

doi:10.3799/dqkx.2016.109

渤南洼陷流体包裹体特征与成藏期流体压力恢复

刘 华^{1,2}, 蒋有录^{1,2}, 卢 浩³, 刘雅利³, 景 琛^{1,2}

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

3. 中石化胜利油田有限公司勘探开发研究院, 山东东营 257001

摘要: 渤南洼陷油气资源丰富, 成藏过程复杂, 但其油气成藏时期的动力条件尚不明确。利用流体包裹体显微荧光、均一温度和冰点测试技术, 恢复了渤南洼陷主力储层油气成藏期次及其对应的地层压力。研究区沙三段烃类包裹体发黄白色和黄绿色荧光, 均一温度为 80~130 °C, 为明化镇中后期至今一期成藏; 沙四段烃类包裹体灰黄色、黄绿、蓝绿色 3 种荧光, 存在 70~80 °C 和 90~130 °C 两个温度区间, 对应着东营期、明化镇初期至今两期油气充注, 且以晚期充注为主。油气运聚时期普遍发育异常高压, 第一期成藏时压力系数相对较低; 第二期随着烃源岩生烃量的增加, 异常压力持续增大、超压范围不断扩展, 压力系数高达 1.80, 为大规模的油气运移提供了充足的动力条件, 并控制了洼陷区油气的聚集与宏观分布。

关键词: 流体包裹体; 均一温度; 成藏期次; 地层压力恢复; 异常高压; 运移动力; 渤南洼陷; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2016)08-1384-11

收稿日期: 2016-01-30

Restoration of Fluid Pressure during Hydrocarbon Accumulation Period and Fluid Inclusion Feature in the Bonan Sag

Liu Hua^{1,2}, Jiang Youlu^{1,2}, Lu Hao³, Liu Yali³, Jing Chen^{1,2}

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company Limited SINOPEC, Dongying 257000, China

Abstract: Bonan sag is rich in oil and gas resources, yet its complicated accumulation process results in a poor understanding of its dynamic conditions during hydrocarbon accumulation. In this study, the fluid pressure in the hydrocarbon accumulation period was recovered in the Bonan sag using such fluid inclusion analysis techniques as microscopic fluorescence, homogenization temperature and freezing point. The results show that the fluorescence of hydrocarbon inclusions in Es₃ Member reservoir is yellow-white, and yellow-green, and the homogenization temperatures of fluid inclusions are 80–130 °C, indicating that hydrocarbons were accumulated during the period from the middle and late stage of Minghuazhen Formation deposition to present. Whereas the fluorescence of hydrocarbon inclusions in the Es₄ Member reservoirs is yellow, yellow-green and blue-green, and the homogenization temperatures of fluid inclusions are 70–80 °C and 90–130 °C, corresponding to the two stages of hydrocarbon accumulation, namely the Dongying stage and the early stage of Minghuazhen to present, of which the latter is dominant. Meanwhile, reservoirs were generally with abnormal pressure in the period of hydrocarbon accumulation on a large scale. In the first period of hydrocarbon charging, the hydrocarbon generation was limited with the weak pressure coefficient, but in the second period of hydrocarbon charging, due to a large amount of hydrocarbons generated by the matured source rocks, the abnormal pressure gradually increased, the overpressure area enlarged, and the formation pressure coefficient reached 1.80. The overpressure could have provided sufficient driving force, and affected the directions of hydrocarbon migration and accumulation.

Key words: fluid inclusion; homogenization temperature; hydrocarbon accumulation stage; driving force of hydrocarbon migration; abnormal overpressure; Bonan sag; petroleum geology.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41502129); 国家重大专项(No. 2016ZX05006-003); 中央高校基本科研业务费专项(No. 14CX05015A).
作者简介: 刘华(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要从事油气藏形成机理与分布规律研究. E-mail: liuhua77@upc.edu.cn

引用格式: 刘华, 蒋有录, 卢浩, 等, 2016. 渤南洼陷流体包裹体特征与成藏期流体压力恢复. 地球科学, 41(8): 1384-1394.

油气作为一种流体,在运移的过程中会因晶体生长或裂隙愈合而被捕获于矿物晶格内形成包裹体(潘长春等,1996;刘超英等,2008),流体包裹体记录了原始流体的性质、组分、理化条件等(Bourdet *et al.*, 2009;伏美燕等,2015),作为化石记录可用于重塑油气藏的形成和演化史。根据流体包裹体特征来判断油气运移聚集的时间和期次、恢复地层流体压力,已经成为油气成藏过程研究的一种重要手段(刘斌和沈昆,1999;陈红汉等,2002;蒋有录等,2003;米敬奎等,2003;刘可禹等,2013;平宏伟等,2014)。渤南洼陷作为济阳拗陷中的富油洼陷,油气资源丰富,成藏过程复杂,笔者通过大量储层流体包裹体的观察,利用镜下荧光特征、均一温度、冰点、盐度等参数信息,恢复了渤南洼陷古近系油气藏的形成时间及其对应的地层流体压力,以期明确油气藏的充填序列和油气运移的动力条件,为进一步认识该区油气成藏过程奠定了基础。

1 研究区概况

渤南洼陷位于济阳拗陷沾化凹陷的中部,是沾化凹陷埋深最大的次级洼陷,南邻陈家庄凸起斜坡带,北以埕南断裂与埕子口凸起相连,东以孤西断层与孤北洼陷和孤岛凸起相邻,东南以垦西地垒与三

合村洼陷和孤南洼陷相接(林畅松等,2003),勘探面积约为 600 km²。渤南洼陷具有北陡南缓、向北掀斜的箕状断陷特征,受几条近 EW 向断层切割,从南到北依次划分为南部缓坡带、渤深 4 断阶带、渤南洼陷带和北部陡坡带 4 个二级构造带(图 1)。

渤南洼陷古近系经历了多个沉积旋回,发生过多次湖侵作用,形成了多套烃源岩。目前,研究区内孔店组烃源岩的生烃状况还不确定,沙一段烃源岩由于埋深较浅尚未成熟供烃,因此,沙河街组沙四段和沙三段是主要烃源岩系。渤南洼陷储层发育,目前已发现的油藏多以沙三段、沙四段储层居多,其次为沙二段储层;沙四上亚段的膏岩和沙三下亚段的泥岩是其良好的区域盖层。由于渤南洼陷油藏多分布于洼陷区,埋深较大,地层的压实、胶结作用强,多属中孔低渗或低孔渗储层,油气成藏动力条件要求较高。

2 流体包裹体特征分析

综合考虑渤南洼陷主力储层的分布特征,笔者优选钻遇古近系沙三段和沙四段储层的 26 口取心井,进行了岩心观察。研究区的储层主要为砂岩,且以细砂和中砂为主,杂基含量较高,胶结物含量较少,且多为硅质胶结。针对岩心含油气特征,笔者制

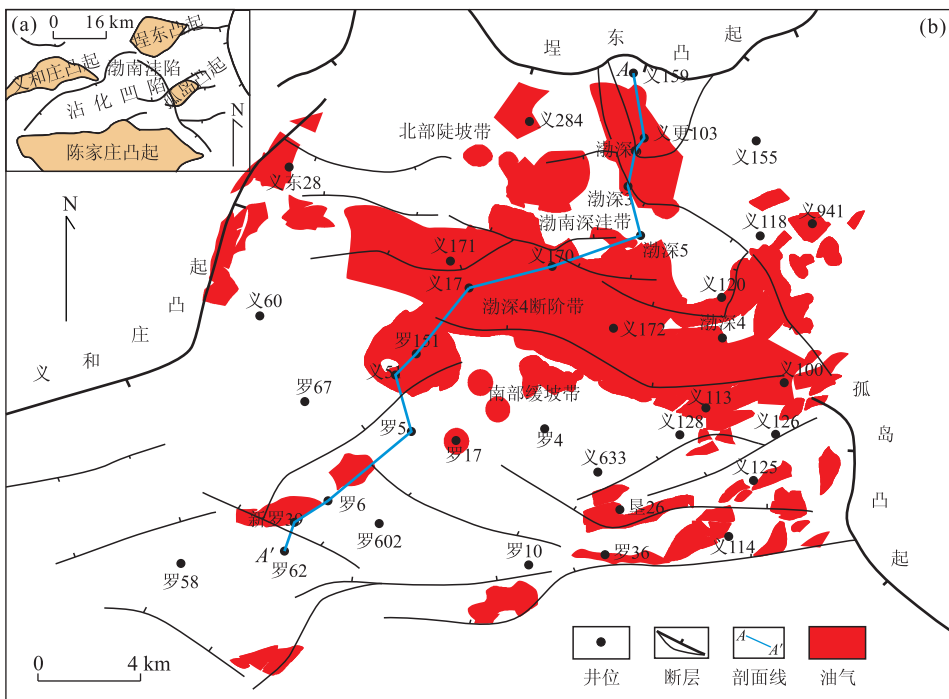


图 1 渤南洼陷区域位置(a)和构造单元(b)

Fig. 1 The location (a) and structural units (b) of the Bonan sag

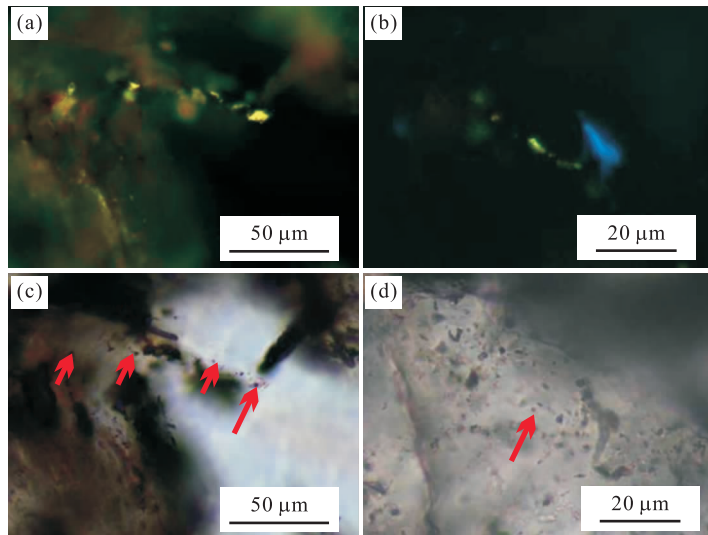


图 2 渤南洼陷沙三段储层流体包裹体镜下特征

Fig. 2 The microscopic characteristics of fluid inclusions in E_{s3} reservoirs in the Bonan sag

a. 石英内部裂缝中的烃类包裹体, 黄白色荧光, 义 113 井, 3 014. 7 m, E_{s3} ; b. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 黄绿色荧光, 义 120 井, 3 354. 5 m, E_{s3} ; c. 石英内部裂缝中的烃类包裹体, 透射光下浅褐色, 义 113 井, 3 014. 7 m, E_{s3} ; d. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 透射光下无色, 义 120 井, 3 354. 5 m, E_{s3}

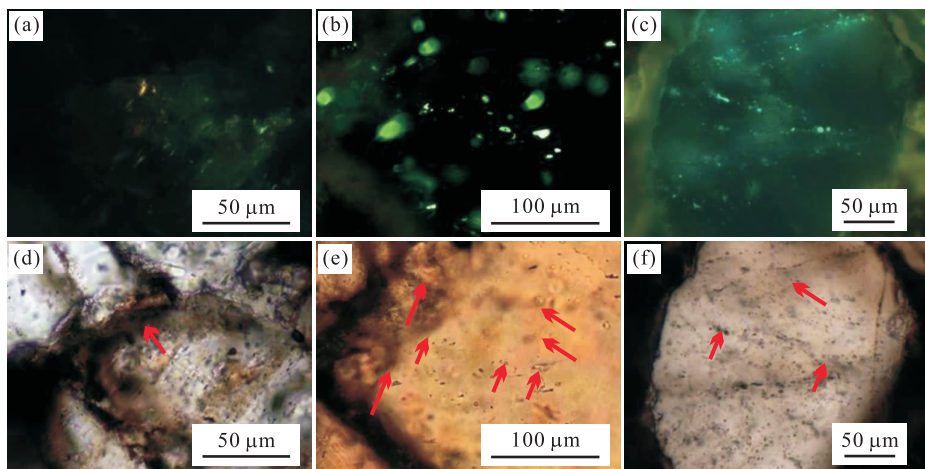


图 3 渤南洼陷沙四段储层流体包裹体镜下特征

Fig. 3 The microscopic characteristics of fluid inclusions in E_{s4} reservoirs in the Bonan sag

a. 石英内部裂缝中的烃类包裹体, 黄色荧光, 义 171 井, 3 523. 8 m, E_{s4} ; b. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 黄绿色荧光, 义 170 井, 3 807. 3 m, E_{s4} ; c. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 蓝绿色荧光, 义 171 井, 3 533. 4 m, E_{s4} ; d. 石英内部裂缝中的烃类包裹体, 透射光下浅褐色, 义 171 井, 3 523. 8 m, E_{s4} ; e. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 透射光下无色, 义 170 井, 3 807. 3 m, E_{s4} ; f. 穿石英裂缝中的烃类包裹体, 透射光下无色, 义 171 井, 3 533. 4 m, E_{s4}

作了 150 块样品进行流体包裹体观察与参数测定。研究设备采用德国蔡司数字偏光显微镜 (ZEISS AXIO Imager D1m)、蔡司彩色高分辨率数码冷摄像头 (AxioCam HRc, 1 200 万像素)、英国 Linkamd 冷热台 (THMS600 型) 和 AXIO Vison 4 图像处理软件等组成的荧光显微图像系统, 荧光激发光源选用紫外+紫荧光滤片。

2.1 流体包裹体镜下特征

流体包裹体镜下观察结果显示, 研究区沙三段、

沙四段储层中发育大量的烃类包裹体, 其中气液两相烃类包裹体主要分布于穿石英颗粒裂缝以及少量的石英次生加大边中, 呈线状、串珠状或独立状分布, 发育丰度低一中等, 个体较小, 多为 5~10 μm , 以椭圆形或不规则状为主。透射光下, 烃类包裹体多呈浅褐色、无色, 荧光下存在黄色、黄白、黄绿、蓝绿色等多种荧光颜色, 显示出充注烃类成熟度的差异 (图 2, 图 3)。研究区发育的盐水包裹体主要为单一液相和气液两相包裹体, 透射光下多呈无色透明, 多

沿石英颗粒的裂隙分布,少量分布在方解石脉、碳酸盐胶结物(包括方解石、白云石、铁白云石)及长石粒内溶蚀孔缝中. 盐水包裹体大小不一,一般为 $1\sim 20\ \mu\text{m}$,以椭圆形或不规则状为主. 在烃类包裹体发育的裂隙内,往往伴生着大量的盐水包裹体,其长轴方向与裂隙延伸方向以及烃类包裹体分布方向相一致,盐水包裹体与烃类包裹体的产状相似,两者存在共生关系.

包裹体的类型、产状、颜色、荧光特征、成岩自生矿物序次等都是烃类充注序列划分的基础和重要依据(卢焕章等,2004;李荣西等,2006;陶士振,2006;张义杰等,2010;陈哲龙等,2015;赵洪等,2015),其中烃类包裹体的荧光特征还可以反映包裹体的有机质成分及其成熟度(赵艳军和陈红汉,2008),在油气成藏期次判定中占有重要的地位. 据笔者观察,渤南洼陷沙三段烃类包裹体存在两种颜色:一种是发黄白色荧光的包裹体,在透射光下为浅褐色;另一种是发黄绿色荧光的包裹体,透射光下为无色(图2). 沙四段烃类包裹体存在3种颜色:发黄白色荧光的包裹体在透射光下为浅褐色,数量较少;发黄绿色荧光的包裹体,透射光下接近无色;发蓝绿色荧光的包裹体,在透射光下为无色透明(图3),随着3种荧光颜色的增强油气的成熟度依次增高,沙四段油气的成熟度略高于沙三段的充注烃类.

2.2 储层包裹体均一温度特征

包裹体均一温度代表了包裹体形成时的储层温度,由于烃类包裹体中有机质的不稳定性以及成分差异导致均一温度变化较大(李静和查明,2010),而与烃类包裹体共生的盐水包裹体均一化温度的稳定性较高(梁宇等,2011),能较好地反映捕获温度. 因此,前人利用与烃类包裹体共生盐水包裹体的均一温度,结合储层埋藏史可较准确地标定研究区大规

模烃类充注的时间,确定油气藏的形成时间和期次(柳少波和顾家裕,1997;邱楠生等,2000;Samson *et al.*, 2003).

笔者应用 Linkam THMS600 型冷热台对不同期次烃类包裹体所伴生的盐水包裹体进行均一温度测试,得到 300 个均一温度数据点. 与烃类包裹体共生的盐水包裹体的均一温度为 $70\sim 130\ ^\circ\text{C}$,不同层系的均一温度区间存在差别:沙四段储层的流体包裹体均一温度分布范围广,存在 $70\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 和 $90\sim 130\ ^\circ\text{C}$ 两个主温度区间(图4),且高温区间样品数量占有绝对优势;沙三段储层包裹体均一温度为 $80\sim 130\ ^\circ\text{C}$,集中分布于 $100\sim 120\ ^\circ\text{C}$ (图4),单峰形态明显. 对比可知,油气充注沙四段储层时的温度低于沙三段储层,间接说明了油气藏形成时间上的差异.

2.3 包裹体的冰点、盐度特征

包裹体盐度是反映流体物理化学性质和流体来源的重要指标(梁正中和袁波,2014),也是古压力恢复的重要参数(Zhang and Frantz, 1987). 前人主要采用冷冻法获得始熔温度进而确定包裹体中的盐水体类型(刘德汉,1995;刘小洪等,2010;时保宏等,2015),再根据所处的盐水体选择不同的方法计算盐度. 笔者利用英国 Linkamd 冷热台(THMS600型)对研究区所获得的流体包裹体进行了始熔温度测定,结果显示为 $-22\sim -20\ ^\circ\text{C}$,接近 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的低共结温度($-20.8\ ^\circ\text{C}$),据此,笔者确定研究区的盐水体为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系. 150个盐水包裹体的冰点测试结果为 $-11.2\sim -0.6\ ^\circ\text{C}$,其主要集中在 $-6\sim -1\ ^\circ\text{C}$,属于未饱和 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系(冰点小于 $-21.2\ ^\circ\text{C}$). 区带上盐水包裹体的冰点存在差异,北部陡坡带的包裹体冰点较低,基本小于 $3\ ^\circ\text{C}$ (表1);而渤南深洼带的冰点变化范围较大,存在高冰点与低冰点共存的现象,说明了流体充注的

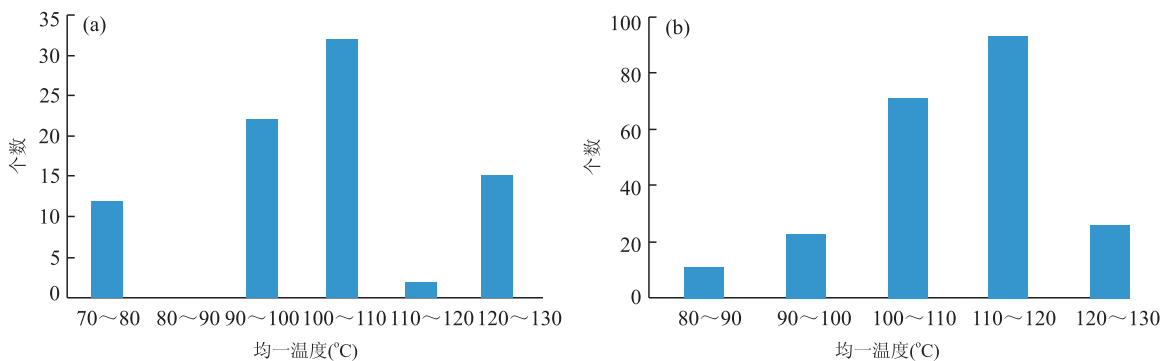


图4 渤南洼陷沙四段(a)和沙三段(b)储层流体包裹体均一温度分布

Fig. 4 Homogenization temperature of fluid inclusions in E_{s4} and E_{s3} reservoirs, Bonan sag

表 1 渤南洼陷部分流体包裹体测试数据及古压力

Table 1 Paleopressure and the test data of fluid inclusions in some reservoirs, Bonan sag

构造位置	井号	现今埋深(m)	层位	均一温度(°C)	冰点(°C)	含盐度(%)	古压力(MPa)	古埋深(m)	古压力系数
北部陡坡带	渤深 3	3 544.65	沙三段	118.8	-2.1	3.55	32.39	2 678.95	1.17
	渤深 3	3 544.65	沙三段	119.2	-0.6	1.06	32.23	2 689.47	1.16
	义 117	3 395.93	沙三段	117.9	-1.4	2.47	32.42	2 655.26	1.19
	义 117	3 387.56	沙三段	113.8	-3.0	4.96	32.92	2 547.37	1.26
渤南深洼带	义 120	3 356.30	沙三段	105.9	-5.4	8.41	33.79	2 540.00	1.41
	义 120	3 362.24	沙三段	114.3	-1.1	1.91	32.74	2 780.00	1.18
	义 120	3 347.54	沙三段	105.7	-5.4	8.41	33.81	2 534.29	1.33
	新渤深 1	3 126.06	沙三段	104.8	-1.1	1.91	33.64	2 508.57	1.34
	新渤深 1	3 126.06	沙三段	95.3	-1.0	1.74	34.55	2 237.14	1.19
	新渤深 1	3 752.96	沙四段	114.6	-9.0	12.85	33.25	2 788.57	1.55
	义 170	3 245.30	沙三段	111.5	-1.1	1.91	33.00	2 486.84	1.29
	义 170	3 809.50	沙四段	107.5	-2.3	3.87	33.46	2 381.58	1.37
	义 171	3 518.00	沙四段	108.6	-4.8	7.59	33.51	2 617.14	1.28
	义 171	3 483.20	沙四段	102.1	-6.1	9.34	34.17	2 431.43	1.41
	义 171	3 483.20	沙四段	103.8	-6.0	9.21	34.01	2 480.00	1.37
	义 100	2 706.80	沙三段	103.5	-3.2	5.26	33.89	2 276.32	1.45
	义 32	2 970.67	沙三段	108.7	-3.2	5.26	33.40	2 620.00	1.28
	义 32	2 970.67	沙三段	110.4	-3.4	5.56	33.26	2 668.57	1.25
	义 46	2 915.78	沙三段	102.3	-11.2	15.17	34.39	2 437.14	1.41
	南部缓坡带	义 113	3 014.70	沙三段	100.5	-1.2	2.07	34.06	2 385.71
义 126		3 174.55	沙四段	95.4	-0.8	1.40	34.53	2 240.00	1.51
义 129		2 510.50	沙四段	96.5	-4.8	7.59	34.61	2 271.43	1.52
罗 65		2 396.70	沙四段	112.6	-2.4	4.03	32.99	2 515.79	1.27
罗 651		2 243.50	沙四段	125.7	-4.5	7.17	31.96	2 860.53	1.09
罗 9		2 213.90	沙四段	118.0	-7.0	10.49	32.83	2 657.89	1.20

复杂性。

利用 Bodnar 冷冻温度—盐度换算法笔者计算了所测包裹体的盐度,计算结果表明包裹体中的盐度为 1.06%~15.17%,绝大多数的包裹体盐度小于 10%。构造带上,包裹体盐度差异明显,位于渤南深洼带的义 46 井沙三段储层包裹体的盐度最高,盐水包裹体的盐度高达 15.17%,其次为深洼带的新渤深 1 井,而含盐度较低的包裹体则分布在北部陡坡带(表 1)。

3 油气藏形成时期与压力恢复

3.1 油气藏形成时间和期次

根据渤南洼陷流体包裹体均一温度和单井埋藏史的特征,结合烃源岩的生烃史笔者明确了该区油气藏的形成时间与期次。考虑构造带和层系的差异,本文选取渤南洼陷 4 口典型井进行介绍。义 171 井位于渤南洼陷中心,沙四段储层盐水包裹体的均一温度存在 70~80 °C 和 95~110 °C 两个温度区间,显示出东营组早期至东营组末期(距今 28~25 Ma)和馆陶组沉积末期至今(距今 8~0 Ma)两期成藏的特

征,且以后期成藏为主(图 5a)。同样位于洼陷区的义 46 井,沙三段储层包裹体的均一温度主要为 90~115 °C,具有明化镇初期至今(距今 5~0 Ma)一期成藏的特征,时间上略晚于沙四段油藏的形成时间(图 5b)。义 117 井位于北部陡坡带,沙三段储层包裹体均一温度为 110~130 °C,为明化镇沉积中后期至今(距今 3~0 Ma)的一期成藏(图 5c),比渤南深洼带的沙三段油藏的形成时间略晚,显示出沙三段油气充注序列的差异。而位于南部缓坡带的义 125 井,沙三段储层流体包裹体均一温度为 80~105 °C,为明化镇期至今(距今 5~0 Ma)的一期成藏(图 5d),油气成藏时间跨度大于北部陡坡带。

笔者对研究区 20 口单井的成藏期综合分析后发现,渤南洼陷油气藏的形成存在两个阶段:东营组早期至东营运动之前(距今 28~25 Ma)为第一阶段,该时期仅有沙四段烃源岩在深洼带进入生烃状态,并在原地聚集形成少量沙四段油藏(如义 170 井区、新渤深 1 井区);第二阶段为馆陶组沉积末期至今(距今 8~0 Ma),受新地层沉积的影响,沙四烃源岩先进入二次生烃门限,开始大量生成油气,以油为主,而沙三段烃源岩在明化镇中期(距今 5 Ma)才进

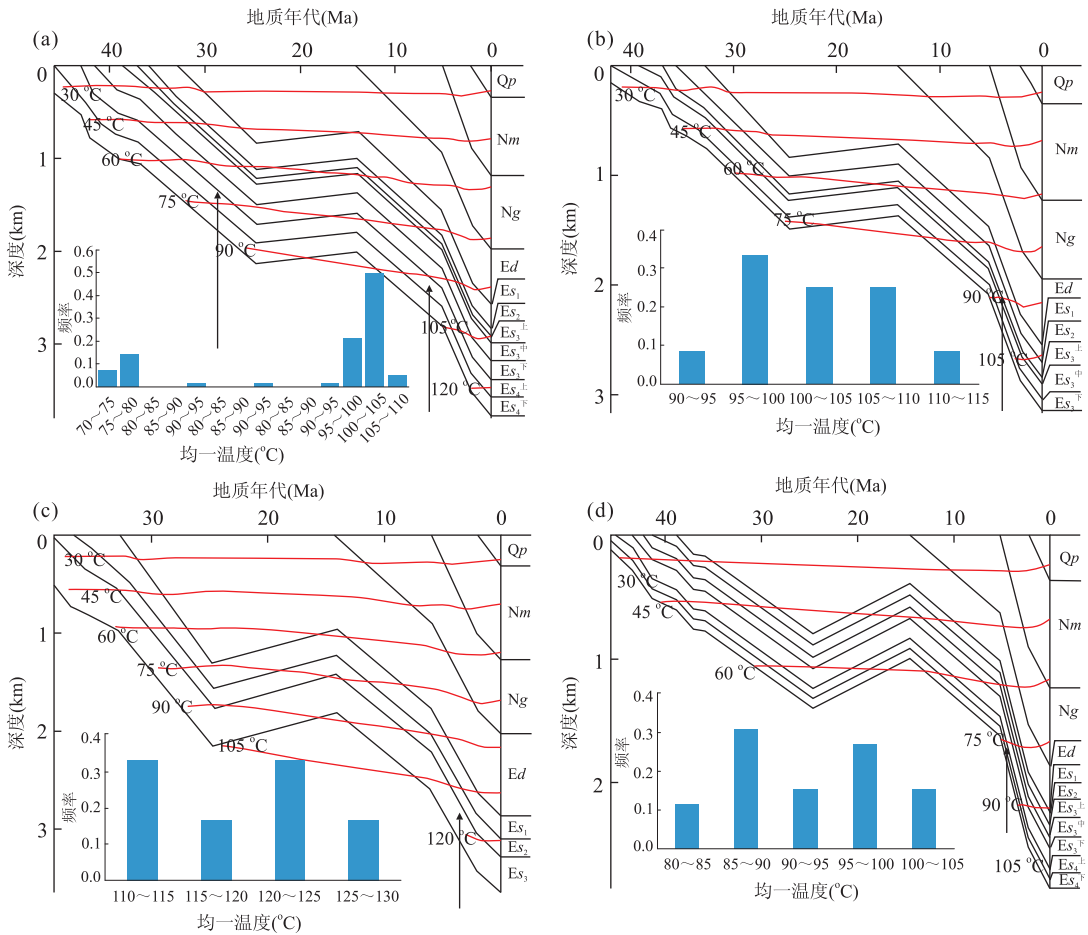


图 5 渤南洼陷典型井主力储层油气充注时间判定图

Fig. 5 Accumulation period of main reservoirs in typical well of the Bonan sag

a. 义 171 井沙四段; b. 义 46 井沙三段; c. 义 117 井沙三段; d. 义 125 井沙三段

入大规模生排烃期,石油发生聚集成藏.因此,渤南洼陷的沙四段油藏具有两期充注过程,而沙三段油藏则表现为明化镇沉积时期至今的一期成藏.受生烃能力与范围的影响,明化镇中期至今对应着研究区两套烃源岩的大规模排烃期,是研究区古近系油藏大规模形成的主要时期(图 6).

3.2 成藏期地层压力的恢复

渤南洼陷古近系油气藏多与生烃层系对应,为自生自储型油气藏(宋国奇等,2014),储层物性相对较差,成藏期地层剩余压力的恢复对于明确油气充注动力条件意义重大.应用流体包裹体恢复古压力的方法有很多,每种方法具有不同的适用范围(Zhang and Frantz, 1987;李昌存等,1999;陈勇等,2006),根据研究区储层流体包裹体的特征,笔者主要利用包裹体均一温度及冰点测试结果,选择 Zhang and Frantz(1987)提出的等容式(式 1)计算地层压力.该方法计算得到的是均一压力,即压力的下限值,流体包裹体的捕获压力比其均一压力高

6 MPa(米敬奎等,2003).

$$P = A_1 + A_2 \times T, \tag{1}$$

其中:

$$A_1 = 6.1 \times 10^{-3} + (2.385 \times 10^{-1} - a_1) \times T_h - (2.855 \times 10^{-3} + a_2) \times T_h^2 - (a_3 \times T + a_4 \times T_h^2) \times m, \tag{2}$$

$$A_2 = a_1 + a_2 \times T_h + 9.888 \times 10^{-6} \times T_h^2 + (a_3 + a_4 \times T_h) \times m, \tag{3}$$

式中, P 为压力, 10^{-1} MPa; T 为捕获温度, $^{\circ}\text{C}$ (比均一温度高 15°C); a_1, a_2, a_3, a_4 为常数,对于 $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系, $a_1 = 2.848 \times 10^1, a_2 = -6.445 \times 10^{-2}, a_3 = -4.159 \times 10^{-1}, a_4 = 7.438 \times 10^{-3}$; T_h 为均一温度, $^{\circ}\text{C}$; m 为盐类质量摩尔浓度, mol/kg, 与盐度 $w(\%)$ 的换算公式为 $m = 1\,000 \times w / [58.5 \times (100 - w)]$.

油气藏形成时期的地层流体压力恢复结果表明,渤南洼陷沙三段、沙四段在油气充注期普遍发育超压,超压值在不同构造位置和层系存在明显差异

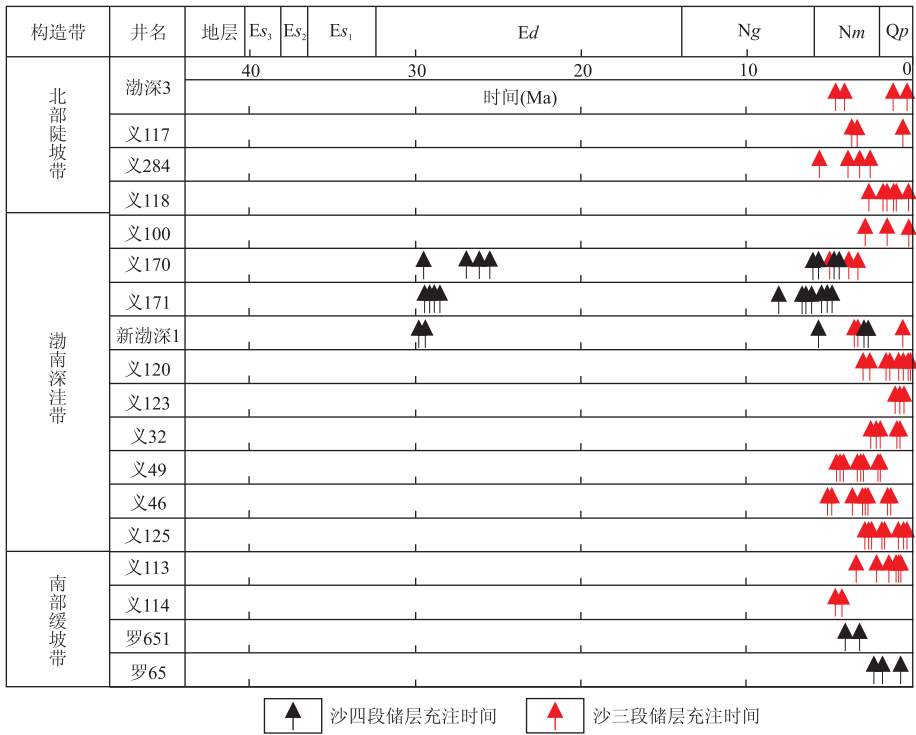


图 6 渤南洼陷沙三段、沙四段储层油气充注时间标定

Fig. 6 Hydrocarbon charging period for Es₃ and Es₄ reservoirs in the Bonan sag

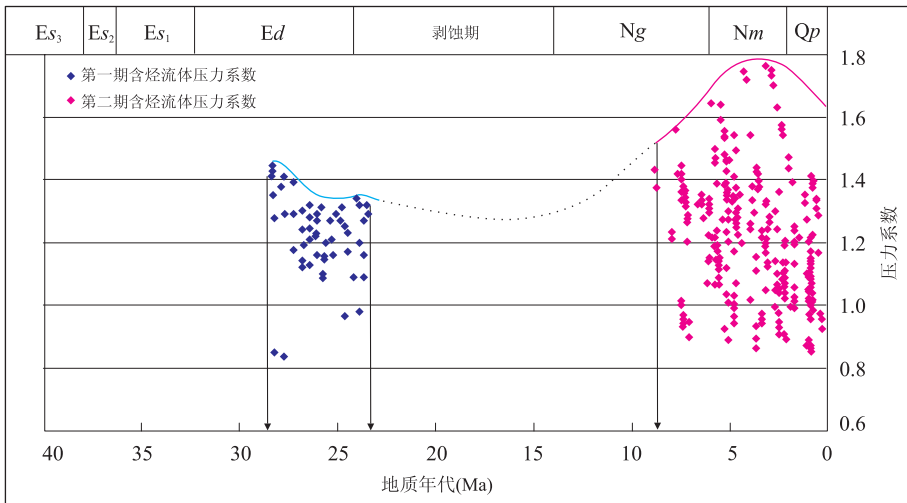


图 7 渤南洼陷主力储层油气充注期地层压力系数演化

Fig. 7 Paleopressure coefficient of main reservoirs during charging periods in the Bonan sag

(表 1). 超压最高值对应于洼陷中心沙四段的二次成藏时期. 例如, 新渤深 1 井的沙四段流体包裹体, 均一温度对应第二期油气充注范围, 压力系数高达 1.55; 洼陷区的沙三段地层压力系数略低于同期的沙四段地层压力系数, 如新渤深 1 井的沙三段包裹体, 与沙四段第二期大致相同时间段的压力系数为 1.34(表 1). 同一期压力恢复的结果表明, 同一层系的地层压力系数最高值位于深洼带, 其次为南部缓

坡带, 而北部陡坡带的压力系数则最低.

综上所述, 渤南洼陷油气藏形成时间段(距今 28~25 Ma 和距今 8~0 Ma)对应的地层压力存在差异(图 7). 第一期油气充注时, 烃源岩的埋深和生烃量均小于油气成藏的第二期, 且仅沙四段烃源岩进入生烃门限, 生烃增压幅度不大, 所测的流体压力系数最高为 1.48. 东营组末期构造运动(距今 24~14 Ma)后, 重新接受沉积, 距今 8 Ma 时沙四段烃源

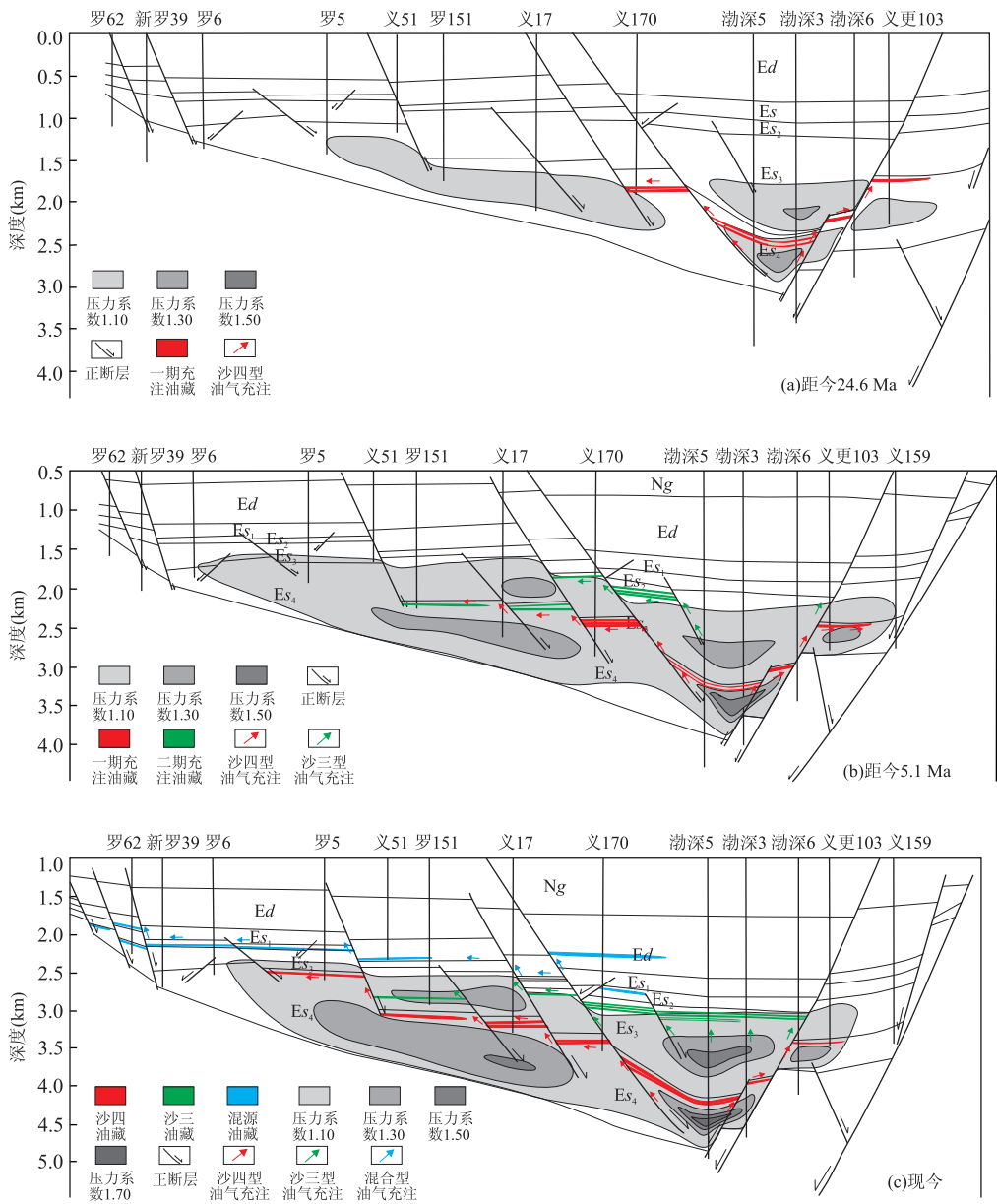


图 8 渤南洼陷油气成藏期超压演化与油气充注过程模式

Fig. 8 Overpressure evolution and charging process model during charging periods, Bonan sag

岩开始二次生烃,生烃作用对地层超压的贡献逐渐增加,沙三段、沙四段地层压力持续增大、超压发育范围不断扩大,地层压力系数在明化镇中期高达 1.80,大大超越了第一期油气成藏对应的流体压力系数。由于流体包裹体恢复的是储层流体压力,超压是烃源岩压力传递的结果,因此,笔者推测古近系两套烃源岩系的泥岩压力系数更大,可为烃源岩层系内致密储层的油气聚集发挥驱动作用,形成油气聚集。

3.3 成藏期流体压力与油气运聚特征

针对研究区油气藏的形成期次,笔者利用平衡剖面法对油气藏形成时期(距今 24.6 Ma 和

5.1 Ma)的典型构造剖面进行了恢复,并将该时期恢复的地层流体压力以及油气分布进行了标定,以便明晰研究区在地质历史时期油气藏的充注序列和充注动力的演化规律。其中,油气运移时期的流体压力对应着古压力恢复的大小,而现今的压力分布则以实测地层流体压力来确定。

东营构造运动前期(距今 24.6 Ma),渤南洼陷中心的沙四段烃源岩已进入生烃期,由于生烃量较小,油气仅在洼陷中心的沙四段储层中近距离运移、聚集。该时期两套地层均存在地层异常高压,但是成因不同,沙四段为欠压实和生烃增压两种增压机制,而沙三段仅以欠压实作用增压。沙四段的油气在剩

余压力的驱动下发生运移,受上覆沙三段异常流体压力的围限,油气多分布于沙四段顶部的储层中(图 8a)。明化镇初期(距今 5.1 Ma),沙三段、沙四段烃源岩均进入二次生烃门限,开始大量生成油气,地层压力持续升高,沙四段生成的油气在剩余压力的驱动下以及沙三段异常压力的围限下,继续沿顶部向周围发生运移、聚集。沙三段地层在剩余流体压力的驱动下,向上部地层运移,受生烃量的限制,油气的分布以洼陷中心为主,远距离运移较少(图 8b)。随着生烃的持续进行,剩余压力的幅度和范围逐渐增加,油气动力变得越来越充足,油气的运移范围也逐渐向南部缓坡带扩大,此时洼陷中心区的剩余压力可导致部分断裂的开启,为沙三段、沙四段烃源岩所生成的油气起到了纵向沟通的作用,油气在断层附近的储层聚集形成混源油藏(图 8c)。

4 结论

(1) 渤南洼陷古近系沙三段、沙四段储集岩发育大量的烃类包裹体,分布于穿石英颗粒裂缝以及石英次生加大边中,呈线状、串珠状或独立状分布。透射光下,烃类包裹体多呈浅褐色、无色;荧光下,存在黄色、黄白、黄绿、蓝绿色等多种荧光颜色,显示出充注烃类成熟度的差异。与烃类包裹体共生的盐水包裹体的均一温度分布范围较广,其中沙四段储层的流体包裹体均一温度存在 70~80 °C 和 90~130 °C 两个温度区间,显示为两期成藏的特征;沙三段储层的流体包裹体均一温度呈单峰形态,显示出一期成藏。

(2) 成藏期分析表明,渤南洼陷沙四段油藏为东营组沉积早期至东营组末期(距今 28~25 Ma)和明化镇初期至今(距今 8~0 Ma)两期形成;沙三段油藏为明化镇沉积时期至今(距今 5~0 Ma)一期成藏,明化镇中期至今是研究区古近系油气藏大规模形成的主要时期。

(3) 渤南洼陷油气藏形成时期均存在明显的地层超压;东营组沉积末期,沙四段储层流体压力系数为 1.48,由于生烃增压贡献较小,超压中心仅分布于洼陷中心区;明化镇时期,受生烃增压的影响,主力储层的压力系数明显增加,深洼带的沙四段储层流体压力系数可达 1.80,为洼陷区油气的大规模充注提供了充足的动力条件。

致谢:衷心感谢两位匿名审稿人对本文的审阅以及提出的宝贵意见!

References

- Bourdet, J., Pironon, J., Levresse, G., et al., 2009. Petroleum Accumulation and Leakage in a Deeply Buried Carbonate Reservoir, Nispero Field (Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 27: 126–142. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.07.003
- Chen, H. H., Dong, W. L., Zhang, S. L., et al., 2002. Application of Fluid Inclusion in Paleopressure Modelling Research. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 207–211 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Zhou, Y. Q., Ni, P., 2006. A New Method for Measurement of Internal Pressure of Inclusions CO₂-Raman Spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 25(3): 211–214 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Liu, G. D., Lu, X. J., et al., 2015. Using Fluid Inclusions to Study Hydrocarbon Charging Characteristics of Reservoirs: A Case Study from Erlian Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(1): 60–70 (in Chinese with English abstract).
- Fu, M. Y., Liu, F., Deng, H. C., et al., 2015. Hydrocarbon Charging Period of Cretaceous Reservoirs in AHDEB Oil Field; Evidence from Fluid Inclusion. *Earth Science*, 40(7): 1187–1196 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. L., Liu, H., Zhang, L., et al., 2003. Analysis of Petroleum Accumulation Phase in Dongying Sag. *Oil & Gas Geology*, 24(3): 215–218 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. C., Han, X. L., Zou, J. X., 1999. Study on Fluid Inclusion of Luanmuchang Gold Deposit. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(1): 55–57 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Zha, M., 2010. Determination of Oil Accumulation Period and Building up of Paleopressure of Wumishan Formation in Renqiu Oilfield by Using Fluid Inclusion. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 34(4): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. X., Xi, S. L., Di, L. J., 2006. Oil/Gas Reservoiring Phase Determined through Petrographic Analysis of Hydrocarbon Inclusions in Reservoirs Taking Longdong Oilfield, Ordos Basin as an Example. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 194–199 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y., Ren, Z. L., Wang, Y. L., et al., 2011. Characteristics of Fluid Inclusions and Reservoiring Phases in the Yanchang Formation of Zichang Area, the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 32(2): 182–191 (in Chinese with English abstract).

- Liang, Z. Z., Yuan, B., 2014. Fluid Inclusions Characteristics of Wendong Oilfield in Dongpu Depression and Its Significances on Hydrocarbon Accumulation. *Journal of China University of Mining & Technology*, 43(3): 458—463 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Zheng, H. R., Ren, J. Y., et al., 2003. Syndepositional Faults on Sedimentary Filling Control in Paleogene of Dongying and Zhanhua Depression in Bohai Bay Basin. *Science in China (Series D)*, 33(11): 1025—1036 (in Chinese).
- Liu, B., Shen, K., 1999. Fluid Inclusion Thermodynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, C. Y., Yan, X. B., Xu, X. H., et al., 2008. Application of Fluid Inclusion to the Study of Hydrocarbon Charge History of the South Slope in the Huimin Sag. *Oil & Gas Geology*, 29(4): 507—510 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. H., 1995. Fluid Inclusion Studies—An Effective Means for Basin Fluid Investigation. *Earth Science Frontiers*, 2(3—4): 149—154 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. Y., Bourdet, J., Zhang, B. S., et al., 2013. Hydrocarbon Charge History of the Tazhong Ordovician Reservoirs, Tarim Basin as Revealed from an Integrated Fluid Inclusion Study. *Petroleum Exploration and Development*, 40(2): 171—180 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. B., Gu, J. Y., 1997. Application of Fluid Inclusions to Petroleum Geological Study and Discussion. *Oil & Gas Geology*, 18(4): 326—331 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. H., Feng, M. Y., Luo, J. L., et al., 2010. Characteristics of Fluid Inclusions in Reservoirs in the Eighth Member of the Shihezi Formation and the First Member of the Shanxi Formation in Uxin Ju Area, the Ordos Basin and Their Significance. *Oil & Gas Geology*, 31(3): 360—366 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusions. Science & Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Mi, J. K., Xiao, X. M., Liu, D. H., et al., 2003. Calculation to Trapping Pressure of Inclusions Occurring in Upper Paleozoic Sandstone Reservoir from the Ordos Basin Using PVTsim Method. *Science in China (Series D)*, 33(7): 679—685 (in Chinese).
- Pan, C. C., Zhou, Z. Y., Xie, Q. L., 1996. Hydrocarbon Inclusions Implications to Petroleum Geology and Geochemistry. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(4): 15—23 (in Chinese with English abstract).
- Ping, H. W., Chen, H. H., Régis, T., et al., 2014. Effects of Oil Cracking on Homogenization Temperature and Trapping Pressure of Oil Inclusion and Its Geological Significance. *Earth Science*, 39(5): 587—599 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Jin, Z. J., Hu, W. X., 2000. Study on the Hydrocarbon Charge History in Dongying Depression by Evidence from Fluid Inclusions. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 24(4): 95—97 (in Chinese with English abstract).
- Samson, I., Anderson, A., Marshall, D., 2003. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada Publications, Québec.
- Shi, B. H., Zhang, Y., Zhang, L., et al., 2015. Dating of Hydrocarbon Accumulation by Fluid Inclusion Characteristics in the Chang 9 of Yanchang Formation in Jiyuan Area, the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 17—22 (in Chinese with English abstract).
- Song, G. Q., Liu, H., Jiang, Y. L., et al., 2014. Genetic Types and Distribution Characteristics of Crude Oils from Shahejie Formation in Bonan Subbasin, Zhanhua Sag, Jiyang Depression. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(1): 33—38 (in Chinese with English abstract).
- Tao, S. Z., 2006. Sequence of Diagenetic Authigenic Mineral, the Basis of Timing the Inclusions Formation in Sedimentary Rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 33(2): 154—160 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Frantz, J. D., 1987. Determination of the Homogenization Temperature and Densities of Supercritical Fluids in the System NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O Using Synthetic Fluid Inclusions. *Chemical Geology*, 64(3—4): 335—350. doi:10.1016/0009-2541(87)90012-X
- Zhang, Y. J., Cao, J., Hu, W. X., 2010. Timing of Petroleum Accumulation and the Division of Reservoir-Forming Assemblages, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 257—262 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H., Luo, X. R., Zhang, L. K., et al., 2015. A Sign to the Multi-Phase Hydrocarbon Charge and Adjustment: Fluid Inclusion Study from the Sangonghe Formation in the No. 1 Block, the Middle Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 26(3): 466—476 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. J., Chen, H. H., 2008. The Relationship Between Fluorescence Colors of Oil Inclusions and Their Maturities. *Earth Science*, 33(1): 91—96 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

附中文参考文献

- 陈红汉,董伟良,张树林,等,2002. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用. 石油与天然气地质,23(3): 207-211.
- 陈勇,周瑶琪,倪培,2006. 一种获取包裹体内压的新方法——二氧化碳拉曼光谱法. 岩矿测试,25(3): 211-214.
- 陈哲龙,柳广弟,卢学军,等,2015. 应用流体包裹体研究储层油气充注特征——以二连盆地为例. 天然气地球科学,26(1): 60-70.
- 伏美燕,刘榘,邓虎成,等,2015. AHDEB 油田白垩系油藏油气充注期次的流体包裹体证据. 地球科学,40(7): 1187-1196.
- 蒋有录,刘华,张乐,等,2003. 东营凹陷油气成藏期分析. 石油与天然气地质,24(3): 215-218.
- 李昌存,韩秀丽,邹继兴,1999. 栾木场金矿石英流体包裹体及成矿预测. 矿物岩石,19(1): 55-57.
- 李静,查明,2010. 基于流体包裹体的任丘油田雾迷山组成藏期次确定与古压力恢复. 中国石油大学学报(自然科学版),34(4): 38-43.
- 李荣西,席胜利,邸领军,2006. 用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例. 石油与天然气地质,27(2): 194-199.
- 梁宇,任战利,王彦龙,等,2011. 鄂尔多斯盆地子长地区延长组流体包裹体特征与油气成藏期次. 石油与天然气地质,32(2): 182-191.
- 梁正中,袁波,2014. 东濮老区文东油田流体包裹体特征及成藏意义. 中国矿业大学学报,43(3): 458-463.
- 林畅松,郑和荣,任建业,等,2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制. 中国科学(D辑),33(11): 1025-1036.
- 刘斌,沈昆,1999. 流体包裹体热力学. 北京:地质出版社.
- 刘超英,闫相宾,徐旭辉,等,2008. 应用流体包裹体研究惠民凹陷南斜坡油气充注史. 石油与天然气地质,29(4): 507-510.
- 刘德汉,1995. 包裹体研究盆地流体追踪的有力工具. 地学前缘,2(3-4): 149-154.
- 刘可禹,Bourdet,J.,张宝收,等,2013. 应用流体包裹体研究油气成藏——以塔中奥陶系储集层为例. 石油勘探与开发,40(2): 171-180.
- 柳少波,顾家裕,1997. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论. 石油与天然气地质,18(4): 326-331.
- 刘小洪,冯明友,罗静兰,等,2010. 鄂尔多斯盆地乌审召地区盒 8、山 1 段储层流体包裹体特征及其意义. 石油与天然气地质,31(3): 360-366.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等,2004. 流体包裹体. 北京:科学技术出版社.
- 米敬奎,肖贤明,刘德汉,等,2003. 利用储层流体包裹体的 PVT 特征模拟计算天然气藏形成的古压力——以鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏为例. 中国科学(D辑),33(7): 679-685.
- 潘长春,周仲毅,解启来,1996. 油气和含油气包裹体及其在油气地质和地球化学研究中的意义. 沉积学报,14(4): 15-23.
- 平宏伟,陈红汉,Régis,T.,等,2014. 原油裂解对油包裹体均一温度和捕获压力的影响及其地质意义. 地球科学,39(5): 587-599.
- 邱楠生,金之钧,胡文喧,2000. 东营凹陷油气充注历史的流体包裹体分析. 中国石油大学学报(自然科学版),24(4): 95-97.
- 时保宏,张艳,张雷,等,2015. 运用流体包裹体资料探讨鄂尔多斯盆地姬塬地区长 9 油藏史. 石油与天然气地质,36(1): 17-22.
- 宋国奇,刘华,蒋有录,等,2014. 沾化凹陷渤南洼陷沙河街组原油成因类型及分布特征. 石油实验地质,36(1): 33-38.
- 陶士振,2006. 自生矿物序次是确定包裹体期次的根本依据. 石油勘探与开发,33(2): 154-160.
- 张义杰,曹剑,胡文瑄,2010. 准噶尔盆地油气成藏期次确定与成藏组合划分. 石油勘探与开发,37(3): 257-262.
- 赵洪,罗晓容,张立宽,等,2015. 准噶尔盆地中部 1 区块三工河组流体包裹体特征及对油气多期充注——调整过程的指示. 天然气地球科学,26(3): 466-476.
- 赵艳军,陈红汉,2008. 油包裹体荧光颜色及其成熟度关系. 地球科学,33(1): 91-96.