

渤中凹陷沙二段生屑云岩的发现及勘探意义

余宏忠¹, 王玉静², 江涛¹, 揣媛媛¹, 杨海风¹

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452
2. 中海油能源发展股份有限公司采油工程研究院, 天津 300452

摘要 渤中凹陷中深层储层具有埋藏深、储集性能差以及预测难度大等特点, 储集层质量是制约中深层油气勘探成效的关键。在 QHD36-3 油田沙二段中发现的生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩储层, 其储集性能明显优于相同深度的碎屑岩储层, 将成为中深层高产油气层勘探的新领域之一。研究表明, 生屑云岩等白云岩储层的形成主要受古地貌、古水深等因素控制, 同时距离物源区的远近影响其发育程度。建立相应的沉积模式, 对以生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩为目的储层的油气勘探至关重要。

关键词 渤中凹陷; 古近系; 生屑云岩; 碎屑岩

中图分类号 TE132

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)08-0060-05

Discovery of Bioclastic Dolostone in the Second Member of Shahejie Formation in Bozhong Depression and Its Significance in Oil Exploration

YU Hongzhong¹, WANG Yujing², JIANG Tao¹, CHUAI Yuanyuan¹, YANG Haifeng¹

1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China
2. Oilfield Engineering Research Institute, CNOOC Energy Technology & Services, Tianjin 300452, China

Abstract Due to the characteristics in deep buried depth, poor physical properties of reservoir and difficulty in the effective reservoir prediction, the exploration of mid-deep oil and gas in mid-deep reservoirs is constrained mainly by reservoir quality. In QHD36-3 oil field, the storage properties are significantly superior to those of clastic reservoir at the same depth, including bioclastic dolostone and terrigenous clastic dolostone discovered in the second member of Shahejie Formation, and it will be one of the new fields in the mid-deep oil and gas exploration. This study suggests that the formation of dolomite reservoir is mainly affected by paleogeomorphology, paleo-water depth, and development degree, which is affected by the distance from the source area. The bioclastic dolostone formed by chemical and biochemical depositions is distributed in shallow to deep lake areas, and the reserving spaces include interlayer fractures and solution channels. Under the guidance of the sedimentary principle, the paper proposes a mixed sedimentation model of bioclastic dolostone in the second member of Shahejie Formation in Bozhong depression and further discusses the controlling factors of the mixed sedimentation. The establishment of the corresponding deposition pattern is essential for the oil and gas exploration related with bioclastic dolostone and terrigenous clastic dolostone.

Keywords Bozhong depression; Paleogene; bioclastic dolostone; clastic rock

0 引言

渤中凹陷位于渤海湾盆地东部渤海海域, 面积约

8660 km²。新生代沉积厚度逾万米, 是渤海湾盆地新生代中、晚期沉积及沉降中心, 尤其晚期快速沉积、沉降特征明显^[1]。自

收稿日期: 2010-03-05

基金项目: 国家重大科技专项(2008ZX05000-23)子课题(2008ZX05000-23-2)

作者简介: 余宏忠, 工程师, 研究方向为石油地质勘探, 电子信箱: yuhzh@cnooc.com.cn

1995 年开始,之后的 5、6 年内,渤中凹陷及围区进入了新近系勘探时期,通过对该区油气成藏条件的认识,提出了“晚期成藏”理论,并在渤中凹陷围区凸起上新近系发现了 QHD32-6、PL19-3 等亿吨级大油田^[2-3];但随后勘探陷入低谷,成效甚微。近年来,在“拓展深层、探索新区、油气并举”的勘探研究思路指导下,勘探重点从凸起逐渐转入凹陷或深层,在凹陷陡坡带陆续发现了 QHD35-2、BZ2-1、QHD36-3 等古近系中型优质油田,勘探成果丰硕。尤其是 QHD36-3 油田在深达 3760m 的沙二段发现优质生屑和含陆源碎屑云岩储层,并测试获得日产 341.7m³ 原油,是目前渤海海域发现油田中埋藏最深、产能最高的商业规模油藏,展示了深层勘探的巨大潜力。然而勘探成果表明,渤中凹陷沙河街组埋深普遍超过 3000m,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^[4-5]。因此,研究以生屑云岩为主的碳酸盐储层形成的主控因素并预测其分布范围,对于中深层油气勘探具有重大意义。

QHD36-3 油田位于石臼坨凸起东倾末端南部坡带,北依石臼坨凸起,南临渤中富生烃凹陷,背山面洼,油气运移通畅。渤中凹陷陡坡带古近系由于受边界大断裂、古地貌以及坡折带等影响,大量发育构造、岩性以及构造-岩性等多种类型的圈闭,QHD36-3 油田古近系圈闭即为受边界断层控制长期继承性发育断鼻型圈闭。该油田主力油层段沙二段储层以扇三角洲碎屑岩沉积为主,同时在一定的深度范围、特殊的相带发现了生屑云岩(图 1)。

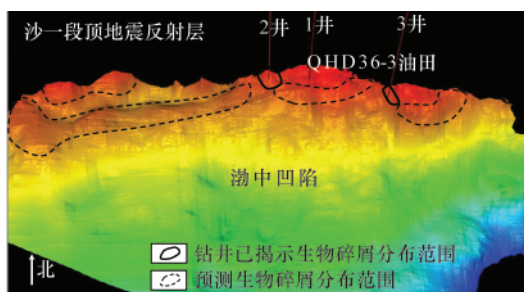


图 1 生屑云岩分布范围

Fig. 1 The distribution area of bioclastic dolostone

1 生屑云岩特征

1.1 镜下特征

QHD36-3 油田沙二段储层主要有含碳酸盐岩长石岩屑砂岩、砂砾岩、生屑云岩和含陆源碎屑的云岩等,其中生屑云岩主要表现为粒屑结构。岩石成分主要为白云石,其次为石英、长石及岩屑颗粒;多为粗砂及中砂,少量细砂,个别颗粒完全白云石化;岩屑主要为中性及酸性喷出岩岩块,偶见石英岩岩块。白云石含量 51.0%~90.0%,平均 74.8%;石英含量 2.0%~11.0%,平均 6.2%;长石平均含量 10.3%;岩屑平均含量 8.7%。岩石组构主要包括生物屑、陆源碎屑、鲕粒、亮晶及泥晶,生物屑主要为腹足类及介形类生物碎片,分布较均匀,个

别腹足类保存较完整,体腔局部被泥晶白云石充填。部分陆源碎屑被泥晶白云石包裹形成表皮鲕,鲕核多见溶蚀现象。粒屑间充填亮晶白云石胶结物,栉壳状分布于生屑及陆屑边缘,部分被溶蚀。岩石孔隙发育较好,主要为粒内孔及粒间孔,少量铸模孔,粒内孔多为生物体腔孔,孔隙分布较均匀,连通性较好(图 2)。

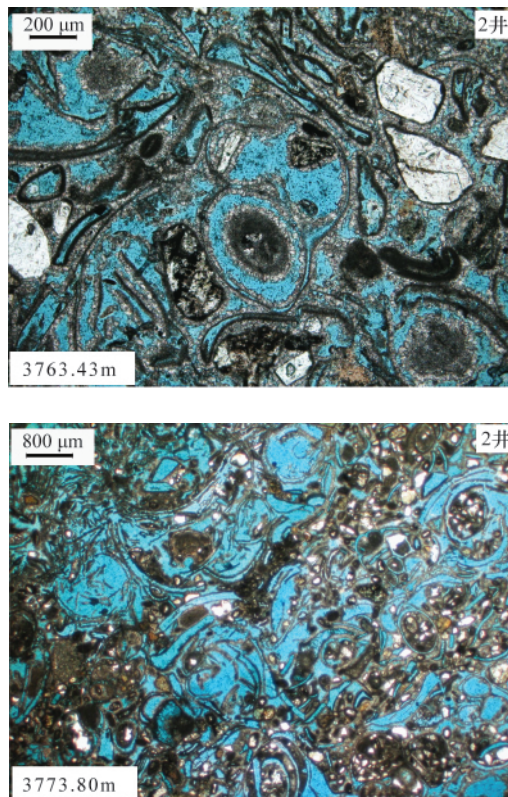


图 2 生屑云岩粒间、粒内溶孔

Fig. 2 Dissolved pores between grains and in grains of bioclastic dolostone

1.2 电性特征

相对沙二段含碳酸盐岩长石岩屑砂岩及含砾砂岩而言,生屑云岩和含陆源碎屑云岩电性特征有显著差异。QHD36-3 油田 1 井和 3 井沙二段储层以含碳酸盐岩长石岩屑砂岩为主,局部见砂砾岩,含碳酸盐岩长石岩屑砂岩储层的自然伽马值较高,密度值高,中子和声波时差测井值较低,对应电阻率较低,为 4.0~27.9Ω·m;而 2 井沙二段岩性主要为生屑云岩,生屑云岩储层的自然伽马值低,密度值低,中子和声波时差测井值较高,对应电阻率较高,最高可达 116Ω·m(图 3)。

1.3 孔渗条件

对岩心、壁心、测井、DST 测试等资料的综合分析结果表明:生屑云岩和含陆源碎屑云岩储层具有中高孔-中渗、中孔-中渗的特征,岩心和壁心的实测孔隙度为 10.1%~40.1%,平均为 27.7%,实测渗透率为 0.21×10⁻³~2350.40×10⁻³μm²,平均为 469.70×10⁻³μm²;测井解释的孔隙度为 15.0%~25.0%、平均

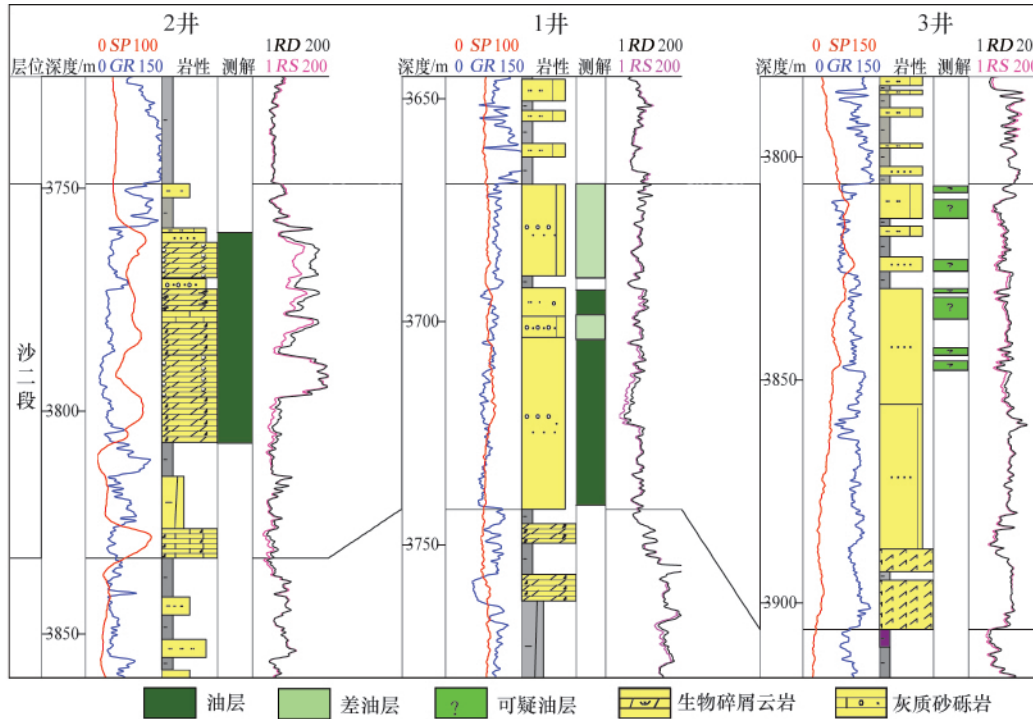


图 3 生屑云岩与砂岩、砂砾岩油层测井响应差异

Fig. 3 The log response difference of bioclastic dolostone, sandstone and sandy conglomerate

22.8%,测井解释的渗透率为 $4.70 \times 10^{-3} \sim 525.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $178.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含碳酸盐岩长石岩屑砂岩储层物性较差,属于中低孔-低渗,旋转壁心实测孔隙度为 7.0%~15.9%, 平均 10.7%, 渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \sim 9.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $1.96 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 测井解释的孔隙度为 11.0%~13.7%, 平均 13.0%, 测井解释的渗透率为 $1.20 \times 10^{-3} \sim 24.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $8.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。显然,生屑云岩孔渗条件明显优越于含碳酸盐岩长石岩屑砂岩以及砂砾岩(图 4)。

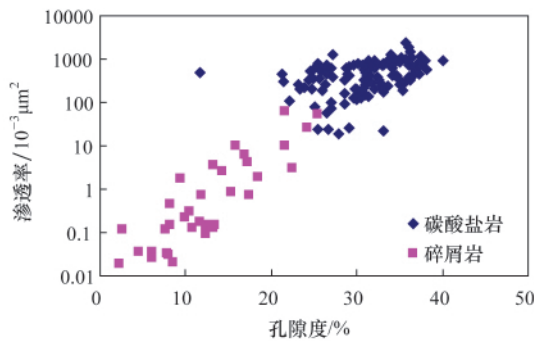


图 4 QHD36-3 油田沙二段储层物性分析

Fig. 4 The reservoir properties in the second member of Shahejie Formation in QHD36-3 oil field

2 生屑云岩形成主控因素及沉积模式

区域沉积研究结果表明,研究区沙二段沉积以扇三角洲

沉积为主,物源主要来自石臼坨凸起东倾末端,该地区凸起基岩主要以中生界火成岩和石炭-二叠系砂砾岩为主。在坡折带、古沟谷及古地貌的联合控制下,发育多套扇三角洲沉积体系^[6]。QHD36-3 油田处于扇三角洲前缘亚相,以碎屑岩为主。但在扇三角洲前缘或前三角洲亚相、构造相对较高的部位,由于受陆源物质影响较小,水体浅,阳光充足,适合大量生物繁殖,发育碳酸盐岩台地,粒屑滩为主,为碎屑岩和碳酸盐混合沉积^[7-8]。在地震上扇三角洲整体表现为扇形楔状体,中高频中连续中强振幅前积反射、中高频弱连续弱振幅楔状前积反射、中频中振幅断续前积反射;而以生屑云岩为主的碳酸盐台地主要表现为近似平行的连续强振幅反射特征,斜交于扇形楔状体一侧(图 5)。

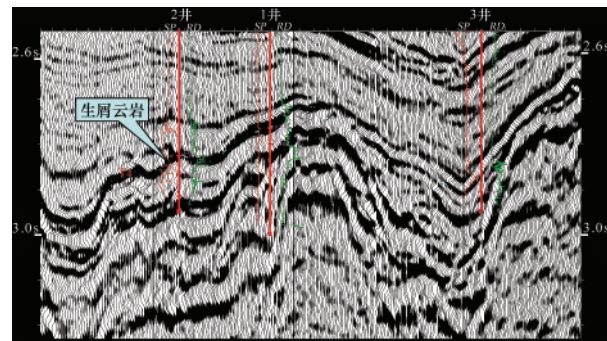


图 5 生屑云岩地震反射特征

Fig. 5 The seismic reflection characteristics of bioclastic dolostone

2.1 生屑云岩形成的主控因素

1) 生屑云岩发育主要受控于古地貌、古水深。湖相碳酸盐岩形成条件苛刻,具有深度和范围的局限性,通常发育在陡坡带地形局部平缓地带、水下高地、岛屿及周围、缓坡带等区域均有湖相碳酸盐岩发育^[9-10],在渤海湾盆地各个凹陷中,由于缓坡带地形相对平缓,碳酸盐岩沉积比较发育,而陡坡带则较差。QHD36-3 油田沙河街组构造处于陡坡断阶带,靠岸一侧为石臼坨凸起,通过 2 条平行的断层过渡到渤中凹陷,在断阶带平台处发育成具有一定封闭性水域的水下高地,由于凸起的遮挡使风浪相对减小,水浅、水体干净、阳光充足、温度适中,适宜大量生物的生长繁殖。古地貌在很大程度上决定了碎屑岩与碳酸盐岩储层的分布范围,1 井区所处地形相对简单,坡度小,发育的碳酸盐岩厚度大,分布也较稳定;而 3 井区处于古沟谷的边缘,地形较陡,发育的碳酸盐岩厚度较薄,且分布局限(图 1)。此外,古气候对湖泊水体的影响比海洋显著得多,湖相碳酸盐岩形成于半潮湿-潮湿的较温暖湿润的古气候,淡水-半咸水湖相碳酸盐岩的发育状况与生物发育程度密切相关,主要发育在适合于大量生物繁殖的浅水环境中^[11]。

2) 距离物源区的远近影响生屑云岩的发育程度。靠近盆地或凹陷凸起的边缘,输入盆地或凹陷的碎屑物质多,说明淡水补给较多,对水体及碳酸盐颗粒起稀释作用,不利于碳酸盐岩的形成和沉积^[12-13]。由于 QHD36-3 油田 1 井区靠近石臼坨凸起边界大断裂,陆源碎屑物质供给比较充足,水体相对浑浊,不利于生物生长;而在稍微远离边界大断层、陆源碎屑物质供应不足的 2 井区,在陆源碎屑供给相对不足的地区发育碳酸盐礁体,此时湖盆处于欠补偿沉积状态,以有机沉积和碳酸盐沉积为主。但在凸起物源区碳酸盐岩发育的情况下,注入湖泊的地表水或地下水中碳酸盐浓度高,有利于湖相碳酸盐岩沉积,因此周边凸起基岩碳酸盐岩较发育的盆地,沉积物源靠近碳酸盐物源的一侧,湖相碳酸盐岩沉积也较发育;QHD36-3 油田沙二段沉积物源主要来自于石臼坨凸起东倾末端,该地区凸起基岩主要以中生界火成岩和古生界石炭-二叠系砂砾岩、碳酸盐岩为主,这决定和控制了该区储层发育模式。

2.2 沉积模式

1) QHD36-3 油田沙二段储集层为陆源碎屑与生屑云岩共存的混合沉积的类型,表现为扇三角洲沉积、扇三角洲-碳酸盐岩混合台地、深湖-半深湖沉积相带。在混积岩沉积相带中,靠近凸起的北部 1 井区砂质成分含量较多,以陆源碎屑砂砾岩、含砾砂岩、砂岩为主,向南逐渐减少、粒度变细。前者反映了当时水动力条件和古气候条件,后者则间接指示了物源方向,即陆源碎屑成分主要来自北部石臼坨凸起东倾末端,受到凸起上中生界火成岩和古生界石炭-二叠系物源的双重影响。在陆源碎屑物质供应不足的 2 井区发育的生屑云岩及含陆源碎屑的生屑云岩等碳酸盐岩主要是盆内沉积。对生屑云岩成因问题的认识,以白云岩及其相关的碳酸盐岩为

储层的油气勘探工作尤为重要^[14-15]。目前越来越多的证据表明,白云岩的形成以次生交代为主,而控制次生交代强度和规模的关键是富 Mg 流体的来源及其量的大小,同时微生物活动很可能有助于白云岩的形成^[16](图 6)。

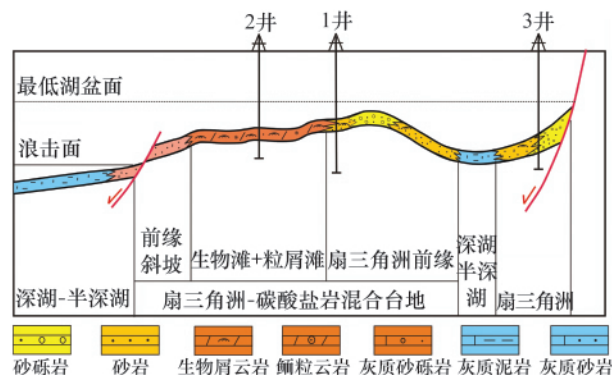


图 6 QHD36-3 油田沙二段储层沉积模式

Fig. 6 The reservoir depositional model in the second member of Shahejie Formation in QHD36-3 oil field

2) 具有一定水深的水下高地是生屑云岩发育的最佳场所。QHD36-3 油田沙河街组断阶带具有一定封闭性水域的水下高地,使构造所处水域具有一定的封闭性,较平静,因而水的循环变差,盐度相对增大,陆源碎屑来源减少;由于水下高地水浅、水体干净、透明度好,致使阳光充足,水体温度较高,生物大量繁殖;同时浅水区通过波浪搅动及水压力的变化,水体中溶解的 CO_2 易于释放,有利于 CaCO_3 沉淀;从该区的区域构造背景上看,沙河街组时期地壳相对稳定并有缓慢下沉,从而为碳酸盐沉积创造了有利条件^[17]。

3) QHD36-3 油田沙二段主要为东营组巨厚泥岩盖层下近源自生自储的成藏模式,其靠近优质烃源岩和良好的盖层质量为油气藏的高充满意度提供了保证。由于沙二段埋藏深,寻找区域盖层下优质储层发育区是油气勘探的关键。水下高地发育的生屑云岩和含陆源碎屑云岩,在成岩过程中因骨架颗粒支撑可形成粒间及粒内孔隙,溶解作用和交代作用可形成大量溶蚀缝、粒内溶孔和粒间溶孔^[18]。如果油气运移入孔隙还在一定程度上抑制成岩作用,就可保存良好的孔隙结构,具备形成高孔-中渗、中孔-中渗等优质储层的储集条件。

3 结论

1) QHD36-3 油田沙二段生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩发育主要受控于古地貌、古水深等因素,同时距离物源区的远近影响白云岩的发育程度。沉积模式表现为陆源碎屑与生屑云岩共存的混合沉积模式。

2) QHD36-3 油田沙二段生屑云岩和含陆源碎屑云岩等优质储层的发现为寻找中深层高产油气层开辟了新领域。

3) 渤中凹陷面积广阔,陡坡带构造十分发育,油气成藏条件类似,进一步加强生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩

储层研究对拓展中深层油气勘探意义重大。

4) 白云岩成因复杂,涉及众多学科领域,开展区域古地貌、古沉积相、古水深以及古水介质性质的研究,是综合分析预测生屑云岩和含陆源碎屑云岩等白云岩形成过程并建立相关沉积模式的基础。

参考文献 (References)

- [1] 刘廷海, 李思田, 高坤顺, 等. 渤中凹陷莫霍面特征及盆地形成机制[J]. 中国海上油气, 2008, 20(5): 302-304.
Liu Tinghai, Li Sitian, Gao Kunshun, et al. *China offshore oil and Gas*, 2008, 20(5): 302-304.
- [2] 薛永安, 邓运华, 余宏忠. 渤海海域近期油气勘探进展与创新认识[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(4): 1-7.
Xue Yong'an, Deng Yunhua, Yu Hongzhong, *China Petroleum Exploration*, 2008, 13(4): 1-7.
- [3] 邓运华. 渤海上第三系油藏成因机制及勘探效益探讨[J]. 中国石油勘探, 2003, 8(2): 25-28.
Deng Yunhua. *China Petroleum Exploration*, 2003, 8(2): 25-28.
- [4] 薛永安, 余宏忠, 项华. 渤海湾盆地主要凹陷油气富集规律对比研究[J]. 中国海上油气, 2007, 19(3): 145-148.
Xue Yong'an, Yu Hongzhong, Xiang Hua. *China offshore oil and Gas*, 2007, 19(3): 145-148.
- [5] 余宏忠, 李建平, 彭文绪, 等. 黄河口凹陷明下段浅水三角洲沉积与岩性油气藏勘探[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(2): 1-6.
Yu Hongzhong, Li Jianping, Peng Wenxu, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2009, 28(2): 1-6.
- [6] 赵澄林. 油区岩相古地理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 295-311.
Zhao Chenglin. *Lithofacies and paleogeography in petroleum province*[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 295-311.
- [7] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松, 等. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 312-314.
Guo Fusheng, Yan Zhaobin, Du Yangsong, et al. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 312-314.
- [8] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-66.
Yang Chaoqing, Sha Qingan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(2): 59-66.
- [9] 顾家裕, 方辉, 蒋凌志. 塔里木盆地奥陶系生物礁的发现及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(4): 1-3.

- Gu Jiayu, Fang Hui, Jiang Lingzhi. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(4): 1-3.
- [10] 杜韞华. 渤海湾地区下第三系湖相碳酸盐岩及沉积模式 [J]. 石油与天然气地质, 1990. 11(4): 376-392.
Du Yunhua. *Oil & Gas Geology*, 1990, 11(4): 376-392.
- [11] 董桂玉, 何幼斌, 陈洪德, 等. 惠民凹陷沙一段湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以山东商河地区为例 [J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 343-350.
Dong Guiyu, He Youbin, Cheng Hongde, et al. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 343-350.
- [12] 金振奎, 邹元荣, 张响响, 等. 黄骅凹陷古近系沙河街组湖泊碳酸盐沉积相[J]. 古地理学报, 2002, 4(3): 11-17.
Jin Zhenkui, Zou Yuanrong, Zhang Xiangxiang, et al. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(3): 11-17.
- [13] 郑兴平, 周进高, 吴兴宁. 碳酸盐岩高频层序定量分析技术及其应用 [J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 26-30.
Zheng Xingping, Zhou Jingao, Wu Xingning. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(5): 26-30.
- [14] 钱凯, 王淑芬. 济阳拗陷下第三系礁灰岩及礁灰岩油气藏[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(5): 1-7.
Qian Kai, Wang Shufen. *Petroleum Exploration and Development*, 1986, 13(5): 1-7.
- [15] 潘元林, 张善文, 肖焕钦, 等. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 191-218.
Pan Yuanlin, Zhang Shanwen, Xiao Huanqin, et al. *Exploration of subtle reservoir in Jiyang faulted basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 191-218.
- [16] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 32-40.
Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Juntao. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(5): 32-40.
- [17] 马永生. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 134-136, 260-265.
Ma Yongsheng. *Carbonate reservoir sedimentary*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 134-136, 260-265..
- [18] 张娣, 侯中健, 王亚辉, 等. 板桥—北大港地区沙河街组沙一段湖相碳酸盐岩沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 92-97.
Zhang Di, Hou Zhongjian, Wang Yahui, et al. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(4): 92-97.

(责任编辑 刘志远)

本期好玩的数学——决斗问题答案

解决这个问题有一种最简单方法。我们注意到:如果先开枪的那个人在第一次扣动扳机以后幸存下来,那么整个游戏就重新开始了。而这一次则轮到另一名决斗者先开枪了。

由于开第一枪的那个人幸存下来的概率为 $\frac{5}{6}$, 所以另一名决斗者死亡的概率就是开第一枪的人死亡概率的 $\frac{5}{6}$ 。即如果设开第一枪的人死亡概率为 P , 则另一名决斗者死亡的概率为 $\frac{5}{6}P$ 。显然, 两个概率之和应该是 1。于是有 $P + \frac{5}{6}P = 1$, 由此, 开第一枪的人中弹死亡的概率为 $P = \frac{6}{11}$ 。