

文章编号:0253-9985(2011)06-832-07

渤海海域石臼坨凸起东段36-3构造古近系沙二段储集层特征及控制因素

刘志刚,周心怀,李建平,赖维成,杜晓峰,程建春,王清斌

[中海石油(中国)有限公司天津分公司 勘探开发研究院,天津 300452]

摘要:利用岩心描述、常规薄片、铸体薄片和扫描电镜等化验分析资料,结合常规物性及勘探情况,对沙河街组二段储集层特征进行了系统分析,对储集物性、储集空间类型以及储层物性控制因素进行了深入的探讨。研究认为研究区沙河街组二段储集层为混积岩,岩性以生屑云岩为主,夹薄层砂砾岩;储层物性非常好,平均孔隙度为27.6%,平均渗透率为 $442 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层类型为高孔-高渗型;储集空间以原生孔隙和次生孔隙为主,原生孔隙多为粒间孔和生物体腔孔。研究发现,沉积作用和成岩作用是控制储集层物性的两个主要的因素,其中溶解作用和白云石化作用是造成现今优质储集空间的主要原因。同时指出了优质储层的分布规律,认为沙河街组二段中发现的生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩储层是油气富集场所,是今后有利勘探区。

关键词:储集层特征;控制因素;沙河街组;石臼坨凸起;渤海海域

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Reservoir characteristics and controlling factors of the Paleogene Sha-2 member in 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift, Bohai Sea

Liu Zhigang, Zhou Xinhui, Li Jianping, Lai Weicheng, Du Xiaofeng, Cheng Jianchun, Wang Qingbin

(Exploration and Development Research Institute, CNOOC Tianjin Branch, Tianjin 300452, China)

Abstract: Various data including core description, conventional thin sections, casting thin sections and SEM, in combination with conventional physical properties of reservoirs and exploration results, were used to systemically analyze reservoir poroperm characteristics, reservoir space types and influencing factors of reservoir properties of the 2nd member of Shahejie Formation. The study indicates that Shahejie Formation reservoirs are mixed carbonate/siliciclastic rocks dominated by bioclastic dolostone with thin sandy conglomerate interbeds. The poroperm characteristics are very good, with average porosity of 27.6% and permeability of $442 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The reservoir spaces are dominated by primary pores (mostly intergranular pores and skeletal pores) and secondary pores. Sedimentation and diagenesis are the two key factors controlling the physical properties of reservoirs. Dissolution and dolomitization contribute to high quality reservoir spaces. In addition, the distribution of high quality reservoirs is also delineated. It is believed that dolostone reservoirs are favorable for hydrocarbon accumulation, thus are potential exploration targets in the future.

Key words: reservoir characteristics, controlling factor, Shahejie Formation; Shijiutuo uplift, Bohai Sea

1 区域背景

石臼坨凸起南邻渤海海域最大的生烃凹

陷——渤中凹陷。石臼坨凸起油气勘探始于20世纪70年代初期,1976年在QHD32-6构造上钻BZ4井,并于新近系明化镇组见10.4 m厚的油层^[1]。20世纪80—90年代,曾有多家外国公司

收稿日期:2011-06-15。

第一作者简介:刘志刚(1980—),男,工程师,沉积储层。

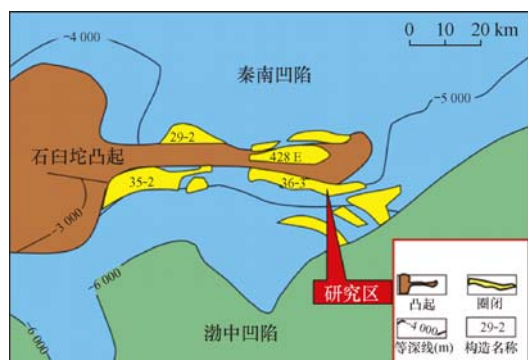


图1 石臼坨凸起东段36-3构造位置

Fig. 1 Location of 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift

对石臼坨凸起进行了不同程度的研究,还投入了大量资金进行地震和钻井作业。然而面对海洋石油勘探高投入、高风险的特点和渤海海域十分复杂的地质条件,这些公司最终都先后放弃了在该区的勘探。但是在渤海石油勘探者的努力下,近年来相继在石臼坨凸起东倾末端发现了35-2、36-3、29-2等一批构造,通过钻探获得了成功^[2]。渤中凹陷沙河街组埋深普遍超过3 000 m,受埋深、成岩作用等因素的影响,储层物性普遍较差,储层的储集性能成为制约油气成藏的关键,因此储层的研究对于中深层油气勘探具有重要的意义。

36-3构造位于渤海海域石臼坨凸起东段(图1),经过钻井、测试证实该区油气显示好,并且日产油超过300 m³/d,成为今后勘探开发的重点区带,可是之前很少有人对其进行储集层方面的研究。为了今后该区的勘探及开发,本文以36-3构造为研究对象,对储集层进行系统分析,对储集物性、储集空间类型以及储层物性控制因素进行了详细的分析,并找出了高孔高渗的主要原因,指出了影响物性的主要控制因素,最后指出了有利的勘探方向,为该区今后的勘探开发提供有利的理论依据。

2 储集层特征

2.1 岩石学特征

根据取心段岩心描述及薄片观察,在研究区古近系沙河街组二段储集层中,能构成储集体的岩石主要为混积岩。

混积岩是陆源碎屑和碳酸盐颗粒混生在一起的沉积岩,属于碳酸盐岩和陆源碎屑岩之间的过渡

类型。对于混积岩的分类及成因,很多学者之前都做过大量的研究工作^[3-6],并且对混积岩的混合沉积特征、成因类型及沉积作用等方面也做了相关的详细研究^[7-11]。根据张雄华的分类标准:①以碳酸盐为主,陆源碎屑含量为5%~25%的混积岩,称为含陆源碎屑-碳酸盐混积岩;②以碳酸盐为主,陆源碎屑含量为25%~50%的混积岩,称为陆源碎屑质-碳酸盐混积岩;③以陆源碎屑为主,碳酸盐颗粒含量为5%~25%的混积岩,称为含碳酸盐-陆源碎屑混积岩;④以陆源碎屑为主,碳酸盐颗粒含量为25%~50%的混积岩,称为碳酸盐质-陆源碎屑混积岩。通过对36-3构造取心段的分析,结果表明36-3构造沙河街组二段取心段主要以含陆源碎屑的碳酸盐岩为主,部分样品陆源碎屑较高,混积特征明显。

生物碎屑是36-3构造沙河街组二段储层分布最广和最为发育的类型之一,通过对85块岩心铸体薄片的资料统计,共计81块为生屑云岩,高达95%,生屑云岩有亮晶含鲕粒生屑云岩、亮晶生屑云岩、亮晶陆屑生屑云岩、亮晶鲕粒生屑云岩等。陆屑主要为细砂级的石英、长石及岩屑颗粒,颗粒多作为鲕核存在。岩石组构主要包括鲕粒、生屑及亮晶、泥晶胶结物。大量鲕粒均匀分布,鲕核多为陆屑,部分被泥晶白云石所交代。大量亮晶、泥晶白云石较均匀孔隙式充填于粒屑间(图2a)。鲕粒主要为薄皮鲕,鲕核主要为陆源碎屑,重结晶主要分布于生物壳体溶蚀孔内,沿孔壁白云石重结晶呈栉壳状。岩石孔隙发育较好,主要为粒内孔及少量粒间孔,见少量构造缝,粒内孔主要为生物体腔孔、铸模孔及鲕壳被溶蚀形成的孔隙,粒间孔为粒间部分泥晶白云石被溶蚀形成的孔隙,较集中分布,连通性中等(图2b)。生物屑主要为腹足类及介形类生物碎片,部分腹足类保存较完整(图2c)。粒内溶孔、鲕模孔、鲕圈层间溶孔和粒间溶孔发育(图2d),具有很好的储集性能。

2.2 物性特征

根据研究区36-3-2井的156块岩心物性资料统计(图3),结果表明物性主要分布在高孔-高渗区间(红色),高孔隙的特征极为明显,平均孔隙度为27.6%,最大孔隙度为40.1%,平均渗透率为442×10⁻³ μm²,最高渗透率为2 530.4×10⁻³ μm²。在渤海地区埋深超过3 700 m很少见

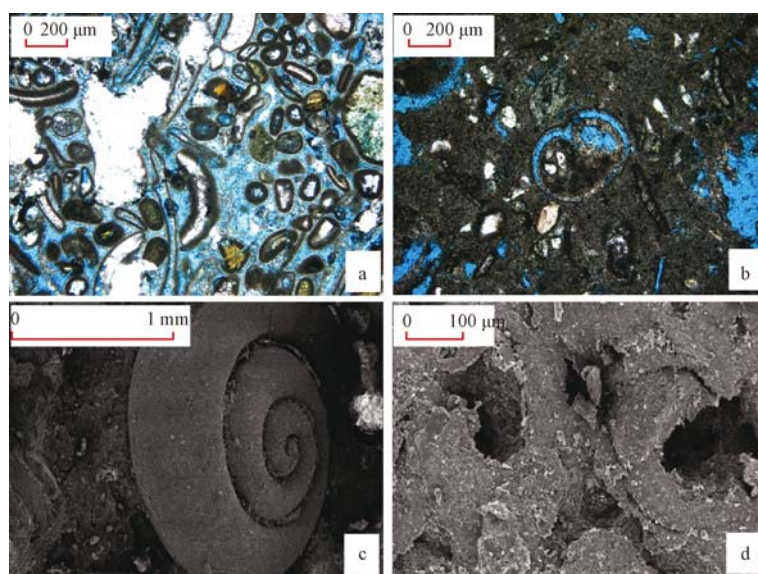


图2 石臼坨凸起东段36-3构造储集层特征

Fig. 2 Reservoir characteristics of 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift

a. 鲕粒均匀分布, 鲕核多为陆屑, 部分被泥晶白云石所交代, 36-3-2井, 3 779.58 m, 铸体薄片; b. 粒内孔主要为生物体腔孔、铸模孔及鲕壳被溶蚀形成的孔隙, 36-3-2井, 3 764.2 m, 铸体薄片; c. 生物壳体发育, 见较完整腹足类化石, 3 777.7 m, 扫描电镜; d. 生物体腔孔、溶蚀孔发育, 3 775.25 m, 扫描电镜

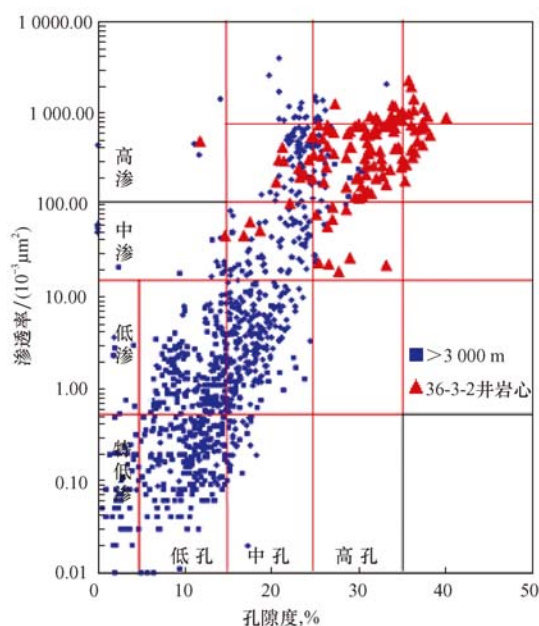


图3 石臼坨凸起东段36-3-2井沙河街组储层物性分布

Fig. 3 Reservoir physical properties of the Shahejie Formation of 36-3-2 well, Eastern Shijiutuo uplift

到这么好的物性。经过对岩心的仔细观察和描述, 并对岩心进行铸体薄片分析和扫描电镜分析, 资料表明该取心段主要为生物碎屑, 含有大量的鲕粒、腹足类化石等生物碎片, 因此可以判断生物体腔孔及相关溶蚀孔是高孔隙、高渗透率的主要原因。

研究区古近系沙河街组二段从下往上可以根据沉积微相划分为3个小层(图4)。最底部岩性为砂屑灰岩, 渗透率最大值为 $62.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度最大值为21.6%, 为好储层。中部岩性为泥岩、白云质泥岩, 该段自然伽马值较高, 是非储层, 未对其孔渗进行解释。上部岩性为厚层的含螺生屑白云岩、含鲕粒砂屑云岩夹薄层砂砾岩, 孔隙度最大值为40.1%, 渗透率最大值为 $2\,350.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 是非常好的储层, 并且油气显示非常好。通过储集岩和储集空间分布、物性统计及勘探情况可知, 储层质量在纵向上有较大差异, 顶部储集层质量最好, 生屑云岩、鲕粒砂屑云岩中的粒间溶蚀孔、体腔孔、生屑溶蚀孔极度发育的地方储集层质量随之也越好。

2.3 储集空间类型

通过对取心段的岩心描述、铸体薄片、扫描电镜等资料研究认为, 石臼坨凸起东倾末端古近系沙河街组二段混积岩储集空间以原生孔隙和次生孔隙为主, 很少见晶间孔和晶内孔, 构造缝和成岩缝也不发育。原生孔隙多为粒间孔和生物体腔孔, 溶蚀孔隙多为粒间溶蚀孔、鲕粒铸模孔、生屑铸模孔、非组构溶孔, 粒内溶蚀孔和颗粒铸模孔发育一般, 溶蚀缝发育也一般。经岩心铸体薄片分

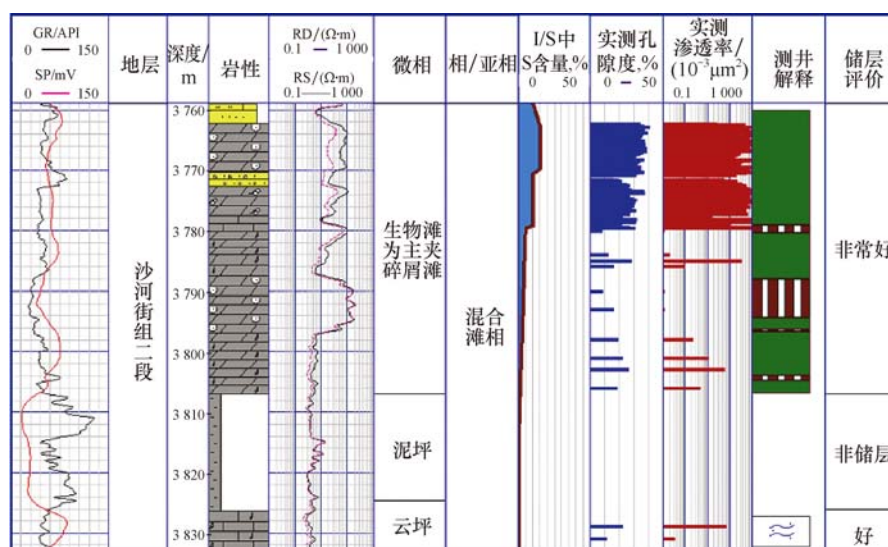


图4 石臼坨凸起东段36-3-2井古近系沙河街组二段沉积储层综合评价

Fig. 4 Comprehensive evaluation of sedimentation and reservoir quality in the Paleogene Sha-2 of 36-3-2, well Eastern part of Shijiutuo uplift

析化验资料统计:粒间孔占53%,生物体腔孔及生屑溶蚀孔占47%,面孔率一般为17%~36%,平均为26.5%。

3 储层物性控制因素

断陷盆地的储集层物性受原始沉积条件、后期成岩改造及构造作用等多种因素的影响。在储集层形成与演化过程中,沉积作用不仅控制储集岩体的大致分布与层位,还影响着储集层的基本形态和所经历的成岩作用类型及强度,是控制储集层发育的主导因素^[12];成岩作用决定了储集层内部储集空间特征和储集性能^[13];构造作用是重要的改造储集层因素。36-3构造沙河街组二段储集层物性主要的影响因素为沉积作用和成岩作用,沉积作用是先天条件,成岩作用是后天因素,两者综合影响着储集层的物性变化,沉积作用占据主导地位。

3.1 沉积作用

研究区古近系沙河街组二段发育大量的棒藻属和麻黄粉属,棒藻属是典型的微咸水湖泊藻类代表,因此,该区沙河街组二段沉积时期是微咸水湖泊环境。同时大量的麻黄粉属也说明沙河街组二段沉积时期具有温暖的气候条件,中生广温分子在所有分子中数量最多,并且大量的浅水藻类在沙河街组二段沉积时期也很丰富,因此当

时的气候环境有利于形成湖相碳酸盐岩储集层。有利于形成生物滩和鲕粒生屑云岩发育在滨浅湖地带,而且位于湖基面附近的正地形的水下隆起,这里光照适宜,富营养盐,较强的水动力条件可将生物介壳打碎、淘洗,使生物颗粒或鲕粒间的灰泥基质被淘净,形成大量的生物体腔孔和粒间孔,成为可以保留到现在的有效储集空间。近岸、陡坡、物源供应间歇性的波浪消能带,最适合发育混合滩,36-3-2井的钻探成果证实了这一点(图5)。另外,在该构造的高部位1井区发育扇三角洲相沉积,钻遇了厚层的砂砾岩,储集层物性也非常好,经过测试,日产原油高达300多m³,日产天然气高达2×10⁴m³以上。

3.2 成岩作用

不同孔隙类型的储集空间在储层中的分布除了受沉积作用控制外,还与储集层的成岩作用密切相关。通过对研究区的资料分析表明,对孔隙发育影响较大的成岩作用包括溶解作用和白云石化作用,二者均可改善储集层的质量。

3.2.1 溶解作用对储层物性的影响

溶解作用是次生孔隙形成的关键因素,对储集物性得到改善起到建设性作用,在改造储集层孔渗性过程中占有一定地位。研究区古近系沙河街组二段的溶解作用主要有同沉积期组构选择性

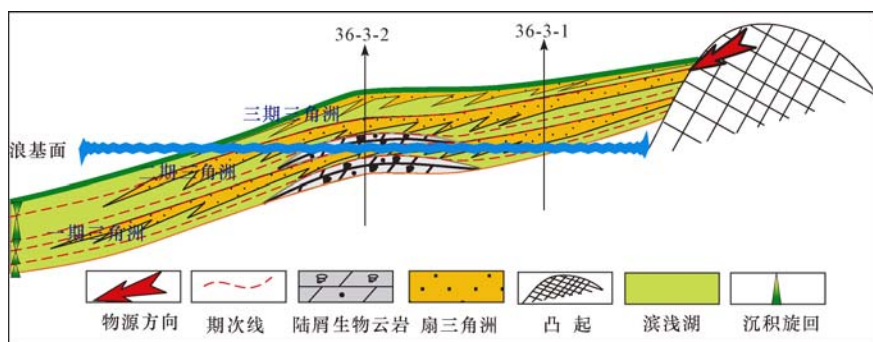


图5 石臼坨凸起东段36-3构造沙河街组沉积剖面

Fig. 5 Sedimentary profile of the Shahejie Formation in 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift

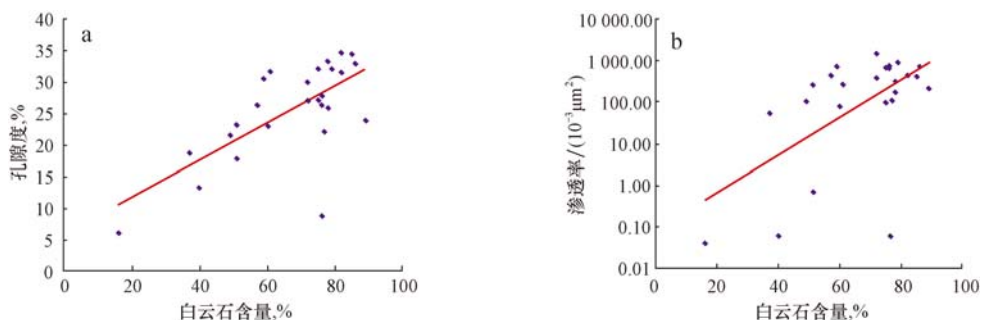


图6 石臼坨凸起东段36-3构造白云石含量与孔隙度、渗透率关系

Fig. 6 Relationship between porosity-permeability and dolomite content of reservoirs in 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift

溶解和成岩期组构非选择性溶解。同沉积期组构选择性溶解是在大气淡水和混合水的影响下,文石及高镁方解石的选择性溶蚀造成的,主要表现在生屑和鲕粒的铸模孔,这种孔隙是最主要的孔隙类型。成岩期组构非选择性溶解主要是由于有机酸的溶蚀作用影响的,主要对碳酸盐矿物进行整体溶蚀,主要表现在溶蚀粒间孔上,为提高孔隙的连通性起到了重要的作用。

3.2.2 白云石化作用对储层物性的影响

实验证明,白云岩中的白云石含量达50%~75%时,晶间孔隙最为发育^[14]。通过对研究区26块钻井取心的粘土矿物总量和常见非粘土矿物X-衍射定量分析数据来看,白云石含量一般在50%~80%,最大为89%,最小为16%,平均为66.88%。并且孔隙度和渗透率均随着白云石含量的增大而升高(图6),呈正相关性,因此在该研究区白云石化作用可以改善储集层质量。

4 勘探潜力分析

近年来,陆源碎屑与碳酸盐混积岩的石油地

质意义越来越受到学界的重视^[14-17],并发现了很多由混积层系形成的油气藏,如荷兰东北部 De Wijk 和 Wanneperveen 气田^[18]。

通过对该研究区三维地震资料进行详细分析,结合钻井资料,研究认为研究区周边沙河街组二段广泛发育厚层的扇三角洲砂体和混积岩(图7),通过钻井资料已经证实储层质量非常好,并且通过DST测试产量高达300多m³/d。因此,36-3构造周边是今后勘探的有利区域。

5 结论

1) 渤海海域石臼坨凸起东段湖相混积岩储集层分布在沙河街组二段顶部,孔渗非常好,岩性以生屑云岩为主,夹薄层砂砾岩。储集空间以粒间孔、生物体腔及生屑溶蚀孔为主,储集层类型为高孔-高渗型。

2) 沉积作用是研究区混合滩相形成的基础,也是该区优质储集层形成的先决条件。

3) 成岩作用是改善优质储集层的关键,现今的优质储集空间是溶解作用和白云石化作用共同影响的产物。

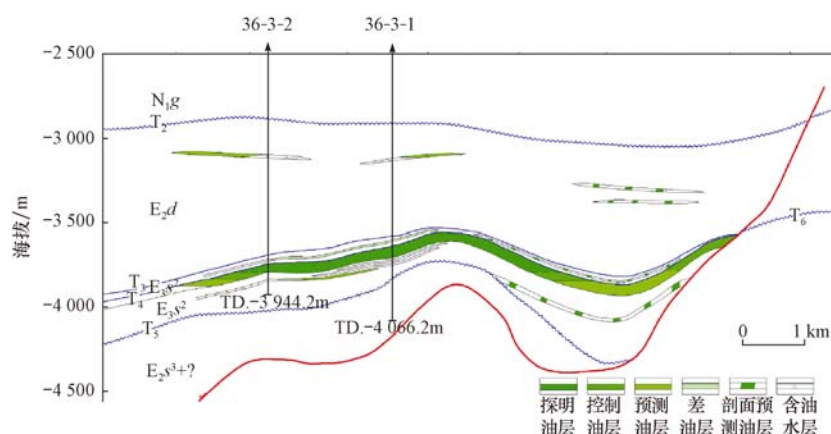


图7 石臼坨凸起东段36-3构造连井油藏剖面

Fig. 7 Well X-tied reservoir profile of 36-3 structure, Eastern Shijiutuo uplift

4) 研究区周边沙河街组二段广泛发育厚层的扇三角洲砂体和混积岩,是今后有利的勘探区。

参考文献

- [1] 张国良,姚长华,张云慧. 从石臼坨凸起浅层油气的重大发现看渤东地区的勘探潜力[J]. 中国海上油气(地质), 2000,14(2):84-92.
Zhang Guoliang, Yao Changhua, Zhang Yunhui. An evaluation of exploration potential in Bodong area from the major discovery of shallow oil and gas in Shijiutuo uplift[J]. China Offshore Oil and Gas, 2000,14(2):84-92.
- [2] 王昕,周心怀,魏刚,等. 勘探阶段成藏动力学研究方法初探[J]. 断块油气田,2010,17(2):177-180.
Wang Xin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Initial discussion on research of accumulation dynamics at hydrocarbon exploration stage[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010,17(2):177-180.
- [3] 张雄华. 混积岩的分类及成因[J]. 地质科技情报,2000,19(4):31-34.
Zhang Xionghua. Classification and origin of mixed sediments[J]. Geological Science and Technology Information, 2000,19(4):31-34.
- [4] 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. 古地理学报, 2001a,3(3):63-66.
Sha Qing'an. Discussion on mixing deposit and mixed rocks[J]. Journal of Palaeogeography, 2001a,3(3):63-66.
- [5] 马艳萍,刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因和成岩作用特征[J]. 沉积学报,2003,21(4):607-613.
Ma Yanping, Liu Li. Sedimentary and diagenetic characteristics of Paleogene lacustrine "Hunji" Rock in beach district, Dagang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003,21(4):607-613.
- [6] 郭福生,严兆彬,杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地学前缘,2003,10(3):40.
Guo Fusheng, Yan Zhaobin, Du Yangsong. Discussion of mixed deposit, hunji rock and mixed stratigraphy[J]. Geoscience Frontiers, 2003,10(3):40.
- [7] 沙庆安. 混积岩一例——滇东震旦系陡山沱组砂质砂屑白云岩的成因[J]. 古地理学报,2001b,3(4):56-61.
Sha Qing'an. An example of mixed rocks - origin of sandy dolarenite of the Sinian Doushantuo Formation in eastern Yunnan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2001b,3(4):56-61.
- [8] 蔡进功,李从先. 内蒙西南部石炭系碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积特征[J]. 石油与天然气地质,1994,15(1):80-86.
Cai Jingong, Li Congxian. Characteristics of carboniferous mixed siliciclastic and carbonate sediments in southwest Mongolia[J]. Oil & Gas Geology, 1994,15(1):80-86.
- [9] 王国忠,吕炳全,全松青. 现代碳酸盐和陆源碎屑的混合沉积作用-涠洲岛珊瑚岸礁实例[J]. 石油与天然气地质, 1987,8(1):15-27.
Wang Guozhong, Lü Bingquan, Quan Songqing. Mixed sedimentation of recent carbonates and terrigenous clastics - example of the coral reef of the Weizhou Island[J]. Oil & Gas Geology, 1987,8(1):15-27.
- [10] 王宝清,胡明毅,胡爱梅,等. 湖北南漳中三叠统巴东组碳酸盐与陆源碎屑混合沉积[J]. 石油与天然气地质,1993, 14(4):285-291.
Wang Baoqing, Hu Mingyi, Hu Aimei, et al. Mixed carbonate - terrigenous clastic sediments of Middle Triassic Badong formation in Nanzhang, Hubei[J]. Oil & Gas Geology, 1993,14(4):285-291.
- [11] 董艳蕾,朱筱敏,滑双军,等. 黄骅坳陷沙河街组一段下亚段混合沉积成因类型及演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2011,32(1):98-107.
Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Hua Shuangjun, et al. Genetic types and evolutionary model of mixed clastic - carbonate deposits in the lower part of the Sha-1 Formation, the Huanghua Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011,32(1):98-107.
- [12] 王英华,周书欣,张秀莲. 中国湖相碳酸盐岩[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1993:100-115.

- Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. China lake-facies carbonate rock [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993: 100–115.
- [13] Bathurst R G. Developments in sedimentology: carbonate sediments and their diagenesis [M]. New York: Elsevier, 1971, 12: 1–7.
- [14] 朱同兴, 黄志英. 地质记录中的海水白云岩化 [J]. 岩相古地理, 1993, 13(5): 16–25.
- Zhu Tongxing, Huang Zhiying. Seawater dolomitization in geologic records [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1993, 13(5): 16–25.
- [15] 傅宁, 邓运华, 张功成, 等. 南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例 [J]. 石油学报, 2010, 21(4): 559–566.
- Fu Ning, Deng Yunhua, Zhang Gongcheng, et al. Transitional source rock and its contribution to hydrocarbon accumulation in superimpose rift-subsidence basin of northern South China Sea-taking Baiyun Sag of Zhu II Depression as an example [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 21(4): 559–566.
- [16] 徐希坤, 刘树根, 时华星, 等. 中伊朗盆地 Kashan 地区油气地质条件研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2009, 31(3): 62–68.
- Xu Xikun, Liu Shugen, Shi Huaxing, et al. The hydrocarbon geology conditions of Kashan area in central Iranian Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(3): 62–68.
- [17] 张宁生, 任晓娟, 魏金星, 等. 柴达木盆地南翼山混积岩储层岩石类型及其与油气分布的关系 [J]. 石油学报, 2006, 27(1): 42–46.
- Zhang Ningsheng, Ren Xiaojuan, Wei Jinxing, et al. Rock types of mixed sedimentite reservoirs and oil–gas distribution in Nanyishan of Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 42–46.
- [18] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义 [J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297–307.
- Feng Jinlai, Hu Kai, Cao Jian, et al. A review of mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum–gas geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 297–307.

(编辑 张亚雄)

(上接第822页)

- Wang Yujun. Feasibility analysis of discovering large oilfield in Sichuan Basin [J]. Oil Forum, 2010, 29(1): 26–31.
- [8] 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 22–26.
- Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 22–26.
- [9] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识 [J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8–17.
- Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and on-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8–17.
- [10] 翟光明. 中国石油地质志 (卷十): 四川油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 20–448.
- Zhai Guangming. Petroleum geology of China (Vol 10): sichuan oil and gas area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 20–448.
- [11] 查全衡. 美国 1995 年油气资源评价——陆地及州属海域部分简介 [J]. 世界石油工业, 1997, 4(4): 22–27.
- Zha Quanheng. 1995 national assessment of United States oil and gas resources (Land and State's offshore) [J]. World Petroleum Industry, 1997, 4(4): 22–27.
- [12] USGS. Assessment of undiscovered oil resources in the Devonian-Mississippian Bakken Formation, Williston Basin Province, Montana and North Dakota [Z]. USGS Fact Sheet 2008–3021, 2008.
- [13] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127–1153.
- [14] Nordeng S H. The Bakken petroleum system: an example of a continuous petroleum accumulation [J]. DMR Newsletter, 2009, 36(1): 21–24.
- [15] 颜磊, 刘立宏, 李永明, 等. 水平井重复压裂技术在美国巴肯油田的成功应用 [J]. 国外油田工程, 2010, 26(12): 21–25.
- Yan Lei, Liu Lihong, Li Yongming, et al. Application of the multiple fracturing techniques for horizontal wells in Bakken Oilfield of U. S. A [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(12): 21–25.
- [16] Ghiselin D. Bakken Shale: the play book, key technologies—inspiration, innovation unlock Bakken pay [Z]. Hart Energy Publishing, 2008: 68–85.
- [17] Murphy E. The oil potential of the Bakken source system [J]. DMR Newsletter, 2010, 37(2): 11–13.

(编辑 李军)