期有过油气充注,但油气沿着断裂逸散;而YN2井较好的封闭性对应了油气藏的分布。油水层与地层水化学特征的对应关系为后续油气藏的勘探开发和评价提供一定的指示意义。

References

- Birkle P, Garc á, B. M, Padr ón, CMM. 2009. Origin and Evolution of Formation Water at the Jujo-Tecominoac ́n Oil Reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical Evolution and Water-Rock Interaction[J]. *Applied Geochemistry*, 24: 543-554.
- Cai Chunfang, Li, Kaikai, Li, Hongtao, Zhang, Baoshou. 2008. Evidence for Cross Formational Hot Brine Flow From Integrated 87 Sr/ 86 Sr, Ree and Fluid Inclusions of the Ordovician Veins in Central Tarim, China[J]. *Applied Geochemistry*, 23: 2226-2235.
- Chen J, Liu D, Peng P, Yu C, Zhang, B. 2013. The Sources and Formation Processes of Brines From the Lunnan Ordovician Paleokarst Reservoir, Tarim Basin, Northwest China[J]. *Geofluids*, 13: 381-394 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jian, Liu Dayong, Hou Xiaolin, Fan Yukun, Jia Wanglu, Peng Pingan, Zhang Baoshou, Xiao Zhongyao. 2018. Origin and evolution of oilfield waters in the Tazhong oilfield, Tarim Basin, China, and their relationship to multiple hydrocarbon charging events[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 98: 554-568.
- Chen Zhonghong, Cha Ming. 2013. Basin Fluid and Hydrocarbon Accumulation[M]. Science Press, 1-361 (in Chinese with English abstract).
- Dou Weitan, Liu Xinshe, Wang Tao. 2010. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 31: 767-773 (in Chinese with English abstract).
- Davisson M. L, Presser, T. S, Criss, R. E. 1994. Geochemistry of Tectonically Expelled Fluids From the Northern Coast Ranges, Rumsey Hills, California, Usa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 1687-1699.
- Guan Yunmei, Wang Lansheng, Zhang Jian, Zhang Qi, Shi Yuhua. 2011. Characteristics of mixed liquid of formation Water with residual acid and drilling fluid [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 34: 62-64 (in Chinese with English abstract).
- Hanor, Jeffrey, S. 1994. Physical and Chemical Controls On the Composition of Waters in Sedimentary Basins[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 11: 31-45.
- He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Lei Ganglin, Ma Yujie. 2009. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33: 19-32 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wuhuan, Wang Xin. 2007. Structural Characteristics and Active of Faults of DibeI-Yiqikelike Structure Belt in Kuqa East [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 32: 28-30 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhenxue, Li Feng, Yang Haijun, Li Zhuo, Liu Luofu, Chen Lei, Du Zhongming. 2015. Development characteristics of fractures in Jurassic tight reservoir in DibeI area of Kuqa depression and its reservoir-controlling mode [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36: 102-111 (in Chinese with English abstract).
- Li Feng, Jiang Zhenxue, Li Zhuo, Xiao Zhongyao, Yuan Wenfang, Cao Shaofang, Du Zhongming. 2014. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon charge history of DibeI gas reservoir in the Kuqa depression [J].

- Journal of Central South University(Science and Technology), 25: 1033-1041 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoxin, Yi Shiwei, Lin Shiguo, Gao Yang, Li Mingpeng, Li Dejiang, Wang Changyong. 2018. Reservoir characteristics and major factors influencing the reservoir quality of Lower Jurassic in eastern Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 29: 1506-1517 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongxia, Cai Chunfang. 2017. Origin and Evolution of Formation Water From the Ordovician Carbonate Reservoir in the Tazhong Area, Tarim Basin, NW China[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 148: 103-114.
- Li Jin, Wang Chao, Li Jian, Ma Wei, Zhang Haizu, Lu Yuhong, Li Dejiang, Liu Mancang. 2019. Source and exploration direction of tight oil and gas in the Dibe section of northern Kuqa depression [J]. China Petroleum Exploration, 24: 485-497 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengchun, Liu Chunxiao, Zhang Yuan, Long Liping, Zhang Lihong. 2007. Geochemical behaviors of the Ordovician formation water in the Tazhong area and its origin and evolution [J]. Oil & Gas Geology: 802-808 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Yang Jinli, Jiang Junwei, Liu Jimin, Liu Zongcheng. 2009. Origin of Upper Triassic formation water in middle Sichuan Basin and its natural gas significance [J]. Petroleum Exploration & Development, 36: 428-435.
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhao Mengjun, Wang Feiyu. 2002. Hydrocarbon accumulation period in Kuqa depression [J]. Chinese Science Bulletin: 56-63 (in Chinese).
- Liu Jianliang, Jiang Zhenxue, Li Feng, Wang Ying. 2015. Identification of Paleo-Oil-Water Contact of Jurassic Ahe Formation in Dibe Area, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 36: 153-158 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liwei, Sun Xiongwei, Zhao Yingjie, Jin Jiangning. 2016. Hydrocarbon Distribution and Accumulation Mechanism of Dibe Tight Sandstone Gas Reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 37: 257-261 (in Chinese with English abstract).
- Lu Bin, Li Jian, Ran Qigui, Hao Aisheng. 2015. Geochemical Characteristics and Genetic Type of Natural Gases in Eastern Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Science Technology and Engineering, 15: 52-58 (in Chinese).
- Meng Wangcai, Li Yun, Fu Guomin, Li Jing. 2018. Relationship between Chemical Characteristics of Formation Water and Natural Gas Accumulation within Shan 2 Member of Shanxi Formation in North Yulin Gas Field [J]. Northwestern Geology, 51(02): 203-208.
- Piper Am. 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 25: 914-923.
- Qian Shiyu, Zeng Jianhui. 2009. Chemical Characteristics of Shahejie Formation Formation Water and Their Petroleum Geological Significance, Dongying Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 20: 603-609 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiang, Chen Xuanhua, Shao Zhaogang, Zhang Yiping, Wang Yongchao. 2021. New Evidence of the Indosinian Intracontinental Deformation From the Triassic Growth Strata in the Kuqa Depression, Southern Tianshan, China [J], China Geology. doi: 10.31035/cg2021012.
- Shang Xiaoping, Liu Luofu, Gao Xiaoyue, Jiang Zhenxue, Liu Guodong. 2012. Characteristics of hydrocarbon pathway system and transport model of the Yiqikelike structural belt in Kuqa Depression [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 36: 31-40 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiangyang, Jie Xinong. 2001. Relationship between the chemical characteristics of formation water and hydrocarbon accumulation in the Dongying Sag [J]. Experimental Petroleum Geology: 291-296 (in Chinese with English abstract).

- Tao Xiaowan, Zou Caineng, Jia Jinhua, Tao Shizhen, Hu Guoyi, Luo Shuchun, Zhang Baoshou. 2010. Identification of water authenticity in carbonate formations in Tarim Basin——A case study of Lungu Oilfield[C]. China Geophysics 2010——China Geophysical Society 26th annual meeting, Chinese Seismological Society 13th academic conference proceedings. China Society of Geophysics Annual Meeting, China Seismological Society Academic Conference (in Chinese).
- Wang Huachao, Han Denglin, Ou Yangchuanxiang, Zhou Jiayi, Wang Qianqian, Ma Li. 2019. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir of Ahe Formation in northern Kuqa Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 31: 115-123 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ke, Zhang Ronghu, Yu Chaofeng, Yang Zhao, Tang Yangang, Wei Hongxing. 2020. Characteristics and controlling factors of Jurassic Ahe reservoir of the northern tectonic belt, Kuqa De-pression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 31: 623-635 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weifeng, Wang Qian, Shan Xinjian. 2018. Development characteristics and formation mechanism of transverse faults along the Kuqa thrust belt[J]. Geology in China, 45(3): 493-510 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiang, Wei Hongxing, Shi Wanzhong, Wang Yuan. 2016. Characteristics of Formation Pressure and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation in the Eastern Part of Kuqa Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 35: 68-73 (in Chinese).
- Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, Fan Liyong. 2012. Occurrence state and production mechanism of formation water in tight sandstone reservoirs of Sulige area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 33: 802-810 (in Chinese with English abstract).
- Yong Ziquan, Li Junliang, Zhou Zhongli, Zhai Zhonghua, Gong Changming, Zhao Yihua, Song Huanrong, Wang Wei. 2006. The formation-water chemical characters and petroleum significance of the fourth segment reservoirs of Xiangxi group in center of Sichuan basin [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration: 41-45 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Jianhui, Ma Yong, Lin Lamei. 2021. Petroleum Hydrogeology [M]. China University of Petroleum Press, 1-190 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Jianhui, Wu Qiong, Yang Haijun, Qian Shiyong, Kong Xu, Ma Zhongliang. 2008. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance[J]. Oil & Gas Geology (02): 223-229 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baoshou, Yang Haijun, Yang Wenjing, Gu Qiaoyuan, Li Xinsheng. 2009. Formation water identification and characteristics of lower paleozoic carbonate reservoir[C]. Proceedings of the Fifth International Symposium on hydrocarbon accumulation mechanism and oil and gas resources evaluation. Beijing: China Petroleum Institute(in Chinese).
- Zhang Nini, Liu Luofu, Su Tianxi, Dai Qiwen, Zhao Yuanyuan. 2015. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of the Lower Jurassic Tight Sandstone in Eastern Kuqa Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33: 160-169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ronghu, Yang Haijun, Wei Hongxing, Yu Chaofeng, Yang Zhao, Wu Jing. 2019. The sandstone characteristics and hydrocarbon exploration signification of Lower Jurassic in middle east section of northern tectonic belt in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 30: 1243-1252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shanwen, Zhang Linye, Bao Youshu. 2011. Formation Fluid Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in the Dongying Sag, Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 38: 394-405.

Zhang Yongwang, Zeng Jianhui, Qu Zhengyang, Chen Junbing. 2015. Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in sandstone reservoirs of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil and Gas Geology, 36: 73-79 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈中红, 查明. 2013. 盆地流体与油气成藏[M]. 科学出版社, 1-361.
- 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 2010. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. 石油学报, 31(05): 767-773.
- 关云梅, 王兰生, 张鉴, 张琦, 施雨华. 2011. 地层水与残酸、钻井液混合液特征分析[J]. 天然气勘探与开发, 34(02): 62-64.
- 何登发, 周新源, 杨海军, 雷刚林, 马玉杰. 2009. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 33(01): 19-32.
- 黄梧桓, 汪新. 2016. 库车东部迪北-依奇克里克构造带断裂活动与演化特征[J]. 科技通报, 32(08): 28-30.
- 姜振学, 李峰, 杨海军, 李卓, 刘洛夫, 陈磊, 杜忠明. 2015. 库车坳陷迪北地区侏罗系致密储层裂缝发育特征及控藏模式[J]. 石油学报, 36(S2): 102-111.
- 李峰, 姜振学, 李卓, 肖中尧, 袁文芳, 曹少芳, 杜忠明. 2014. 库车坳陷迪北气藏 2 期油气充注古流体证据[J]. 天然气地球科学, 25(07): 1033-1041.
- 李国欣, 易士威, 林世国, 高阳, 李明鹏, 李德江, 王昌勇. 2018. 塔里木盆地库车坳陷东部地区下侏罗统储层特征及其主控因素[J]. 天然气地球科学, 29(10): 1506-1517.
- 李谨, 王超, 李剑, 马卫, 张海祖, 卢玉红, 李德江, 刘满仓. 2019. 库车坳陷北部迪北段致密油气来源与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 24(04): 485-497.
- 李鹏春, 刘春晓, 张渊, 龙利平, 张利红. 2007. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化[J]. 石油与天然气地质(06): 802-808.
- 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军, 王飞宇. 2002. 库车坳陷的油气成藏期[J]. 科学通报(S1): 56-63.
- 刘建良, 姜振学, 李峰, 王赢. 2015. 库车坳陷迪北地区侏罗系阿合组古油水界面识别[J]. 新疆石油地质, 36(02): 153-158.
- 刘立炜, 孙雄伟, 赵英杰, 金江宁. 2016. 库车坳陷迪北致密砂岩气藏油气分布特征及聚集机理[J]. 新疆石油地质, 37(03): 257-261.
- 卢斌, 李剑, 冉启贵, 郝爱胜. 2015. 塔里木盆地库车坳陷东部天然气地球化学特征及成因类型[J]. 科学技术与工程, 15(06): 52-58.
- 孟旺才, 李云, 付国民, 李晶. 2018. 榆林北部气田山 2 段地层水化学特征与天然气聚集关系[J]. 西北地质, 51(02): 203-208.
- 钱诗友, 曾溅辉. 2009. 东营凹陷沙河街组地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 20(04): 603-609.
- 尚晓庆, 刘洛夫, 高小跃, 姜振学, 刘国东. 2012. 库车坳陷依奇克里克构造带油气输导体系特征及输导模式[J]. 大庆石油学院学报, 36(01): 31-40.
- 孙向阳, 解习农. 2001. 东营凹陷地层水化学特征与油气聚集关系[J]. 石油实验地质(03): 291-296.
- 陶小晚, 邹才能, 贾进华, 陶士振, 胡国义, 罗春树, 张宝收. 2010. 塔里木盆地碳酸盐岩地层水真伪鉴别——以轮古油田为例[C]. 中国地球物理 2010——中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会论文集. 中国地球物理学会年会, 中国地震学会学术大会.
- 王华超, 韩登林, 欧阳传湘, 周嘉义, 王倩倩, 马力. 2019. 库车坳陷北部阿合组致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 31(02): 115-123.
- 王珂, 张荣虎, 余朝丰, 杨钊, 唐雁刚, 魏红兴. 2020. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带侏罗系阿合组储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 31(05): 623-635.

- 王伟锋, 王乾, 单新建. 2018.库车前陆冲断带横断层发育特征及其形成机制[J]. 中国地质, 45: 493-510.
- 王祥, 魏红兴, 石万忠, 王媛. 2016.库车坳陷东部地层压力特征与油气成藏[J].地质科技情报, 35(01): 68-73.
- 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 范立勇. 2012.苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征[J].石油与天然气地质, 33(05): 802-810.
- 雍自权, 李俊良, 周仲礼, 翟中华, 龚昌明, 赵异华, 宋焕荣, 王威. 2006.川中地区上三叠统香溪群四段地层水化学特征及其油气意义[J].物探化探计算技术(01): 41-45.
- 曾溅辉, 马勇, 林腊梅. 2021. 油田水文地质学[M].中国石油大学出版社, 1-190.
- 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 钱诗友, 孔旭, 马中良. 2008.塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J].石油与天然气地质(02): 223-229.
- 张宝收, 杨海军, 杨文静, 顾乔元, 李新生. 2009.塔中下古生界碳酸盐岩地层水的识别与特征[C].第五届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会论文集.北京: 中国石油学会.
- 张妮妮, 刘洛夫, 苏天喜, 戴琦雯, 赵园园. 2015.库车坳陷东部下侏罗统致密砂岩储层特征及主控因素[J].沉积学报, 33(01): 160-169.
- 张荣虎, 杨海军, 魏红兴, 余朝丰, 杨钊, 伍劲. 2019.塔里木盆地库车坳陷北部构造带中东段中下侏罗统砂体特征及油气勘探意义[J].天然气地球科学, 30(09): 1243-1252.
- 张永旺, 曾溅辉, 曲正阳, 陈俊兵. 2015.东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制[J].石油与天然气地质, 36(01): 73-79.