

文章编号:0253-9985(2010)04-0449-06

层序界面成岩反应规律及其对储层储集物性的影响

韩登林^{1,2}, 张昌民^{1,2}, 尹太举^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 荆州 434023)

摘要:在三角洲沉积体系层序界面附近进行密集取样并对样品进行详细的岩石学和矿物成分分析后, 总结得出层序界面附近的成岩反应规律。层序界面对于成岩反应的制约因素体现在以下三方面: 首先, 层序界面代表着相对湖平面下降, 由此引发大气淡水对储层的充注和淋滤, 使得硅酸盐颗粒(主要是不稳定的长石颗粒)普遍高岭石化, 在全岩成分上表现为层序界面之下储层中高岭石含量增加; 其次, 层序界面代表相对较长的沉积驻留时间, 这使得在层序界面之下储层内碳酸盐胶结物含量增加; 最后, 层序界面伴随着可容空间的下降, 使得大量细粒沉积物被上覆粗粒沉积物冲刷侵蚀, 并通过充填渗滤进入界面之下的地层, 而随着埋深的不断增加, 这些充填物质在压实作用下成为假杂基, 从而表现为层序界面之下泥质杂基含量增大。以上成岩改造对储层储集物性的影响较为明显, 其中自生高岭石胶结物对储层储集空间起着建设性作用, 而泥质杂基和碳酸盐胶结物对储集物性却有着相对的破坏性作用。

关键词:假杂基; 高岭石; 碳酸盐胶结物; 储集物性; 层序界面; 成岩作用; 惠民凹陷; 济阳拗陷

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Diagenetic reaction pattern of the sequence boundary and its impacts on reservoir quality

Han Denglin^{1,2}, Zhang Changmin^{1,2} and Yin Taiju^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, MOE, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 2. College of Geosciences, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: Cluster sampling was performed in the vicinity of the sequence boundary within deltaic sedimentary system and a detailed analysis of lithological and mineral composition was carried out on the samples gathered. The results reveal the diagenetic reaction patterns near the boundary. The constraints of the sequence boundary over diagenetic reaction are reflected in the following aspects. First, sequence boundary indicates a relative fall in lacustrine level, which led to flush and leach of meteoric waters and facilitate the kaolinitization of siliciclastic grains (mainly unstable feldspar), thus causing a higher kaolinite content in the bulk composition of the underlying formation of the boundary. Secondly, the boundary means a relative longer residence time of the sediments, which increasing the content of carbonate cement in reservoirs under the boundary. Finally, the boundary is usually accompanied by a decrease in accommodation space, causing a large amount of fine-grained sediments being flushed and eroded by overlaying coarse-grained sediments and then leached into the underlying formation. With the increase of burial depth, these filling materials become pseudomatrix under compaction and reflected as a signal of higher content of clay matrix under the boundary. These diagenetic alterations have an obvious impact on reservoir quality. The kaolinite cement, for instance, has a positive effect upon the porosity of reservoirs; while clay matrix and carbonate cement, on the contrary, exert a negative effect upon reservoir porosity.

Keywords: pseudomatrix, kaolinite, carbonate cement, physical property of reservoirs, sequence boundary, diagenesis, Huimin Sag, Jiyang Depression

收稿日期: 2009-06-11; 修订日期: 2010-06-24。

第一作者简介: 韩登林(1979—), 男, 博士, 储层成岩作用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40602013, 40572078)联合资助。

20世纪70年代,含油气盆地勘探开发的突飞猛进不仅极大地加快了成岩作用的研究进程,也对成岩作用的研究提出了更高层次的要求^[1],不仅要求其定量性,也要求其预测性。越来越多的成岩学家从单纯的依靠储层内无机-有机成岩分析的研究范畴跳离出来,而从制约储层成岩改造的动力学过程的角度来解析和预测储层成岩作用时空分异规律^[2-4]。基于相对海平面变化分析的层序地层学和成岩作用早先被包括成岩学家在内的沉积学家们认为是两个截然无关的学科领域,但越来越多的研究表明,受控于海平面变化、盆地升降、沉积物供给速率和可容空间变化等因素的相对海平面变化能导致储层中孔隙流体地化特性的改变,而这种改变又造就了储层内一系列水-岩相互作用^[5,6]。因此,将储层成岩作用置于层序格架内,通过探究层序格架内储层孔隙流体演化规律及其对成岩改造时空分异的制约过程,就能够更为有效地对储层成岩作用时空分异规律进行解析和预测,而这一思路也已经成为国际上储层成岩动力学研究新的热点^[7-14]。

然而,有关这方面的工作迄今仍然主要集中于碳酸盐岩储层中,在硅质碎屑岩储层中的开展则较为受限,主要是由于硅质碎屑颗粒受孔隙流体地化性质的改造并不像碳酸盐岩那样敏感。目前,为数不多的有关硅质碎屑沉积物在层序格架内成岩作用时空分布的研究多集中于近海或者海岸沉积层段中,这主要是由于以下3个方面的原因^[12,13]:

①相对于其他沉积体系来说,近海沉积体系的层序地层格架较容易构建;②在世界范围内,近海沉积砂体常常是较为优质的油气储层;③近海沉积层序往往产出频繁。这些工作主要针对的成岩改造包括近海沉积储层中的碳酸盐胶结物和成岩硅酸盐矿物(如粘土矿物)及其在时空内的分布规律。

层序界面(包括层序界面和准层序界面)是层序地层学中最为核心的概念,它作为高位体系域和低位体系域两者之间的界面,代表着相对湖平面上升到最高点并逐步开始下降的阶段^[15]。由于层序界面代表海(湖)平面和水深的急剧变化,使得界面处沉积速率、孔隙流体地球化学特性、碎屑成分和沉积物结构都发生相应的变化^[15,16],而这些变化造就了极具特色的成岩反应。本文尝试在陆相沉积体系中探讨成岩改造在层序界面上的分布规律。

1 研究层段地质背景

研究区位于济阳拗陷惠民凹陷西南部(图1a),北为埕宁隆起,南邻鲁西隆起,东、西分别与东营凹陷及临清拗陷的禹城凹陷相接,凹陷轴北东向展布^[17]。研究层位为古近系沙河街组三段中部含油层系,属于基山砂岩体,砂体展布整体呈由西北向东南延伸的“舌形”(图1b)。

前人研究认为,基山砂岩体主要以三角洲砂体为主,并以三角洲前缘相为骨架,夹部分滑塌相和重力流水道沉积物^[17,18](图2)。其砂体成因微相

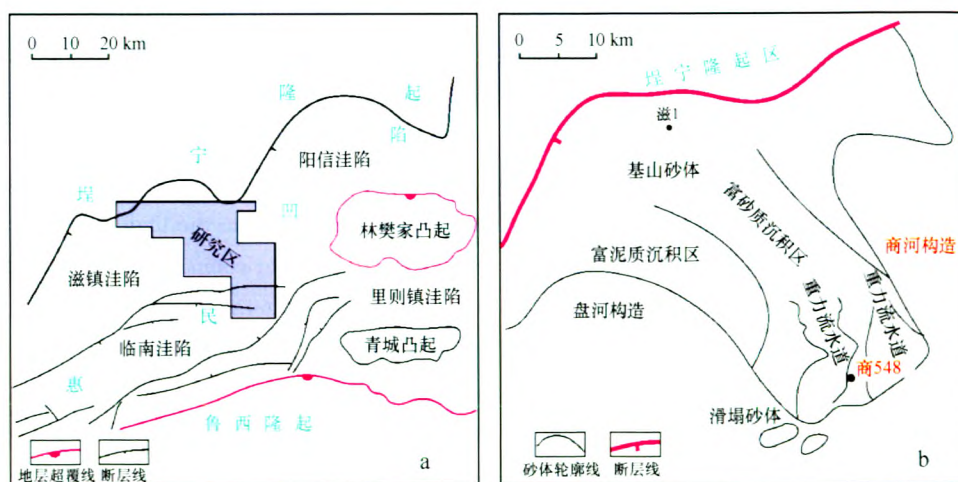


图1 研究区地质背景示意图^[12]

Fig. 1 Regional geology of the study area^[12]

a. 惠民凹陷构造纲要; b. 研究区山体沉积分布

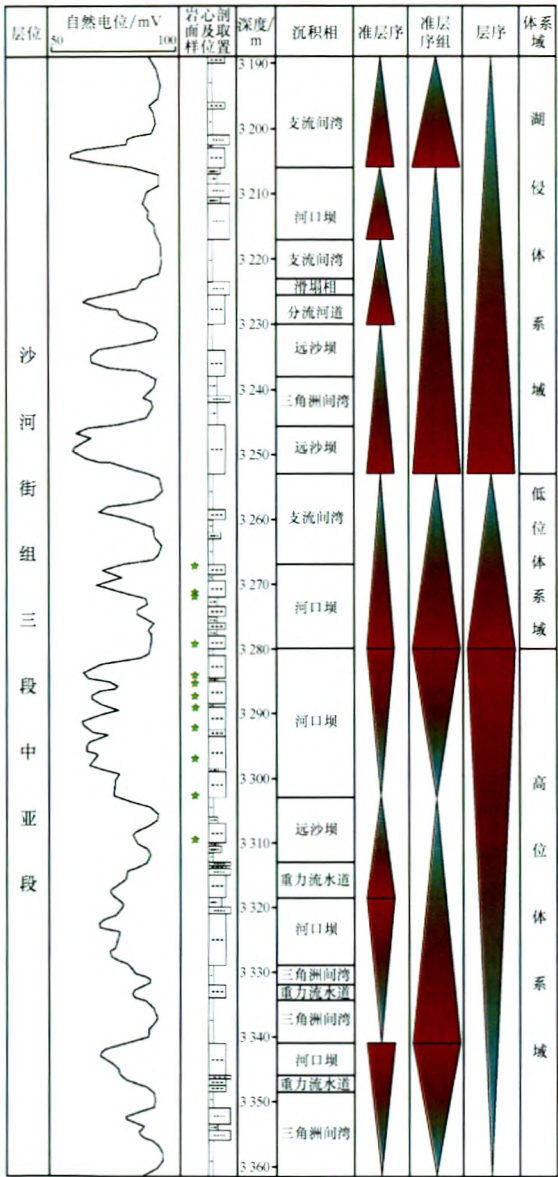


图2 商548井单井层序地层剖面
Fig.2 Profile of sequences in the well Shang-548

主要包括河口坝和远砂坝、三角洲支流间湾、滑塌。另外,研究层段也发育小规模的重力流沉积,以结构均一、富含泥质的暗色砂层与泥岩互层为特征。

2 取样情况

前人对于基山砂岩体的层序划分已经作了相当丰富的工作^[18-21]。本次研究基于前人的工作,对商548井进行了详细的单井层序划分(图2)。由于层序界面特殊的研究意义,取样点主要集中在层序界面附近(图2)。

对所取样品进行仔细的筛选后,选取了其中

12个具有代表性的粉砂岩样品,进行系统、详细的矿物分析。矿物成分含量主要通过全岩及粘土矿物X-衍射分析得出。由于样品出自相似粒级和相近层位以及相同的沉积环境(均为河口坝沉积)中,原生矿物成分的含量基本稳定,所以由X-衍射分析所得出的矿物成分含量变化主要是由成岩改造引起的。岩石结构和杂基成分含量则通过薄片统计得出,物性参数由常规物性分析得出。

3 层序界面成岩反应规律

样品中碎屑颗粒主要以石英、长石和变质岩岩屑为主。石英次生加大中等级别;长石类以钾长石居多,并广泛粘土岩化;岩屑类中除了变质岩岩屑外,还普遍富含喷出岩岩屑和泥质岩岩屑,其中喷出岩岩屑蚀变严重。方解石呈微晶-细晶结构胶结,并局部交代碎屑颗粒;埋藏晚期形成的铁方解石和铁白云石含量较少,主要呈微晶-显微晶结构。石榴石、电气石等重矿物较为常见。样品颗粒分选较好,磨圆中等,主要呈次棱角状。

按照济阳拗陷成岩阶段的综合划分标准,研究层位所处的成岩序列处于早成岩B期-晚成岩A期^[17]。

3.1 假杂基特征及分布规律

泥质杂基包括杂基和假杂基。其中,杂基主要是沉积物中与相对较粗的碎屑一同沉积下来的细粒填隙组分;而假杂基则主要是在机械压实过程中沉积颗粒间的松软碎屑经过变形和挤压,在坚硬颗粒间孔隙中形成的。假杂基含量是泥质碎屑和压实程度综合效应的产物^[11]。

假杂基在薄片呈不规则分布的褐色或浅灰色碎片,主要是由含高岭石、煤屑以及粉砂级石英颗粒的碎屑受较强的压实作用而形成。

薄片镜下统计表明,层序界面之下的泥质杂基含量大幅度增高(图3),这主要是受假杂基含量变化的影响,这种变化在高位体系域上部较为明显。在高位体系域末期,由于基准面下降伴随可容空间的下降,使得上覆水下分流河道等粗粒沉积物发生侧向迁移。这种侧向迁移对支流间湾等细粒沉积物进行冲刷侵蚀,造成相当多的泥质碎屑充填进入下伏砂体中,随后在埋藏压实过程中遭受诸如石英等刚性颗粒的挤压而成为假杂基。

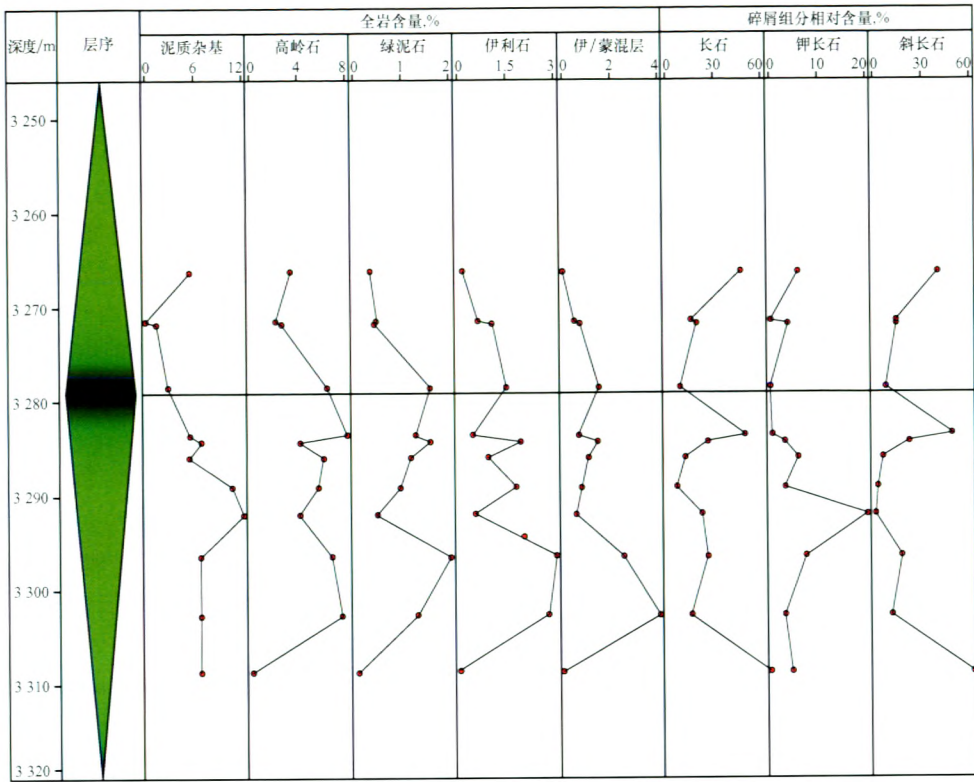


图3 杂基、粘土矿物以及长石类矿物在层序界面附近的含量变化

Fig. 3 Variation of content of matrix, clay minerals and feldspar(including potassium feldspar and plagioclase) in the vicinity of the sequence boundary

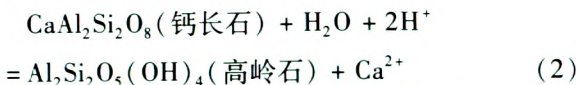
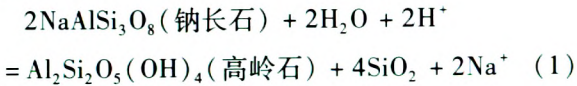
3.2 自生粘土矿物特征及分布规律

研究层段内常见的粘土矿物组合有高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石以及伊/蒙混层矿物(图3)。原生粘土矿物主要通过生物扰动和富含泥质流体的渗滤进入砂质沉积物中。而自生粘土矿物则主要是由不稳定硅酸盐碎屑或者先期形成的粘土矿物碎屑经改造而形成,如高岭石、磁绿泥石等。

自生粘土矿物的产生因素有很多^[6,10,11],包括:①从孔隙流体中的直接沉淀;②硅酸盐碎屑颗粒的交代产物;③粘土矿物的机械充填;④粘土颗粒碎屑的压实。这些因素都受到沉积环境和层序界面的共同影响。因此,自生粘土矿物含量在层序格架内表现出一定的分布规律。本文主要以高岭石为例,探讨层序界面处自生粘土矿物的分布规律。

通过粘土矿物X-衍射分析,发现层序界面下高岭石含量急剧增高(图3)。这主要是由于层序界面附近相对湖平面开始下降,大气淡水通过渗透层大面积充注于储层中,使得储层中硅酸盐颗粒(主要是不稳定的长石颗粒)广泛溶解或高岭

石化,在层序界面之下生成了大量的次生高岭石。反应式如下:



鉴于高岭石与长石矿物在成因上为此消彼长的转化关系,因此样品中的高岭石含量与长石含量成负相关关系(图4)。

3.3 碳酸盐胶结物特征及分布规律

无论是海相还是陆相地层,层序界面附近的碳酸盐胶结作用均较为普遍。界面附近沉积物中的碳酸盐生物碎屑也是方解石和白云石发生胶结作用的理想场所。

层序界面附近碳酸盐胶结物含量有明显的增幅(主要是白云岩含量的增加)(图5),其原因主要为以下4个方面^[8,12,13]:①层序界面附近沉积物较长的驻留时间;②湖水与大气淡水的混合;③极为敏感的碳酸盐颗粒被湖水冲刷;④存在着作为

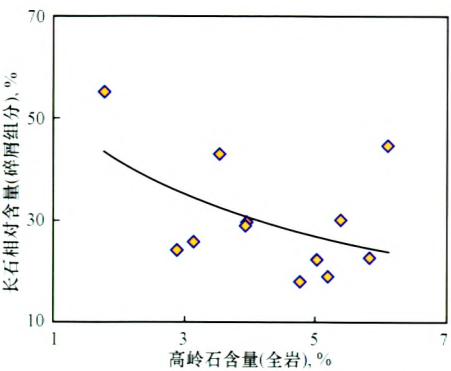


图4 样品内高岭石含量与长石含量的关系
Fig. 4 Relationship between kaolinite content and feldspar content of samples

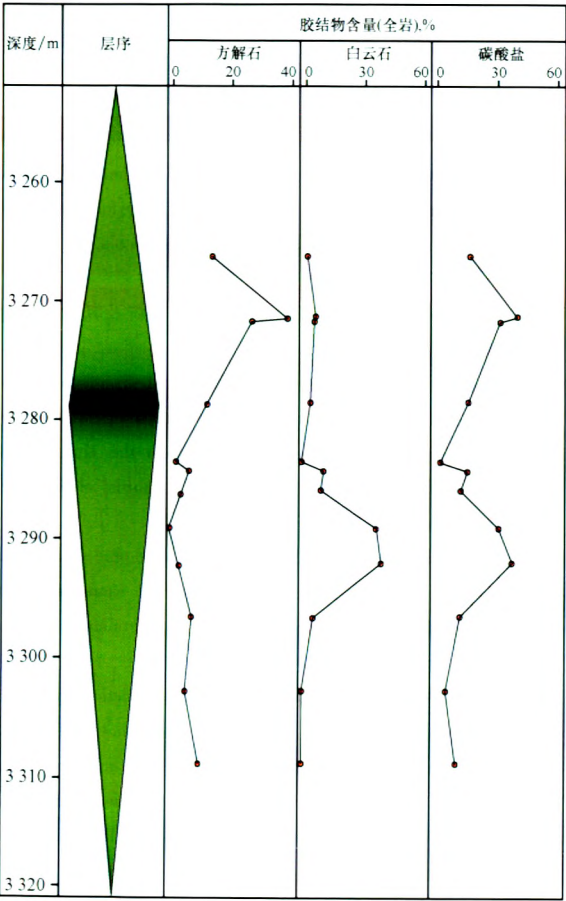


图5 碳酸盐胶结物含量在层序界面附近的纵向变化
Fig. 5 Vertical variation of content of carbonate cements in the vicinity of the sequence boundary

碳酸盐有利沉淀位置的碳酸盐生物碎屑。

4 成岩改造对储层储集物性的影响

成岩作用对储集物性的影响是多方面的。压

实作用无疑对储集物性有着强烈的破坏作用。但除此之外,层序界面附近的假杂基、碳酸盐胶结物以及高岭石胶结物的富集也对沉积物的储集物性有着多方面的影响。

4.1 假杂基

虽然没有相对应的杂基与储集物性的分析资料,但是可以肯定的是,层序界面之下沉积物中大量假杂基的出现必定使得粒间孔隙急剧减少。相应地,由于假杂基堵塞了孔喉和粒间孔,也使得沉积物的渗透率大幅度下降。

4.2 碳酸盐胶结物

层序界面之下沉积物中所富集的碳酸盐胶结物虽然在早成岩阶段可以减少压实作用对孔隙的破坏,对原生孔隙起着微弱的保护作用,但碳酸盐胶结物毕竟充填孔隙和堵塞喉道,且埋藏成岩阶段并未产生明显的溶蚀作用,因此早成岩阶段形成的碳酸盐胶结物严重破坏了储层的储集性能(图6)。

4.3 自生高岭石胶结物

层序界面之下储层中自生高岭石大量充填于粒间,在一定的程度上抑制了其他的胶结作用,而且高岭石具有渗透性且在晶间微孔中赋存地层流体,这也避免了储层被进一步压实,使得原生储集空间在一定程度上得以相对保存。而且在孔隙度和渗透率随埋深增加不断降低的背景下,充填孔隙的自生高岭石凭借其较为发育的晶间微孔,也增大了储层的储集空间^[12]。综上所述,自生高岭石胶结物对沉积物储集空间的保存具有积极意义(图7)。

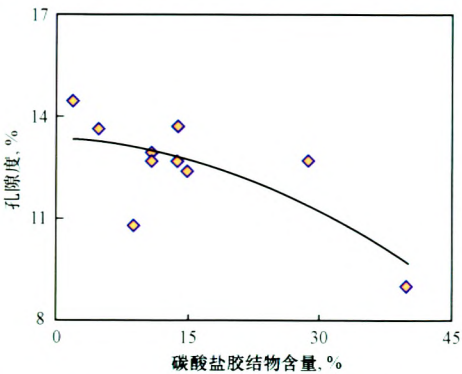


图6 样品孔隙度与碳酸盐胶结物含量之间的关系
Fig. 6 Carbonate cements content in relationship to reservoir porosity

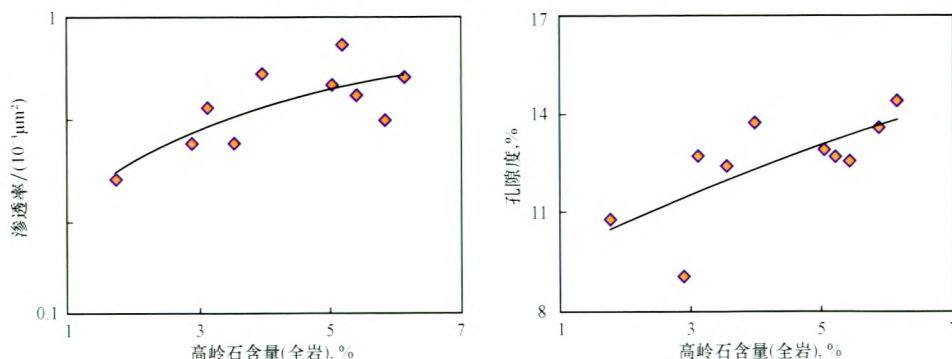


图7 样品内高岭石含量与储层储集物性之间的关系

Fig. 7 Kaolinite content in relationship to reservoir porosity-permeability

5 结论

1) 虽然硅质碎屑沉积物对孔隙水地化特性的变化不像碳酸盐岩那样反应敏感,但其早成岩作用在层序地层格架内仍然有着较强的规律性。

2) 由于层序界面代表着湖平面相对下降期,大气淡水大量充注于沉积物中,造就了极具特色的成岩现象,表现为层序界面下伏沉积物中假杂基、高岭石以及碳酸盐含量的增大,而不稳定的长石颗粒由于普遍高岭石化,表现为在层序界面下长石含量的大幅减少,并且长石含量与高岭石含量呈消长关系。

3) 假杂基和碳酸盐胶结物的富存,对层序界面下沉积物的孔渗性起着破坏作用;而高岭石凭借具有渗透性的晶间微孔,对沉积物储集空间的保存具有重要意义。在层序格架内探讨成岩反应规律对沉积物储集性能有着很好的预测作用。

参 考 文 献

- 1 李忠,陈景山,关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. 岩石学报,2006,22(8):2113~2122
- 2 刘成林,朱筱敏,朱玉新,等. 不同改造背景天然气储层成岩作用及孔隙演化特点[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):746~753
- 3 李艳霞,刘洪军,袁东山,等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响[J]. 石油与天然气地质,2003,24(3):274~280
- 4 邹华耀,郝芳,柳广弟,等. 库车冲断带巴什基奇克组砂岩自生

高岭石成因与油气成藏[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):786~793

- 5 熊伟,邱桂强,闵伟,等. 断陷湖盆基准面变化模式探讨[J]. 石油与天然气地质,2008,29(3):412~417
- 6 Worden R H, Morad S. Clay minerals in sandstones: controls on formation distribution and evolution[A]. In: Worden R H, Morad S, eds. Clay mineral cements in sandstones[C]. Oxford: Blackwell Publishing, International Association of Sedimentologists Special Publication, 2003, 34: 3~41
- 7 李忠,韩登林,寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报,2006,22(8):2151~2164
- 8 Ketzer J M, Morad S, Evans R. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72: 760~774
- 9 Ketzer J M, Holz M, Morad S. Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing, paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (early Permian), southern Brazil[J]. Sedimentology, 2003, 50: 855~877
- 10 Ketzer J M, Morad S, Amorosi A. Predictive diagenetic clay-mineral distribution in siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework[A]. In: Worden R H, Morad S, eds. Clay mineral cements in sandstones[C]. Oxford: Blackwell Publishing, International Association of Sedimentologists Special Publication, 2003, 34: 42~59
- 11 Ketzer J M, Morad S. Predictive distribution of shallow marine, low-porosity (pseudomatrix-rich) sandstones in a sequence stratigraphic framework-example from the Ferron sandstone, Upper Cretaceous, USA[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23: 29~36

(下转第462页)

(上接第454页)

- 12 Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Sup): 95 - 120
- 13 Al-Ramadan K, Morad S, Proust J N, et al. Distribution of diagenetic alterations in siliciclastic shoreface deposits within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Upper Jurassic, Boulonnais, NW France [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75: 943 - 959
- 14 Salem A M, Ketzer J M, Morad S. Diagenesis and reservoir-quality evolution of incised valley sandstones: evidence from the Abu Madi Gas Reservoirs (Upper Miocene), the Nile Delta Basin, Egypt [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75: 572 - 584
- 15 Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications [A]. In: *Concepts in sedimentology* [C]. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, 1999, 7: 210
- 16 王起琮. 旋回层序地层的控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 648 ~ 656
- 17 李阳. 惠民凹陷基山砂体成岩作用及对油气圈闭的影响[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2 205 ~ 2 212
- 18 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1997. 60 ~ 70
- 19 杨剑萍, 许正豪, 姜在兴, 等. 山东惠民凹陷中央隆起带古近系沙河街组层序地层特征及控制因素研究[J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 670 ~ 674
- 20 操应长, 姜在兴, 李春华, 等. 山东惠民凹陷中央隆起带古近系沙三段层序地层及沉积演化[J]. *古地理学报*, 2002, 4(3): 40 ~ 46
- 21 杨剑萍, 操应长. 惠民凹陷下第三系沙河街组基山砂体成因及石油地质意义[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(4): 9 ~ 12

(编辑 李 军)