

文章编号: 1001-8166(2008)06-0562-08

深水盆地中大型侵入砂岩的地震识别及其成因机制探讨*

吴时国¹, 孙运宝^{1,2}, 孙启良^{1,2}, 董冬冬^{1,2}, 袁圣强^{1,2}, 马玉波^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 侵入砂岩是深水盆地中常见的地质现象, 由于本身具有高孔隙度、高渗透率的特点, 对深水油气储集、运移和成藏均有重要的影响。综合国内外研究成果, 探讨了深水盆地中大型侵入砂岩的地震特征和成因机制。研究表明侵入砂岩具有明显的强振幅地震反射, 这些振幅异常一般呈 V 字形反射形态, 沿着走向反映出一系列的特点, 如阶梯性、分支性等, 并伴有极性反转和高速度异常, 在侵入砂岩下部的喉道出现上拉现象; 关于侵入砂岩的成因, 认为是未固结成岩阶段深水盆地中的异常超压砂体的向上侵位形成, 大型的侵入砂岩及其伴生的断裂系统为流体运移提供渗流通道, 深水水道或深水扇系统为侵入砂岩提供充足的物源。

关键词: 侵入砂岩; 多边形断裂; 深水盆地; 水道沉积; 地震属性

中图分类号: P315.1; P544+.4 **文献标志码:** A

1 引言

侵入砂岩 (sandstone intrusion) 是指在超压流体作用下侵入至上覆泥质沉积物中的深水沉积体, 属于深水盆地中常见的松散沉积物变形构造, 是渗透性地层异常压力释放的产物。自 Jinkens 在 1930 年提出侵入砂岩的概念已有近 80 年的历史, 由于侵入砂岩常出现在深水沉积环境中, 开展这一研究较为困难。随着高分辨率三维地震成像技术的发展和深海钻探岩芯资料的增加, 对侵入砂岩的研究将更加深入, 国外很多学者已经对侵入砂岩的几何形态、地震识别特征、地层模型及其成因机制等进行了探讨^[1-6]。

深水油气勘探成为世界油气的新的增长点^[7-11], 对侵入砂体的研究有利于我们更好的掌握油气成藏的规律。目前已经在全球 50 多个深水盆

地中发现了侵入砂岩, 如北海盆地、圣克鲁斯 (Santa Cruz) 盆地、下刚果盆地等, 它们都是出现在厚层的具有多边形断层系的泥岩中^[6,12-14]。低渗透率地层中高渗透率砂岩的侵入一方可以增加地层的垂向连通性, 对地层中储集砂体的分布、流体的垂向运移具有重要的影响^[1,3-5]。另一方面, 其本身即可作为良好的储层, 具有油气成藏的条件^[1,2,5,15-17]。此外, 侵入砂岩的研究有利于预测浅水流, 解决制约深水油气勘探开发的地质灾害问题^[18,19]。此研究已在内外深水油气区引起了广泛的关注^[20,21]。我国的深水油气勘探尚处于起步阶段, 侵入砂体在我国南海海域已被发现, 侵入砂体的研究对我国深水油气勘探开发具有重要的指导意义, 为此本文对侵入砂岩的几何形态、识别特征及其成因机制进行了探讨。

* 收稿日期: 2008-01-03; 修回日期: 2008-04-22.

* 基金项目: 中国科学院知识新工程重要方向项目“南海北部深水海域油气勘探的关键问题研究”(编号: KZCX2-YW-203); 863 项目“浅水流形成机理及其地球物理识别技术研究”(编号: 2006AA09Z349) 资助.

作者简介: 吴时国(1963-), 男, 湖北襄阳人, 研究员, 主要从事海洋地质研究. E-mail: geology_wu@yahoo.com

2 侵入砂岩的地震识别

侵入砂岩在地震剖面上具有明显的振幅和速度异常。通过研究北海挪威深水盆地的高分辨率3D地震资料以及钻井、测井数据,总结了侵入砂岩在地震剖面上的主要特征及识别标志。研究表明,侵入砂岩具有十分复杂的外形特征及内部反射构造^[4,12,22-24]。

2.1 异常强振幅反射

在北海法罗—设得兰(Faroe-Shetland)盆地的始新世—渐新世地层中,侵入砂岩具有明显的强振

幅反射且存在极性反转,这与高阻的侵入砂岩围限于低阻的始新世泥岩中这一地质现象是对应的。这些振幅异常一般具有向下尖灭的圆锥形的几何形态,在二维双程反射时(Two-Way Time, TWT)剖面上常呈V字形(图1),锥顶为一尖点或一水平线。锥体直径约500~1500 m。V字形振幅异常沿着走向反映出一系列的特点,如阶梯性、分支性和标志性的振幅变化。振幅异常在交点处最厚,随着远离交点而变薄,在侵入砂岩下部的喉道出现上拉现象(图1)。

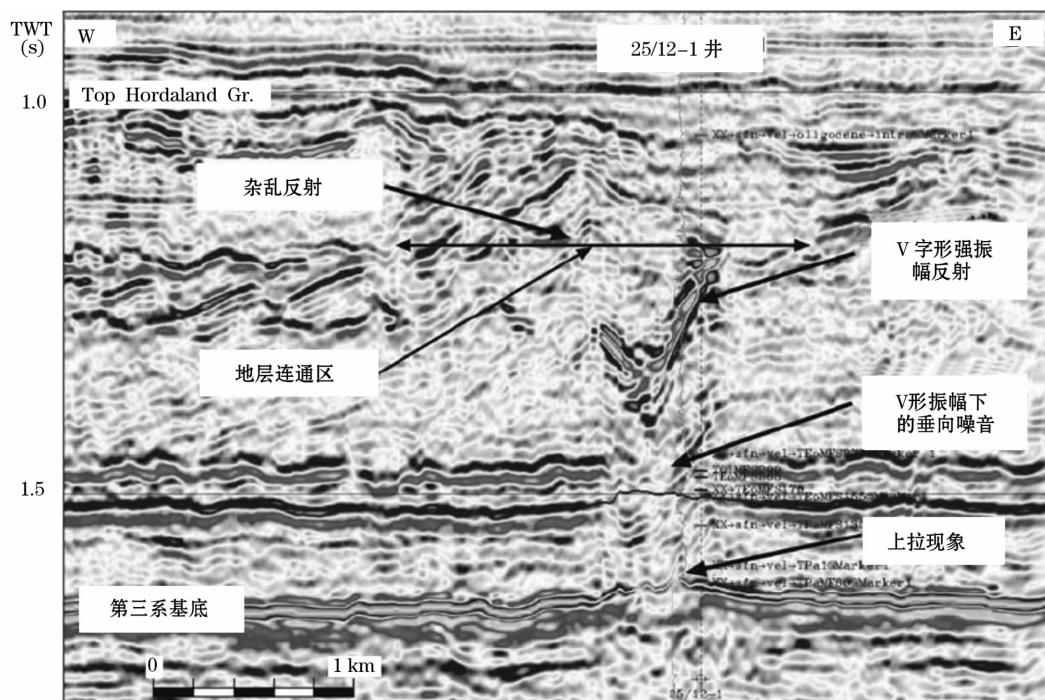


图1 挪威大陆边缘深水盆地中侵入砂岩的地震显示^[2]

Fig. 1 Cross section of conical mudstone intrusion in the continental margin offshore Norway^[2]

2.2 底辟褶皱变形

在侵入砂岩的上方均存在丘状杂乱的强振幅反射,大多呈锥形,向上终止于晚渐新世不整合面。分析认为这是由侵入砂岩向上侵入所引起的底辟褶皱变形,在侧翼还发育逆断层。被动褶皱的脊部通常在侵入砂岩的交点上面,凸起不明显部分在振幅异常的两侧。这些特点显示出底辟褶皱构造是由下部物质侵入所形成的,并且侵入物质在锥形振幅异常的顶点处最厚,向边缘变薄(图2)。

2.3 多边形断层

通过采用分层切片技术对侵入砂岩研究,发现侵入砂岩多出现于多边形断层构造上方,尤其值得

注意的是侵入砂岩顶点和多边形断裂交切点存在密切的空间关系,二者完全重合(图3)。多边形断裂交切点是断层内流体运移能力最强的部位,而砂体的顶点与之重合,也就是说,砂岩是由多边形断层的交切点开始侵入的。

2.4 速度异常

声波测井资料显示侵入砂岩具有明显的速度异常特征。通过对法罗—设得兰盆地两口探井声波测井资料的研究,发现侵入砂岩具有明显的低速异常,且具有较高的 V_p/V_s ^[7,16]。这与侵入砂体具有高孔隙度、低密度的特征相吻合。表明侵入砂体内部为流体性质,因而具有较低的纵波速度和横波速度。

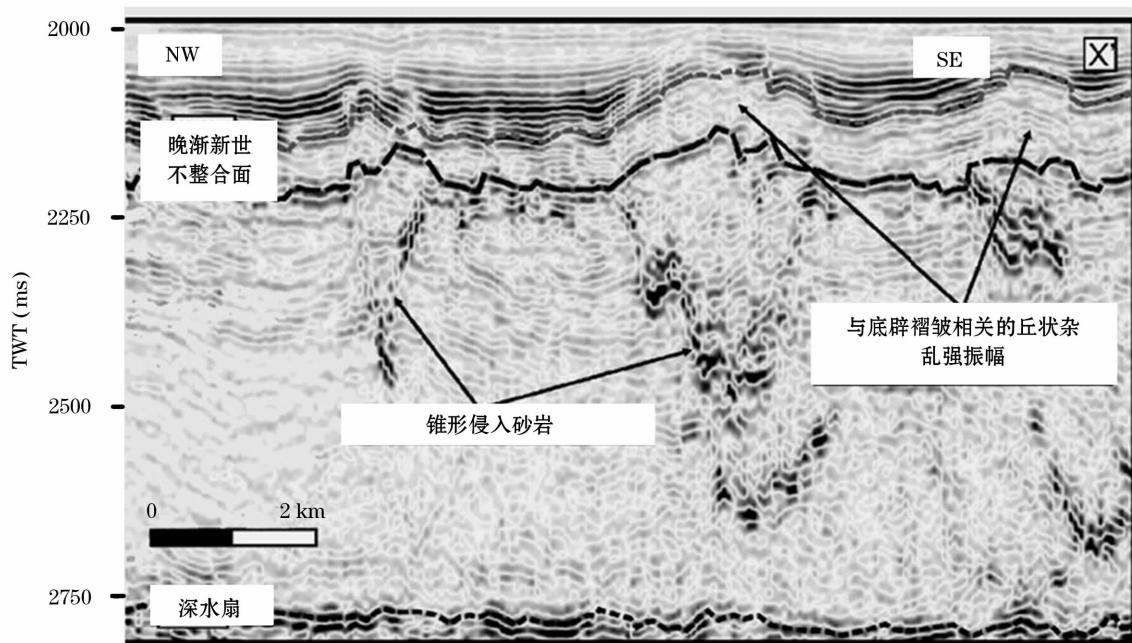


图2 与锥形侵入砂岩引起的底辟褶皱构造^[2]

Fig. 2 Forced folds related to conical sandstone intrusions

3 侵入砂岩的成因机制

侵入砂岩的形成有3个主要条件:砂质沉积物、有效的封闭层和异常高压^[19,25]。深水盆地中广泛发育的深水扇砂体及随后覆盖其上的泥质沉积物是侵入砂岩存在的必要条件。在异常高压作用下,砂和流体可通过构造裂缝进行迁移。综合前人的研究成果,提出侵入砂岩的成因机制。

3.1 侵入砂岩的发育深度及形成时间

侵入砂岩多发生在多边形断层发育的地区。多边形断层的出现增强了地层的连通性,在异常超压的作用下,砂体可发生垂向和侧向运移。如北海及挪威大陆边缘的深水盆地(图4A),广泛发育晚中新统多边形断层,在距离这些多边形断层约900 m深度的始新统一渐新统地层中发育有大量孤立深水扇砂体(图4B、C),在异常超压作用下,这些孤立砂体便侵位至晚中新统地层,形成侵入砂岩。值得一提的是,在研究区还沉积有大量中始新统海底扇砂体,这些砂体距离侵入砂岩水平距离达3 km,也可为侵入砂岩提供物源。这表明侵入砂岩在物源区形成之后、多边形断层产生之时形成的,发育于物源区之上的未成岩阶段的海底浅层,多与物源区以断层或断裂构造相连通。

3.2 侵入砂岩形成的地层模型

侵入砂岩发育的地层模型具有二元结构:下部

是深水扇砂体地层,为侵入砂岩提供了充足的物源;上部是泥质沉积层,为侵入砂岩提供了封闭层。在北海及挪威海域,侵入砂岩位于古新世—渐新世粘土层中。侵入砂岩下伏地层是中始新世的海底扇砂体,侵入砂岩侵入到上始新统渐新统地层后被中新统到第四系的沉积物所覆盖(图4)。锥形侵入砂岩的倾角为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。地震剖面显示侵入砂岩两翼倾角随深度几乎没有变化,说明侵入后压实作用并没有对砂体造成任何影响^[6]。另外锥形侵入砂岩下伏地层存在翼状地震反射特征,水道砂体等地震相特征(图5),说明侵入砂岩还可能来源于深部的水道砂体。

3.3 侵入砂岩的成因模式

侵入砂岩的形成与上述构造特点密切相关。早期阶段,是异常超压体的形成,也就是我们现在在深水环境常见的浅水流等地质现象。低位体系域时期,大陆坡深水盆地中广泛发育水道侵蚀作用(图6A),随着区域构造沉降和海平面变化的影响,浊积水道开始充填浊积砂体(图6B),这些巨厚的砂体后来被低渗透率泥岩或页岩地层所覆盖,由于上下低渗透地层中流体的汇入和上覆盖层的厚度增大,从而形成异常超压环境(图6C)。后期阶段,是超压异常的破坏。当该区域发生强烈的构造运动时,便形成大量的断裂构造,如果断裂构造刺穿下部异常超压砂体,那么下部的砂体在热流体作用和超压作用

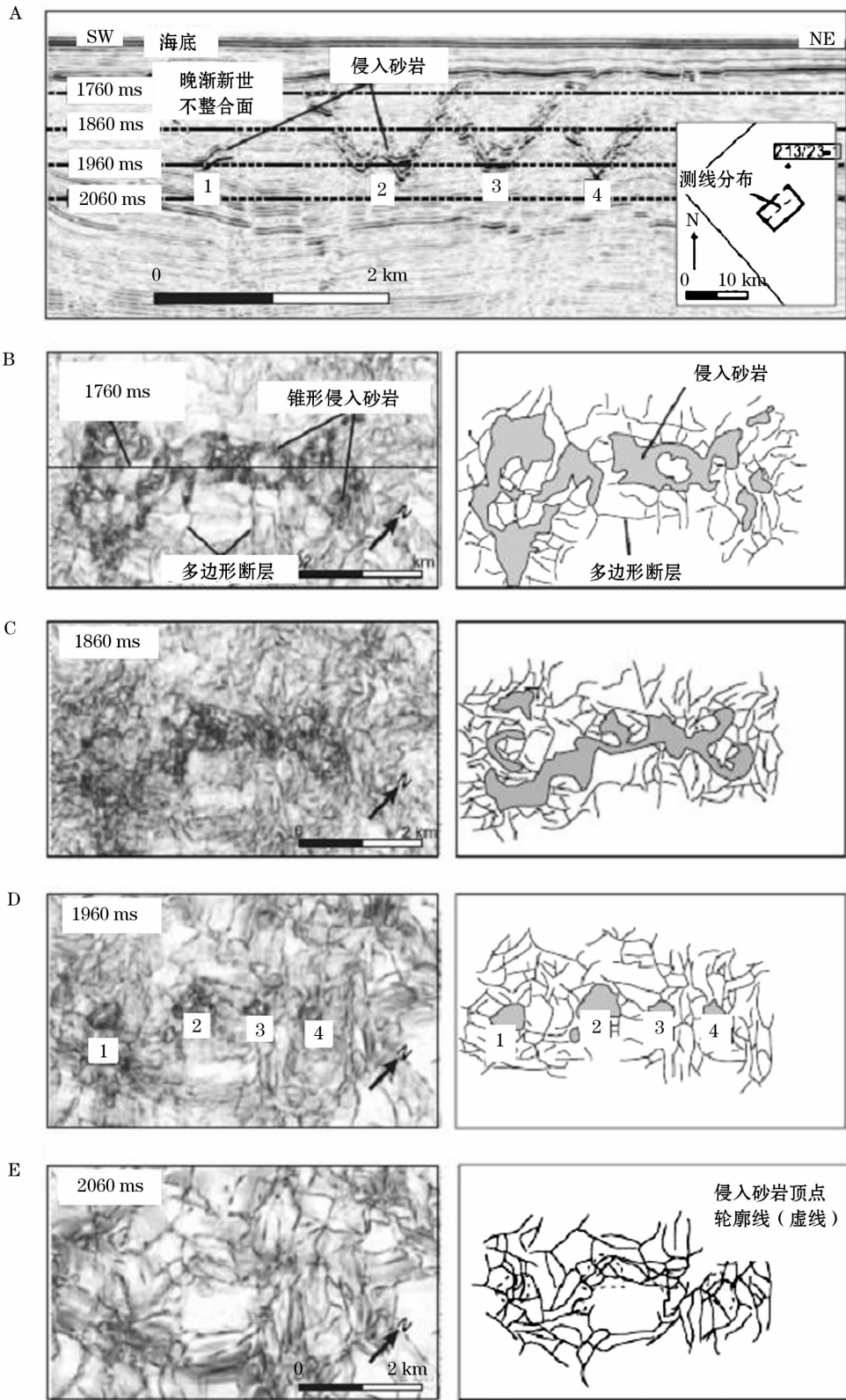
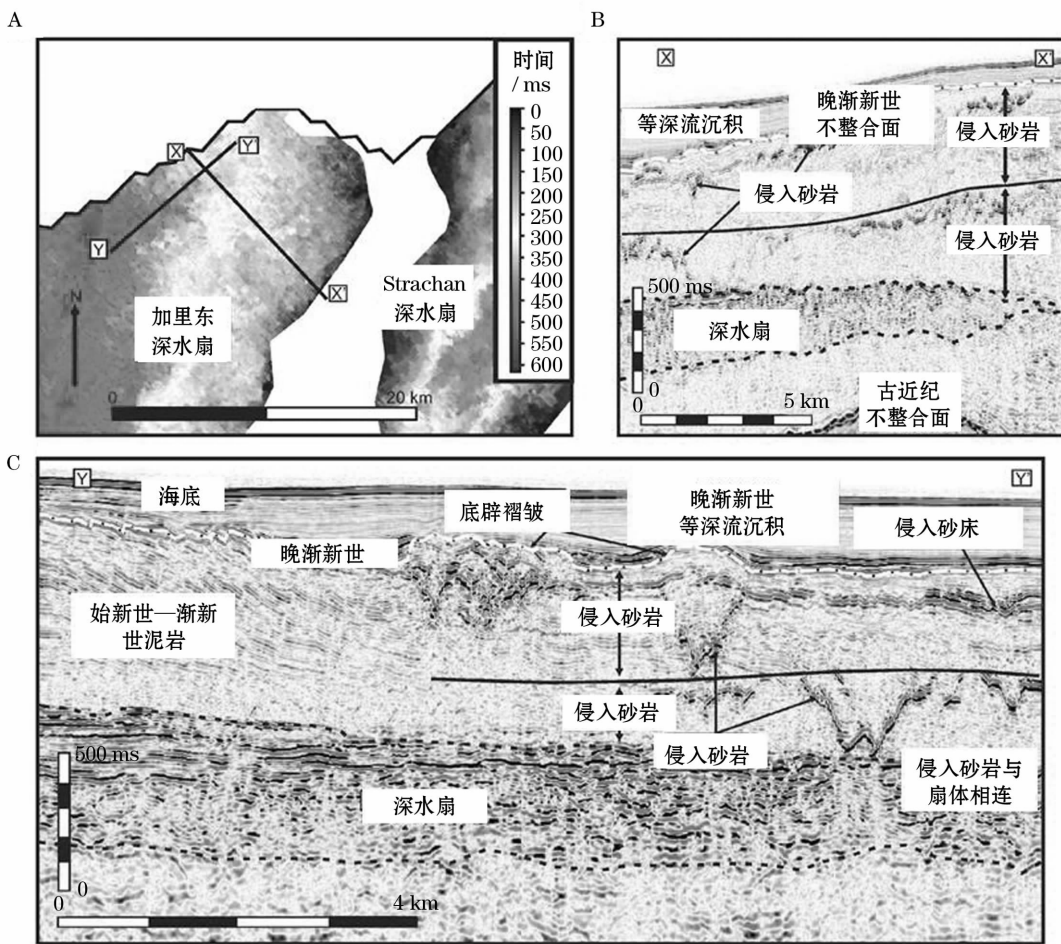
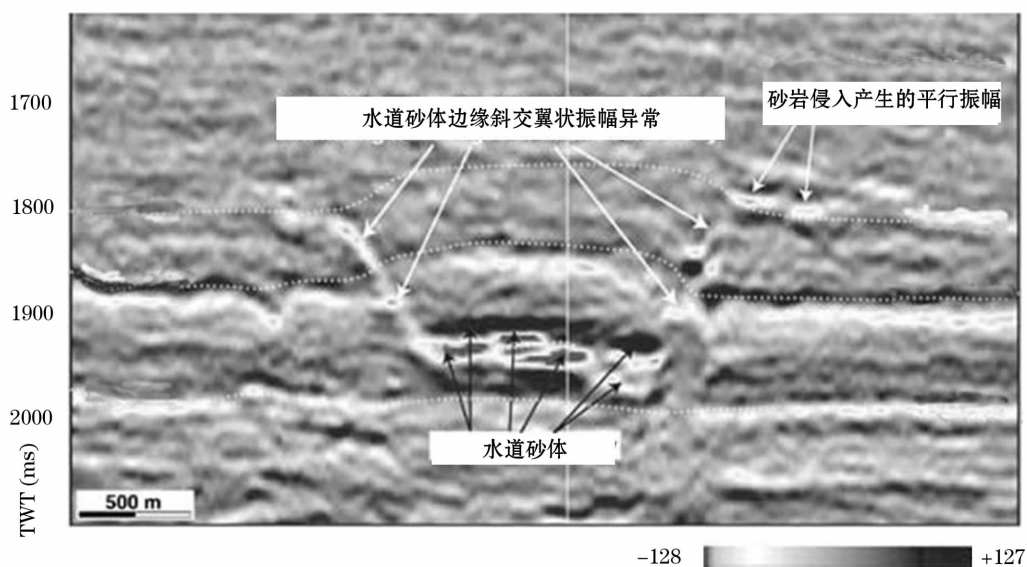


图3 多边形断裂与大型锥形侵入砂岩

Fig.3 Polygonal fault and large conical intrusion depth of variance slices marked with dashed lines^[6]

A中虚线标出了B~E4张时间切片的位置; A中的1~4与D中的1~4一一对应,为侵入砂体的顶点^[6]

图4 大规模侵入砂岩与大型深水扇^[6]Fig. 4 Conical sandstone intrusions and deep-water fan system^[6]图5 穿过深水扇水道砂体及其侵入砂岩的地震剖面,显示翼状振幅异常^[2]Fig. 5 Seismic section across deep-water channel sand body and sandstone intrusion showing discordant, wing-like amplitude anomalies^[2]

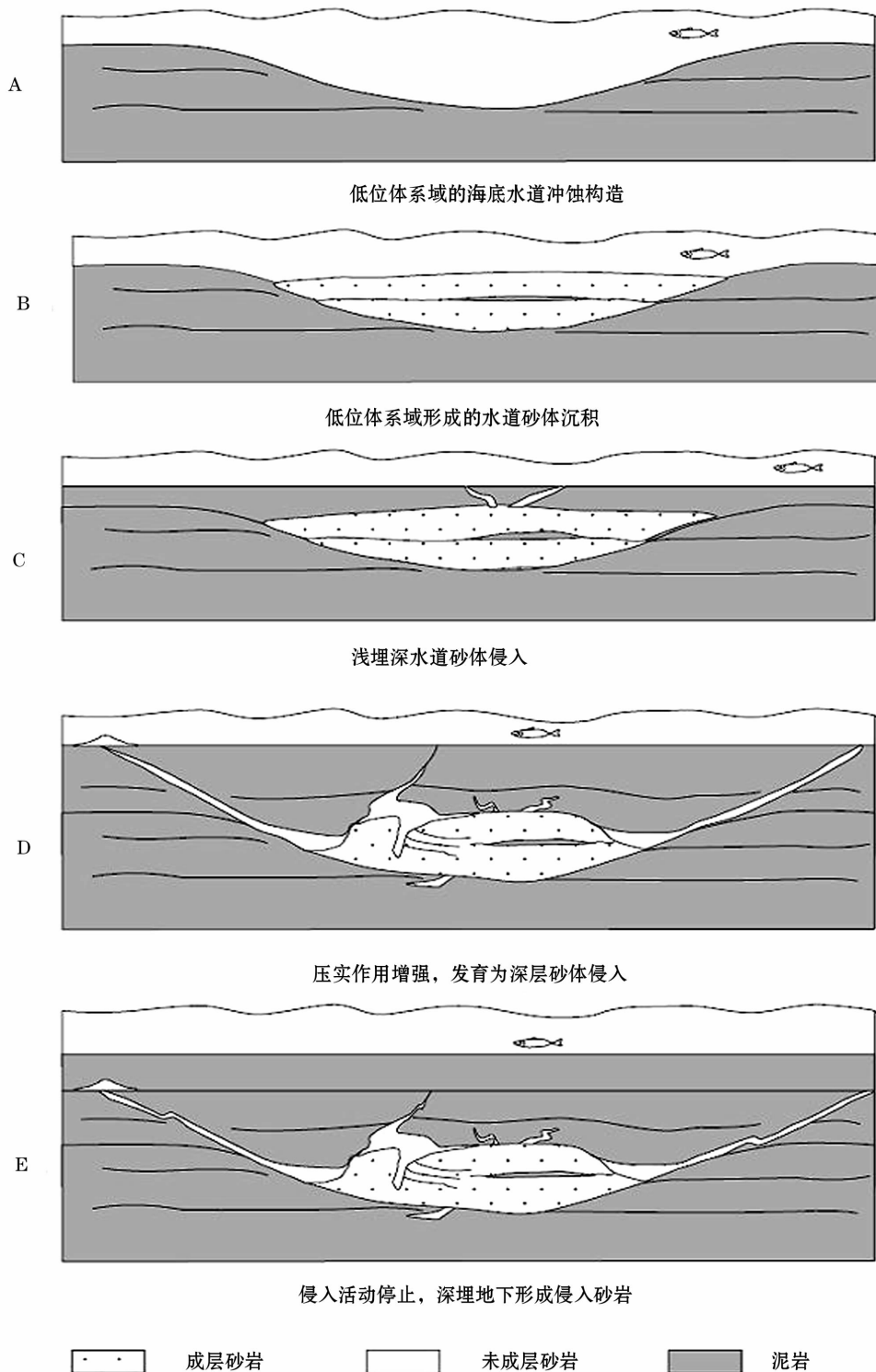


图6 深水盆地中侵入砂岩的成因模式

Fig. 6 Genetic model of sandstone intrusion in the deep-water basin

下便可能沿断裂构造或岩层孔隙向上移动,这些砂体便形成锥形的侵入砂岩(图6D),当压力在侵位过程中得以释放时,侵位便终止。由于侵位砂岩孔隙度较大,因而也增加了低渗透底层(被侵位地层)

的连通性,破坏了原来地层的储层性质。随着区域构造活动性的减弱,这些侵入体将埋藏于地下,形成良好的储层(图6E)。当下一期构造开始的时候,侵位将再一次发生。

4 结 论

在深水盆地内,渗透性砂岩的异常压力多被认为来自于邻近异常高泥质岩层的压力传递^[27,28],而对地下异常流体压力机制的研究主要集中在低渗透地层中^[29~32]。然而,实际上人们能直接测量、在钻井工程中可能引发严重事故的则是渗透性地层中的异常压力。

侵入砂岩是渗透性地层异常超压释放的重要表现形式,在地震剖面上具有异常强振幅、V字形反射、极性反转、层位上拉、倾角达25°等特点;它是在早期埋藏阶段,由未固结砂体再迁移、侵位至上覆低渗透率泥岩形成,具有向下尖灭的圆锥形构造,与多边形断层系相伴生,多边形断层与锥顶交界处为侵入砂岩侵位的初始位置,上覆泥岩地层受侵入作用影响形成底辟褶皱构造;侵入砂岩接受下部深水扇或周围砂体的物源供给,多边形断层的存在为砂岩侵入提供了良好的供源通道,在异常超压条件和深部流体的作用下,砂岩逐层向上侵位,形成侵入砂岩,破坏原有的构造环境,增加地层连通性。另外侵入砂岩也可能连通浅部砂体,与浅层砂体达到压力平衡状态,导致深海环境地层中广泛分布的异常超压体的形成;大型的侵入砂岩及其伴生的断裂系统很可能为流体运移提供高渗透率的通道,从而影响盖层下的油气成藏。我国深水油气勘探尚处于起步阶段,制约侵入砂岩研究的主要问题是缺乏3D地震资料和深水钻井资料,因而我国尚未开展侵入砂岩的研究。随着我国深水油气勘探的深入,侵入砂岩的研究必将引起广大学者的关注。

参考文献(References):

[1] Duranti D, Hurst A, Bell C, *et al.* Injected and remobilized Eocene sandstones from the Alba field, UKCS: Core and wireline log characteristics[J]. *Petroleum Geosciences*, 2002, 8: 99-107.

[2] Hurst A, Cartwright J, Huuse M, *et al.* Significance of large-scale sand injectites as long-term fluid conduits: Evidence from seismic data[J]. *Geofluids*, 2003, 3: 263-274.

[3] Duranti D, Hurst A. Fluidization and injection in the deep-water sandstones of the Eocene Alba Formation (UK, North Sea)[J]. *Sedimentology*, 2004, 51: 503-529.

[4] Huuse M, Duranti D, Steinsland N, *et al.* Seismic characteristics of large-scale sandstone intrusions in the Paleocene of the South Viking Graben, UK and Norwegian North Sea[C]//Davies R J, Cartwright J A, Stewart S A, *et al.*, eds. *Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geological Society, London, Memoirs, 2004, 29: 263-277.

[5] Shoulders S, Cartwright J A. A new approach to constraining the depth and timing of large-scale sandstone intrusions[J]. *Geology*, 2004, 32(8): 661-664.

[6] Shoulders S J, Cartwright J, Huuse M. Large-scale conical sandstone intrusions and polygonal fault systems in Tranche 6, Faroe-Shetland basin[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2007, 24: 173-188.

[7] Henry S P, Paul W. Worldwide deepwater exploration and production: Past, present, and future[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(4): 371-376.

[8] Rufino B B, Lawrence M G. Growth opportunities in the Philippine natural gas industry[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(9): 898-900.

[9] Katz B J. Hydrocarbon shows and source rocks in scientific ocean drilling[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 54: 139-154.

[10] Yang Chuanheng, Du Xu, Pan Heshun, *et al.* Advances in world wide deep water hydrocarbon exploration and oil and gas exploration potential in the northern continental slope in south china Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 247-256. [杨川恒, 杜栩, 潘和顺, 等. 国内外深水领域油气勘探新进展及中国南海北部陆坡深水区油气勘探潜力[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 247-256.]

[11] He Jiaxiong, Shi Xiaobin, Xia Bin, *et al.* The status of the petroleum exploration in the northern south China sea and the resource potential in the deep-water areas[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(3): 261-270. [何家雄, 施小斌, 夏斌, 等. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(3): 261-270.]

[12] Molyneux S, Cartwright J A, Lonergan L. Conical Sandstone Injection Structures Imaged by 3D Seismic in the Central North Sea[M]. UK, 1999, 20: 383-393.

[13] Lonergan L, Cartwright J A. Polygonal faults and their influence on deepwater sandstone reservoir geometries, Alba Field, UK central North Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83: 410-432.

[14] Surlyk F, Noe-Nygaard N. Sand remobilization and intrusion in the upper Jurassic Harelv Formation of East Greenland[J]. *Bulletin of Geological Society of Denmark*, 2001, 48: 169-188.

[15] Boehm A, Moore J C. Fluidized sandstone intrusions as an indicator of Paleostress orientation, Santa Cruz, California[J]. *Geofluids*, 2002, 2: 147-161.

[16] Jonk R. The structural and diagenetic evolution of injected sandstones: Examples from the Kimmeridgian of NE Scotland[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 2003, 160: 881-894.

[17] Huuse M, Mickelson M. Eocene sandstone intrusions in the Tampen Spur area (Norwegian North Sea Quad 34) imaged by 3D seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(2): 141-155.

[18] Dong Dongdong, Zhao Hanqing, Wu Shiguo, *et al.* SWF problem in deepwater drilling and its geophysical detection techniques[J]. *Journal of Marine Science Bulletin*, 2007, 26(1): 114-120. [董冬冬, 赵汗青, 吴时国, 等. 深水钻井中浅水流灾问题及

- 其地球物理识别技术[J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 114-120.]
- [19] Luo Xiaorong, Yang Jihai, Wang Zhengfeng. The over pressuring mechanisms in aquifers and pressure prediction in basins[J]. *Geological Review*, 2000, 46(1): 22-31. [罗晓容, 杨计海, 王振峰. 盆地内渗透性地层超压形成机制及钻前压力预测[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 22-31.]
- [20] Joe F, George H. Deep star's evaluation of Shallow Water Flow Problems in the Gulf of Mexico [C] // Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston, Texas, 1997, OTC 8525.
- [21] Ostermeier R M, Pelletier J H, Winker C D, *et al.* Dealing with shallow-water flow in the deepwater Gulf of Mexico[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(7): 660-668.
- [22] Lonergan L, Lee N, Johnson H D, *et al.* Remobilization and injection in deepwater depositional systems; Implications for reservoir architecture and prediction [C] // Deep-water Reservoirs of the World. GCSSEPM Foundation 20th Annual Research Conference, 2000.
- [23] Murdoch L C, Slack W W. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. *Journal of geotechnical and Environmental Engineering*, 2002, 128(6): 479-487.
- [24] Jonk R, Hurst A, Duranti D, *et al.* Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis in Tertiary reservoirs, south Viking Graben, North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 83(3): 329-357.
- [25] Wu Shiguo, Zhao Hanqing, Wu Xiangyang, *et al.* The research of geohazards estimation technique on deep-water wells [C] // Marine Sciences, 2005: 218-223. [吴时国, 赵汗青, 伍向阳, 等. 深水钻井安全的地质风险评价技术研究[C] // 中国深水油气开发工程高技术论文集, 2005: 218-223.]
- [26] Molyneux S J M, Cartwright J A, Lonergan L. Large scale deep-water sediment remobilization; Examples from North Sea 3D seismic and outcrop[J]. *AAPG*, 2001, 9: 2-11
- [27] Fertl W H. Abnormal Formation Pressure, Implication to Exploration, Drilling, and Production of Oil and Gas Reservoirs[M]. Amsterdam: Elsevier, 1976; 1-382.
- [28] Magara K. Compaction and Fluid Migration, Practical Petroleum Geology[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978; 1-319.
- [29] Smith J E. The dynamics of shale compaction and evolution of pore-fluid pressures[J]. *Math Geology*, 1971, 3: 239-263.
- [30] Bethke C M. Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of Gulf Coast type geopressed zones[J]. *Geophysical Research*, 1986, 91: 6 535-6 545.
- [31] Che Heli, Luo Xiaorong. The quantitative calculation of abnormal fluid pressure in argillaceous and arenaceous rocks and its geological applications [J]. *Geological Review*, 1988, 34(1): 54-63. [陈荷立, 罗晓容. 砂泥岩中异常高流体压力的定量计算及其地质应用[J]. 地质评论, 1988, 34(1): 54-63.]
- [32] Luo X R, Vasseur G. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1992, 76: 1 550-1 559.

Seismic Identification and Formation Mechanism of Large-scale Sandstone Intrusions in Deep-water Basin

WU Shiguo¹, SUN Yunbao^{1,2}, SUN Qiliang^{1,2}, DONG Dongdong^{1,2},
YUAN Shengqiang^{1,2}, MA Yubo^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Large-scale sandstone intrusions are important components of many deep-water clastic systems. They were formed by the unconsolidated sandstones of early burial stages remobilizing and injecting into the overlying strata and were commonly found in fine-grained argillaceous sediments developed in polygonal fault network. They can affect the distribution of sandstone reservoir, the vertical migration and oil/gas accumulation for their high porosity and high permeability. By integrating the research results at home and abroad, the seismic character and formation mechanism of large-scale sandstone intrusions are discussed. Results shows that they often form complex and spectacular features on 3D seismic data, such as a distinctive suite of discordant, high-amplitude reflections, the opposite polarity of upper and lower reflections, conical amplitude, horizon pull-down and so on. The sandstone intrusions are resulted from extremely high pressure in deep water environment. The presence of a widespread region of conical sandstone intrusions in the deep-water basin has important implications for vertical fluid migration in the region.

Key words: Sandstone intrusions; Polygonal faults; Deep-water basin; Channel deposits; Seismic attribute.