

渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩特征及控制因素

鄢继华^{1,2}, 邓 远¹, 蒲秀刚³, 周立宏³, 陈世悦^{1,2}, 焦玉玺¹

[1. 中国石油大学(华东)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. 中国石油 大港油田 勘探开发研究院, 天津 300280]

摘要:渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段(孔二段)深水细粒沉积岩中普遍发育陆源碎屑与碳酸盐矿物的混合沉积。细粒沉积岩中的混合沉积样式可划分为组分混合和组构混合两种类型,组分混合表现为不同矿物在层内的混合沉积;组构混合表现为单一矿物纹层或组分混合纹层在垂向上的相互叠置。通过岩心精细描述、薄片镜下鉴定和全岩X-射线衍射分析等手段,认为沧东凹陷孔二段细粒沉积岩中发育两种组分混合类型:粘土-碳酸盐型组分混合(CM1)、长英质-碳酸盐-粘土型组分混合(CM2);以及4种组构混合类型:长英质/粘土-碳酸盐型组构混合(SM1)、长英质/粘土/碳酸盐型组构混合(SM2)、粘土/碳酸盐型组构混合(SM3)和粘土-碳酸盐/粘土-有机质型组构混合(SM4)等。混合沉积样式在垂向上主要呈两种组合形式,分别以云(灰)质细粒混合沉积岩和长英质细粒混合沉积岩为主导,自下而上均表现为块状、层状和纹层状的有序变化。气候变化形成云(灰)质细粒混合沉积岩为主导的垂向组合,而陆源碎屑供应强度变化则形成长英质细粒混合沉积岩为主导的垂向组合。

关键词:细粒沉积;混合样式;混合沉积;孔店组;沧东凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of fine-grained mixed sedimentary rocks from the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin

Yan Jihua^{1,2}, Deng Yuan¹, Pu Xiugang³, Zhou Lihong³, Chen Shiyue^{1,2}, Jiao Yuxi¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina, Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: Mixed clastic-carbonate deposits are widely distributed in the fine-grained sedimentary rocks from the 2nd Member of the Kongdian Formation in Cangdong Sag. The mixing styles of the fine-grained sedimentary rocks can be divided into componential mixtures (CM) and structural mixtures (SM). The componential mixtures are characterized by mixing of different minerals within one lamina. The structural mixtures feature in vertical overlying of different single-mineral laminae and componential mixture laminae. Through detailed core description, thin section observation and X-ray diffraction analysis, it was considered that there develop two types of componential mixtures in the 2nd Member of Kongdian Formation in Cangdong Sag, namely clay-carbonate (CM1) and felsic-carbonate-clay (CM2) componential mixtures. And there also develop four types of structural mixtures, namely felsic/clay-carbonate (SM1), felsic/clay/carbonate (SM2), clay/carbonate (SM3) and clay-carbonate/clay-organism (SM4) structural mixtures. There are two kinds of vertical combinations both with a bottom-up order change from massive structure to bedded structure and lamina structure. The vertical combination dominated by dolomitic (limy) fine-grained mixed sedimentary rocks is formed due to climate changes. And the vertical combination dominated by felsic fine-grained mixed sedimentary rocks is due to the changes in supply intensity of terrigenous materials.

Key words: fine-grained deposit, mixed style, mixed deposit, Kongdian Formation, Cangdong Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2016-07-03;修订日期:2016-12-20。

第一作者简介:鄢继华(1977—),男,副教授,沉积学。E-mail:upcyanjihua@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572087);中央高校基本科研业务费专项(15CX06004A)。

陆源碎屑与碳酸盐的混合沉积是自然界中广泛发育的沉积类型,从古到今、从海洋到湖泊、从淡水到咸水均有混合沉积发育的实例^[1]。在20世纪80年代以前,混合沉积的研究多限于岩性和产状的描述^[2-3],1984年Mount总结了前人的研究成果,首次提出“混合沉积物”(mixed sediments)的概念^[4],即硅质碎屑与碳酸盐在结构上的相互掺杂,或者纯的硅质碎屑岩与碳酸盐岩的旋回性互层或侧向交叉,该概念在国际上得到了推广,并为国内学者接受并加以扩展^[5-7],此后陆续有学者对混合沉积的分类、成因和沉积环境等基本理论问题进行研究^[8-10],并将混合沉积引入层序地层学领域^[11-12]。20世纪90年代之后,学者们致力于混合沉积的沉积机制、控制因素、沉积相模式及其与油气关系的研究^[13-19],使得人们对混合沉积的认识日趋成熟。

目前已有的混合沉积理论体系多局限于粗粒碎屑物与碳酸盐的混合沉积,对粒径小于0.062 5 mm的细粒沉积物而言,传统上认为其与粗碎屑相比岩性单一、变化较少。但随着微观测试技术的发展及其在细粒沉积岩中的普遍应用,学者们发现湖相盆地深水区广泛沉积的细粒沉积岩,内部也存在复杂的混合现象,细粒的陆源长英质矿物、粘土矿物和碳酸盐矿物在成分上和构造上相互掺混,形成了细粒的混合沉积岩^[20-21]。目前关于细粒沉积岩的分布^[22]、岩相类型与特征^[23-25]、生储条件^[26-28]和油气资源评价^[29]等研究已取得一系列进展,但对深水区细粒物质混合沉积的相关研究较为薄弱。本文以沧东凹陷孔店组二段(孔二段)细粒混合沉积岩为研究实例,通过岩心精细观察描述、薄片鉴定和全岩X-射线衍射分析等手段,建立了工区细粒混合沉积岩的分类方案,划分出典型的混合沉积样式,并探讨湖泊深水区细粒物质混合沉积作用的控制因素,以期为湖相盆地中非常规油气的勘探开发提供理论依据。

1 沉积背景

沧东凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷南侧,是夹持于沧县隆起、徐黑凸起和孔店凸起之间的一个次级构造单元^[30],孔二段沉积时期,盆地边界的沧东断层、徐西断层尚未开始活动,沧东凹陷为拗陷型封闭湖盆,在湖盆中心发育一套分布较广、以细粒混合沉积岩为主的沉积建造,厚度约400~600 m,横向分布稳定。孔二段沉积可分4个亚段,其中孔二段2亚段上部和孔二段4亚段发育厚约50 m的致密砂岩,孔二段1亚

段、孔二段2亚段下部和孔二段3亚段为细粒混合沉积岩发育段(图1b)。由于湖盆范围较小,受环湖盆多个物源体系的影响,凹陷中形成的细粒混合沉积岩成分复杂、类型丰富(图1a),是研究湖相深水细粒物质混合沉积作用的良好对象。

工区内有多口钻遇孔二段的取心井,其中G108-8井、GD12井和GD14井等针对孔二段深水细粒混合沉积岩进行了共计500余米的系统取心,并开展了岩心精细描述和相关分析化验测试,为本文的研究提供了丰富的资料。

2 细粒混合沉积岩沉积特征

2.1 细粒混合沉积岩的矿物组成

X-射线衍射分析结果显示,沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩中,长英质矿物含量多集中在20%~40%,平均为33%,以石英和斜长石为主;碳酸盐矿物含量变化范围较大,多在10%~60%之间浮动,平均为35.4%,其中白云石含量占27%;粘土矿物含量较低,很少超过30%,平均15.6%;此外,90%以上的细粒混合沉积岩中均含有1%~31%不等的方沸石,平均含量为14.1%。

结合对其他盆地相关情况的调研,可以看出我国陆相湖盆细粒混合沉积岩的矿物组成特点为长英质矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物含量较平均,都在30%左右,某种矿物平均含量超过50%的情况很少见(表1),表明在湖相盆地中,细粒物质的搬运和沉积过程普遍受到较强程度的混合沉积作用影响。

2.2 细粒混合沉积岩的分类与命名

针对混合沉积岩的岩石分类与命名,目前的争议主要集中于两个方面:一是混合沉积岩的含量界定,即陆源碎屑和碳酸盐在多少含量范围内可以称为混合沉积岩;二是划分岩石类型时选取的矿物端元,即如何建立相对完善的混合沉积岩分类方案。笔者通过总结前人在湖相深水细粒混合沉积岩领域的研究成果,结合在沧东凹陷孔二段的研究工作认为,湖相深水细粒沉积物对水体性质、气候以及水动力条件等环境因素的变化非常敏感,环境的变化会引起湖盆中混合沉积作用机制和强度的改变,而这些变化的沉积响应直接体现在沉积物矿物含量的细微区别上,因此每种混合比例均有其独特的环境地质意义,不应当设立具体的含量界限。此外,大量的研究实例表明,湖相深水细粒混合沉积岩中长英质矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物占据

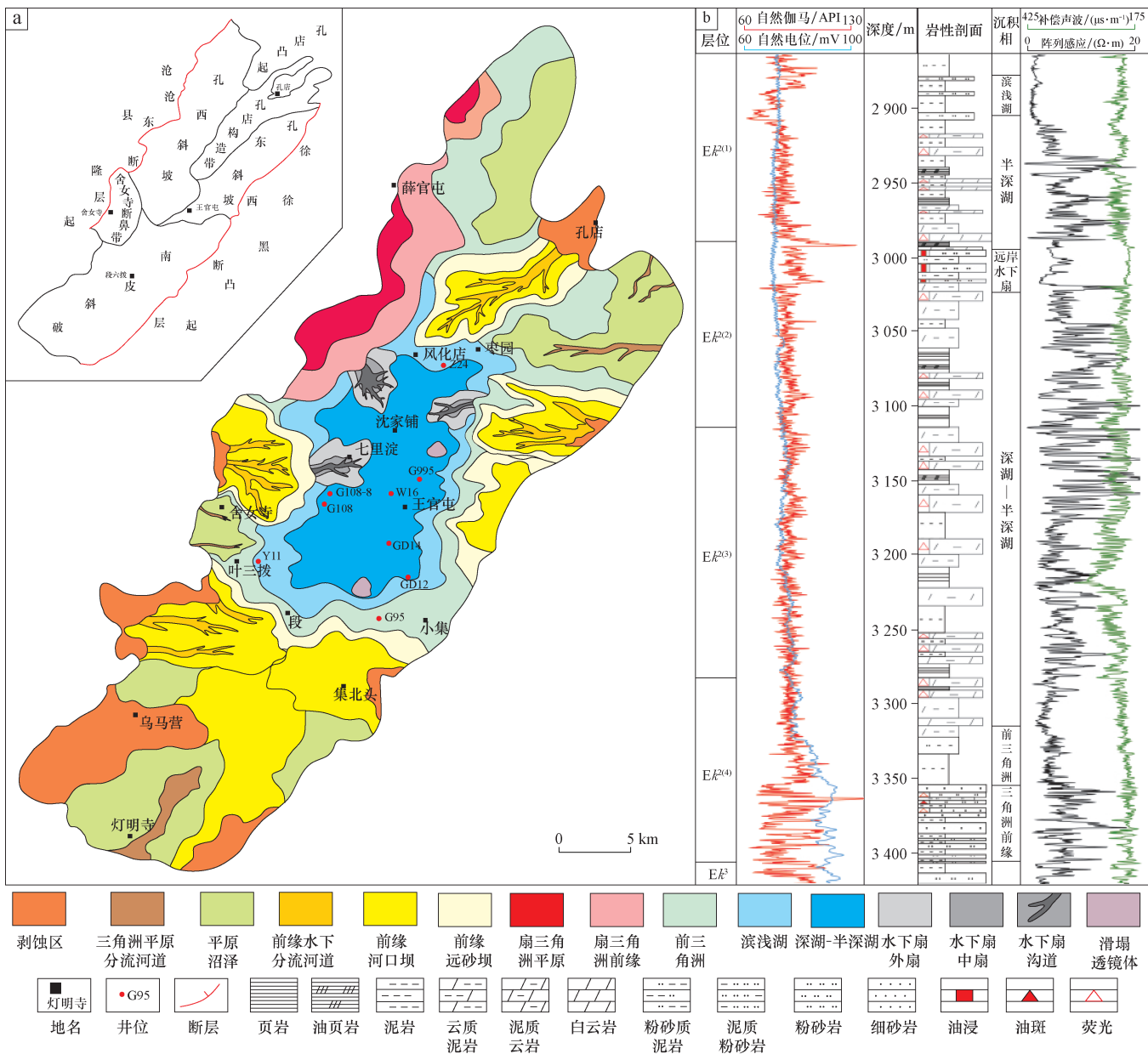


图 1 沧东凹陷孔二段沉积体系及地层综合柱状图

Fig. 1 Plan view of sedimentary systems and histogram from the 2nd Member of the Kongdian Formation in the Cangdong Sag

a. 沉积体系平面图; b. 岩性综合柱状图

表 1 中国湖相细粒混合沉积岩矿物组成

Table 1 Mineral composition of fine-grained sedimentary rocks in different lacustrine basins of China

地层	矿物组成/%				数据来源
	长英质矿物	碳酸盐矿物	粘土矿物	其他矿物	
东营凹陷沙三下亚段	33.3	38.0	25.9	2.8	文献[31]
东营凹陷沙四下亚段	35.4	36.7	24	2.6	文献[31]
沾化罗家地区沙三段	19.0	58.5	18.5	4.0	文献[32]
泌阳凹陷核桃园组	37.9	25.3	32.6	16.25	文献[33]
沧东凹陷孔二段	33.0	35.4	15.6	16	本文

了矿物总量的绝对主体^[20,34],应将其作为划分岩石类型的依据,而硫酸盐矿物、卤化物或凝灰质等其他矿物类型属于特殊环境条件下的产物,它们的混合远不如陆源碎屑和碳酸盐混合作用那样广泛^[15],可根据需要结合盆地情况将其作为 3 端元之外的特殊组分来参与岩石命名。

综上所述,为了便于开展细粒混合沉积岩中混合沉积作用的研究,笔者选取碳酸盐矿物、粘土矿物和长英质矿物作为 3 个端元,以“细粒混合沉积岩”作为命名主体,依据长英质矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物含量的相对高低,将细粒混合沉积岩划分为云(灰)质细粒

混合沉积岩、粘土质细粒混合沉积岩和长英质细粒混合沉积岩3大类。将G108-8井、GD14井和GD12井的全岩X-射线衍射数据进行相对矿物含量的三角图投点,结果表明,沧东凹陷孔二段主要发育云(灰)质细粒混合沉积岩和长英质细粒混合沉积岩,二者占到该地区细粒混合沉积岩总量的95%以上,而粘土质细粒混合沉积岩数量很少(图2)。

3 混合沉积样式与特征

与形成于浅水过渡环境的粗粒混合沉积岩类似,宏观尺度的岩心观察描述、微观尺度的偏光显微镜和扫描电镜观察均表明,湖相深水细粒沉积岩中陆源碎屑矿物(包括长英质矿物和粘土矿物)和碳酸盐矿物以多种方式发生混合,形成了丰富的混合沉积样式类型,证明半深湖-深湖区也存在复杂的混合沉积作用机制。笔者通过归纳总结,认为研究区细粒混合沉积岩的混积样式可以分为两大类,一类是陆源碎屑矿物与碳酸盐矿物在同一层内(单层厚度通常大于20 mm)的混合,内部表现为块状层理,将这种类型称为“组分混合”(componential mixture);另一类是不同的纹层在垂向上相互叠置构成的混合沉积,宏观上表现为纹层状构造(单层厚度<1 mm)或层状构造(单层厚度1~10 mm),这种类型称为“组构混合”(structural mixture)。构成组构混合的单层可以是纯的陆源碎屑层、碳酸盐层,也可以是由两种或两种以上矿物组成的组分混合沉积层。在将混合沉积样式划分为两大类的基礎上,依据具体的混合沉积矿物组分,对混合沉积样式进一步细分。

为了描述和区分不同的混合方式,同时强调纹层

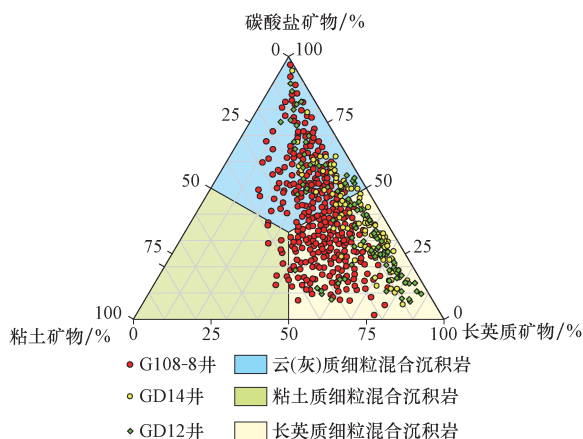


图2 沧东凹陷细粒混合沉积岩分类

Fig. 2 Types of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Cangdong Sag

之间的接触关系,在对其命名时以“/”来表示纹层间的叠置,“-”表示单层内部的矿物混合。

3.1 组分混合

组分混合型的深水细粒混合沉积岩通常宏观上不发育纹层,以单层厚度较大的块状层理为主。镜下观察其矿物组分,以长英质矿物、粘土矿物和碳酸盐矿物中的两者或三者的均匀混合为特征,不显定向性,有时还含有少量的黄铁矿、方沸石、生物介壳碎片或有机质等。通常认为,块状层理代表了悬移载荷的速率较快的连续沉降作用,不存在湖水分层或季节性的沉积间断^[35],部分样品具有较高的长英质颗粒,往往与较强的陆源供给或者风的搬运沉积作用有关。沧东凹陷发育的组分混合类型主要包括粘土-碳酸盐型组分混合(CM1)和长英质-碳酸盐-粘土型组分混合(CM2)。

3.1.1 粘土-碳酸盐型组分混合(CM1)

该类型的混合沉积主要发育在云(灰)质细粒混合沉积岩中,碳酸盐矿物含量在61%~89%,平均为77%,以白云石为主,其次是粘土矿物,平均为13%,还有少量的长英质矿物。岩心观察整体呈褐色或褐灰色(图3a),除常见的块状层理外,部分层段碳酸盐矿物局部富集而呈透镜状。丰富的液化变形现象与成岩收缩缝是在岩心上识别该混积样式的重要依据。镜下多见重结晶程度较高的泥晶-粉晶碳酸盐晶粒与粘土杂基均匀混合(图3b,c),常见有零星的长英质矿物分散其中。由于该混合类型后期重结晶作用强,矿物晶间孔与成岩收缩缝较为发育(图3a),与其他混积样式相比具有更好的储集能力,因此在荧光扫描下岩心显示强烈的橙黄色荧光,说明游离烃类趋于在该混积样式中聚集。

3.1.2 长英质-碳酸盐-粘土型组分混合(CM2)

该混积样式在长英质细粒混合沉积岩和云(灰)质细粒混合沉积岩中均有发育,X-射线衍射数据表明,该类细粒混合沉积岩不存在平均含量在50%以上的矿物类型,碳酸盐矿物含量通常在35%~45%,粘土矿物含量多在25%左右,长英质矿物含量30%~40%。岩心观察多呈灰色-深灰色的均一块状,当其中的长英质矿物粒径较粗时,还可观察到散点状分布的长英质矿物颗粒(图3d),镜下多为泥晶-微晶碳酸盐矿物、粘土矿物和长英质矿物颗粒的均匀混合,整体不具有定向性(图3e,f)。与粘土-碳酸盐型组分混

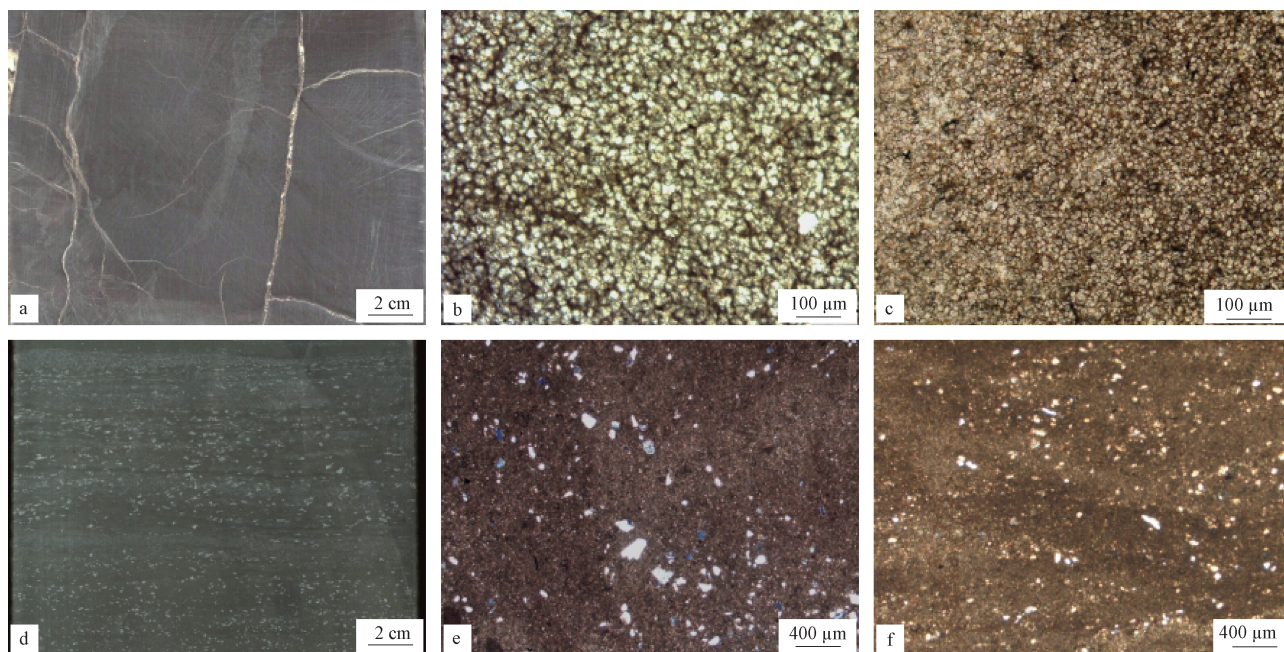


图3 沧东凹陷组分混合型细粒沉积岩特征

Fig. 3 Characteristics of fine-grained componential mixed sedimentary rocks in the Cangdong Sag

- a. CM1,埋深2 934.2 m,G108-8井;b. CM1,正交光,埋深2 942.3 m,G108-8井;c. CM1,单偏光,埋深4 110.43 m,GD14井;
d. CM2,埋深3 821.63 m,GD12井;e. CM2,正交光,埋深2 951.4 m,G108-8井;f. CM2,单偏光,埋深2 925.99 m,G108-8井

合相比,“低碳酸盐、低粘土、高长英质”的特点反映了其形成于水动力更强、陆源影响更明显的强混合环境中。

3.2 组构混合

组构混合型细粒沉积岩对应广义混合沉积岩中的互层或夹层型混合沉积,特点是不同成分的纹层在垂向上叠置产出,发育纹层状或层状构造。研究表明,纹层是湖泊沉积记录的基本单位,包含了气候变化、事件沉积、湖泊水体性质演化等多种地质信息,对研究湖泊深水区的混合沉积环境有很大帮助。湖相深水细粒混合沉积岩中的纹层类型丰富,除了纯的碳酸盐层和陆源碎屑层外,还有各类混合沉积纹层、有机质纹层和方沸石层等,纹层的组合关系也更为复杂。过去认为安静分层水体条件下的悬浮沉降是最常见的纹层成因,近年来通过开展湖泊沉积动力学研究和水槽实验模拟,发现絮凝沉淀、底流改造和浊流沉积等也可以形成成分及特点各异的纹层^[36-39],因此不同类型的纹层相互叠置实际上代表了沉积环境和混合机制的快速旋回变化。

沧东凹陷主要发育的组构混合类型有长英质/粘土-碳酸盐型组构混合(SM1)、长英质/粘土/碳酸盐型组构混合(SM2)、粘土/碳酸盐型组构混合(SM3)和粘土-碳酸盐/粘土-有机质型组构混合(SM4)。

3.2.1 长英质/粘土-碳酸盐型组构混合(SM1)

长英质/粘土-碳酸盐型组构混合中,长英质矿物含量较高,平均在60%左右,粘土矿物和碳酸盐矿物的平均含量均在20%以下,主要发育在长英质细粒混合沉积岩中。岩心上可以见到灰白色的长英质矿物呈透镜状、断续层状或薄纹层状产出,与颜色相对较深的灰色-褐灰色粘土-碳酸盐纹层形成互层(图4a)。镜下观察,长英质纹层主要由10 μm以下的泥级颗粒组成,粘土-碳酸盐纹层则由粘土矿物和泥晶白云石的组分混合构成,二者的接触面通常呈不规则波曲状(图4b)。极少样品中的长英质纹层达到了粉砂级,且发育粒序层理(图4c),表明其形成于突发性大洪水或滑塌事件引起的浊流沉积,而常见的泥级长英质纹层多形成于悬移载荷的搬运和沉降,二者的沉积与混合机制不同^[40],在研究中应注意区分。

3.2.2 长英质/粘土/碳酸盐型组构混合(SM2)

长英质/粘土/碳酸盐型组构混合是气候季节性旋回变化背景下的典型产物^[41],与长英质/粘土-碳酸盐型组构混合相比,碳酸盐矿物含量增多,平均在40%,长英质矿物含量减少,平均为33%,粘土矿物的含量依然在20%左右。岩心观察可见纹层较为平直,单个纹层的厚度在1~10 mm不等,纹层间的界线不

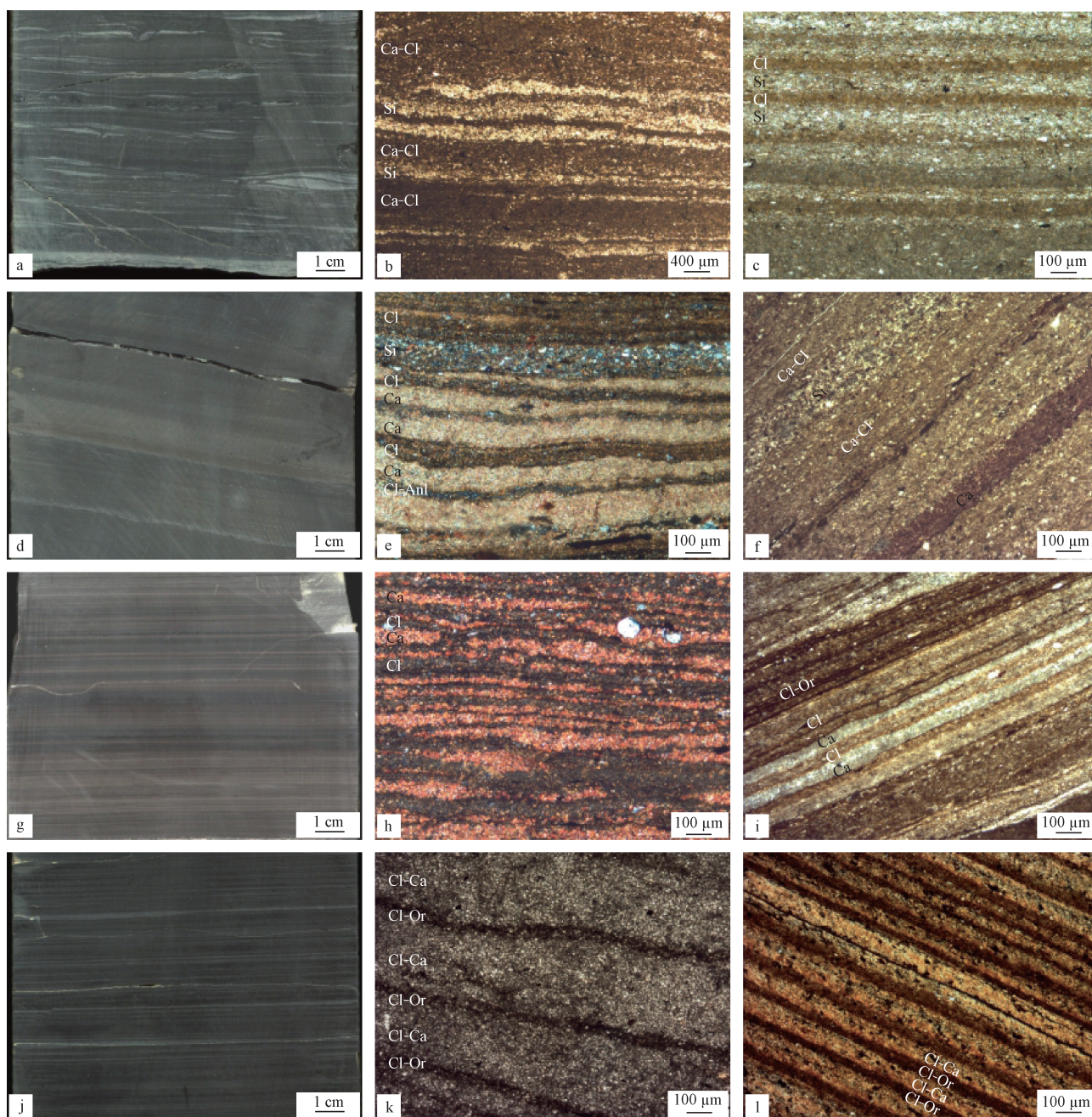


图4 沧东凹陷组构混合型细粒混合沉积岩特征

Fig. 4 Characteristics of fine-grained structural mixed sedimentary rocks in the Cangdong Sag

a. SM1,埋深3 823.35 m,GD12井;b. SM1,单偏光,埋深2 929.89 m,G108-8井;c. SM1,单偏光,埋深2 984.12 m,G108-8井;d. SM2,埋深4 109.5 m,GD14井;e. SM2,正交光,埋深3 295.73 m,G108-8井;f. SM2,单偏光,埋深3 212.36 m,G108-8井;g. SM3,埋深2 984.9 m,G108-8井;h. SM3,正交光,埋深3 270.15 m,G108-8井;i. SM3,正交光,埋深3 018.59 m,G108-8井;j. SM4,埋深3 196.57 m,G108-8井;k. SM4,单偏光,埋深3 037.08 m,G108-8井;l. SM4,正交光,埋深3 218.96 m,G108-8井

Ca. 碳酸盐矿物; Si. 长英质矿物; Cl. 粘土矿物; Anl. 方沸石; Or. 有机质

够清晰,垂向上的纹层旋回变化主要表现为颜色的不同(图4d)。镜下观察,纹层的组合关系呈现“粘土纹层、碳酸盐纹层重复叠置,夹少量长英质纹层”的特点(图4e)。少量长英质纹层的出现,证明原本安静的深湖区在特定条件下也可以受到强陆源输入的影响,破坏原有的粘土/碳酸盐季节层偶。部分长英质纹层和

粘土纹层之间不存在明显界线,呈过渡接触关系(图4f),表明二者的沉积过程具有连续性。

3.2.3 粘土/碳酸盐型组构混合(SM3)

该类型的组构混合中粘土矿物含量平均为 18%，碳酸盐矿物含量平均为 63%，其余为长英质矿物和少

量的黄铁矿、方沸石等,是云(灰)质细粒混合沉积岩另一种常见的混合沉积样式。相较于SM1和SM2组构混合,粘土/碳酸盐型组构混合细粒沉积岩的纹层特征更为显著,岩心观察中以褐色白云质纹层(若碳酸盐层的成分主要是方解石则为浅灰白色)和灰黑色粘土纹层的互层为特征,纹层细密、平直、连续性好且界线清晰(图4g),厚度在1 mm以下,偶有后期构造活动引起的纹层错断或变形现象。镜下观察同样可见浅色泥-微晶碳酸盐纹层与暗色粘土纹层组成明暗相间的层偶,碳酸盐纹层厚度通常大于粘土纹层(图4h,i),纹层间有少量星散状分布的细粉砂级孤立长英质颗粒,棱角-次棱角状,将底部的粘土或碳酸盐纹层压弯(图4h),与王冠民等在济阳坳陷页岩中识别的风成粉砂特征一致^[42],推测具有相同的成因。

3.2.4 粘土-碳酸盐/粘土-有机质型组构混合(SM4)

有机质含量高(TOC平均含量在4.5%以上)、颜色深是该混合样式最显著的特征,主要矿物成分为碳酸盐矿物和粘土矿物,二者总量平均为81%,还含有10%左右的长英质矿物和黄铁矿等。与SM3型组构混合类似,岩心上纹层特征显著,区别在于整体颜色更深,表现为深灰色与灰黑色纹层的薄互层(图4j);镜下观察,基本不发育纯的碳酸盐纹层,多为颜色稍亮的粘土-碳酸盐混合纹层与黑褐色的粘土-有机质纹层在垂向上规律叠置(图4k),常见散点状或针尖状黄铁矿颗粒分散于粘土-碳酸盐混合纹层中或单独聚集成层(图4l)。高有机质含量不仅指示湖泊有较高的生产力,也表明沉积时期湖底处于安静、缺氧的强还原环境,水循环作用停滞、缺少底栖生物活动,从而避免有机质遭到破坏及氧化分解,是长期稳定存在的湖水分层条件下的沉积产物。

4 垂向组合规律

沧东凹陷孔二段细粒混合沉积岩混积样式类型多样,不同类型的组分混合和组构混合看似混乱产出,其实垂向上具有明显的组合规律。以官108-8井孔二段为例,细粒混合沉积岩垂向的混积样式主要表现为两种组合形式,岩石类型分别以云(灰)质细粒混合沉积岩和长英质细粒混合沉积岩为主,自下而上均表现为块状、层状和纹层状的有序变化。

4.1 云(灰)质细粒混合沉积岩为主的垂向组合

云(灰)质细粒混合沉积岩为主的垂向组合在官

108-8井孔二段细粒沉积岩中比较发育,整体表现为碳酸盐矿物含量较高、长英质矿物含量较低,自下而上碳酸盐矿物含量逐渐减少、粘土矿物含量逐渐增加。以G108-8井埋深2 977.00~2 977.35 m段取心为例(图5),该段岩心的底部(埋深2 977.21~2 977.35 m)属于粘土-碳酸盐型组分混合(CM1),岩心为灰褐色、块状,表面可见液化变形现象,镜下呈现典型的均一组分混合特征,该混合类型以较高的碳酸盐矿物含量和组分混合为特点。该段中部(埋深2 977.10~2 977.21 m)属于粘土/碳酸盐型组构混合(SM3),由底部的块状层理转变为纹层状构造,岩心上可以看到褐色的亮纹层和深灰色的暗纹层相互叠置,镜下显示亮纹层主要成分为碳酸盐矿物(白云石为主),暗纹层主要成分为粘土矿物。该段顶部(埋深2 977.00~2 977.10 m)是典型的粘土-碳酸盐/粘土-有机质型组构混合(SM4),岩心上深色纹层细密且平直,是整段岩心颜色最深的部位,表明粘土矿物和有机质含量较高。

这种垂向组合形式主要反映了沉积区陆源供应能力较弱,气候由干旱向潮湿转化,干旱的强度决定了底部CM1型组分混合的厚度。如果气候以半干旱-半潮湿为主,则CM1组分混合不发育,主要沉积SM3型和SM4型组构混合。

4.2 长英质细粒混合沉积岩为主的垂向组合

以长英质细粒混合沉积岩为主的垂向组合,长英质矿物含量普遍较高、碳酸盐矿物和粘土矿物含量较低,层状和纹层状发育。以G108-8井埋深3 336.95~3 337.2 m段取心为例(图6),该段岩心的底部(埋深3 337.11~3 337.2 m)属于长英质/粘土/碳酸盐型组构混合(SM2),岩心为深灰色,纹层特征显著,镜下呈现粘土纹层、碳酸盐纹层相互叠置,夹少量长英质纹层。该段中部(埋深3 337.07~3 337.11 m)为长英质-碳酸盐-粘土型组分混合(CM2),岩心上为浅灰色、块状,夹在顶底纹层状构造之间,镜下多为长英质矿物、粘土矿物和碳酸盐矿物均匀混合,局部见微型粒序层理,该类型以较高的长英质矿物含量为特征。顶部(埋深3 337.11~3 337.2 m)发育长英质/粘土-碳酸盐型组构混合(SM1),岩心上常见浅灰色长英质纹层,镜下观察以较亮的长英质纹层和较暗的粘土-碳酸盐纹层相互叠置为主,整体上长英质矿物含量较高。

这种垂向组合形式反映了沉积区受较强陆源供给影响,长英质矿物含量高。物源供应较强时,悬移载荷

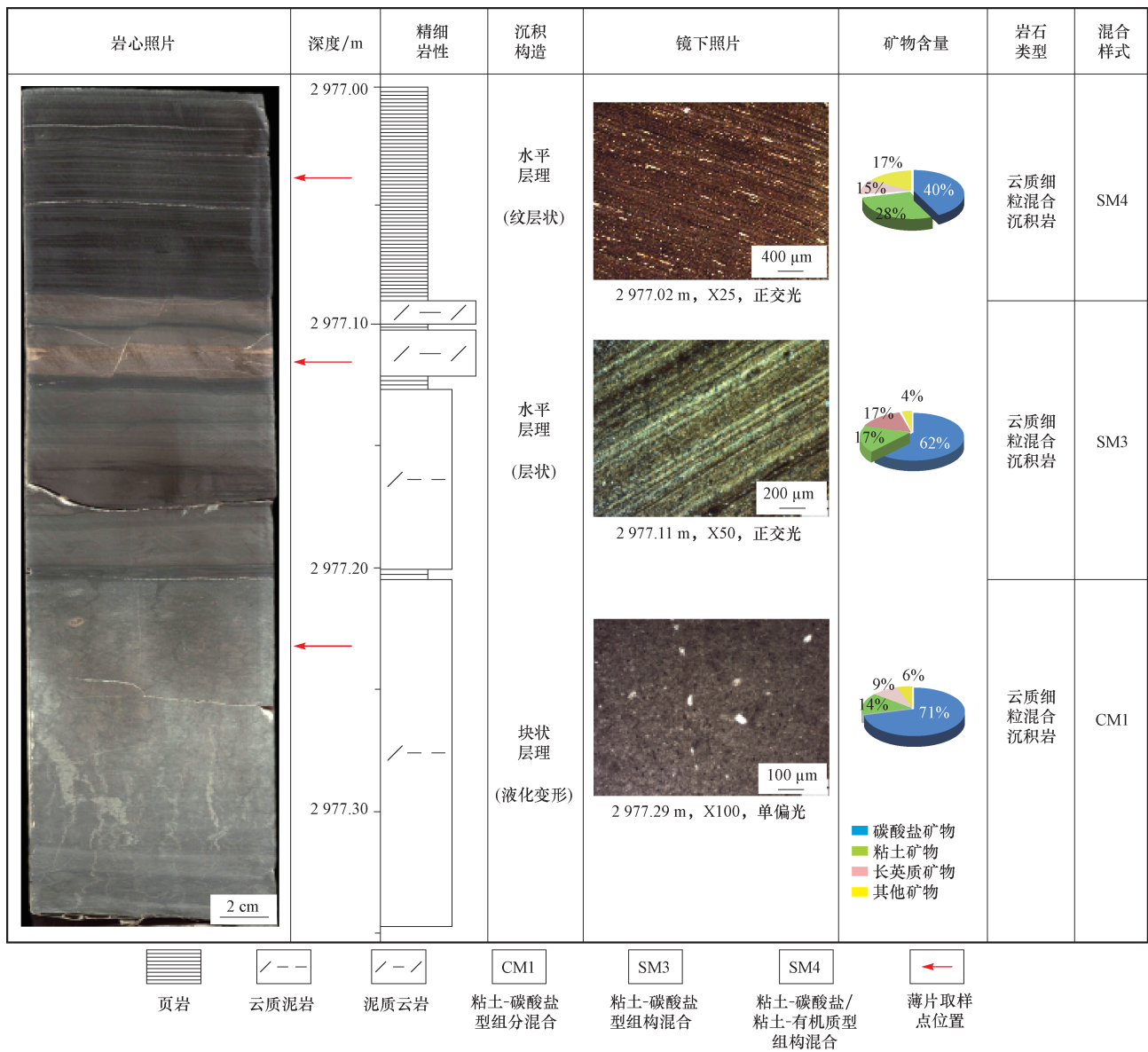


图 5 沧东凹陷 G108-8 井云(灰)质细粒混合沉积样式垂向组合

Fig. 5 Vertical combination of dolomitic (limy) fine-grained mixed deposits in Well G108-8, the Cangdong Sag

数量多,快速沉降,以块状或者微粒序层理的 CM2 型组分混合为主;当陆源输入逐渐减弱,受季节性的气候变化影响开始沉积 SM1 型和 SM2 型组分混合。

5 混合沉积作用的控制因素

前人针对海相混合沉积做了大量研究工作,认为混合沉积主要受控于构造活动、海平面变化、物源供给、气候和水动力条件等因素^[44-45]。沧东凹陷在孔二段沉积期为一坳陷型封闭湖盆,湖盆范围小、水体浅,气候温暖潮湿,陆源碎屑供应充足,周边断层活动较弱,深水区的细粒混合沉积岩的形成主要受气候变化和陆源碎屑供应强度的综合影响,形成了不同混积样

式的细粒混合沉积岩及其垂向组合。

5.1 气候变化

湖泊对气候的变化非常敏感,主要体现在湖盆水体深度、物理化学性质、生物数量与类型等多个方面。沧东凹陷孔二段沉积期气候整体温暖潮湿,但仍存在气候的季节性旋回变化,进而直接影响了深水区细粒沉积岩的沉积类型与混积样式。对以气候变化为主控因素的湖盆深水区,多发育碳酸盐矿物含量较高的云(灰)质细粒混合沉积岩,在气候短期异常干旱时期,碳酸盐矿物从湖盆水体中快速析出沉淀,形成富碳酸盐矿物的 CM1 组分混合,随着气候的逐渐潮湿,碳酸盐矿物析出速率减弱,细粒物质沉降速度慢,逐渐形成

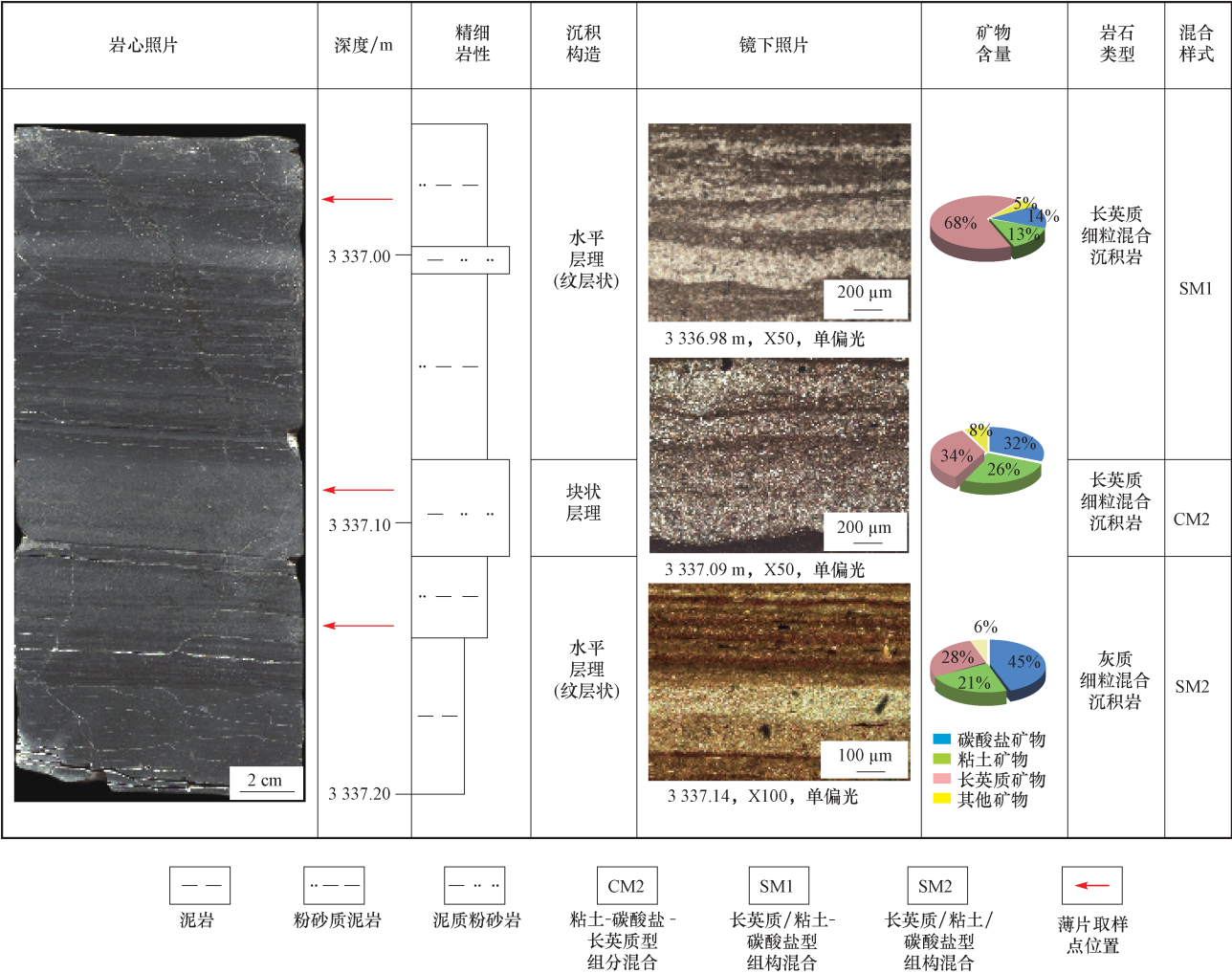


图 6 沧东凹陷 G108-8 井长英质细粒混合沉积样式垂向组合

Fig. 6 Vertical combination of felsic fine-grained mixed deposits in Well G108-8, the Cangdong Sag

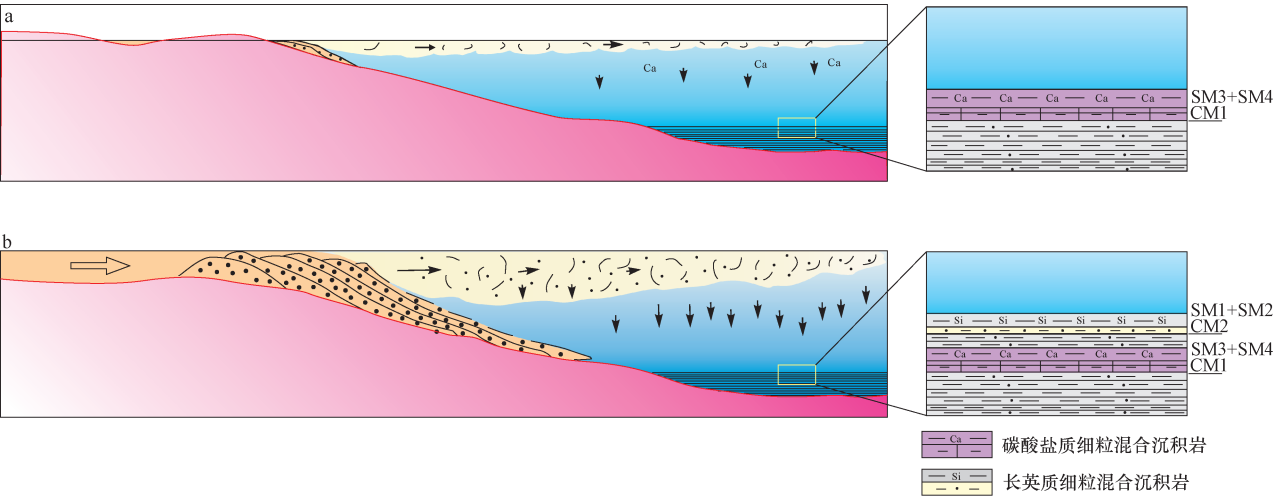


图 7 湖相深水区细粒混合沉积岩沉积过程分析模式

Fig. 7 Deposition process of fine-grained mixed deposits in deep lacustrine facies

- a. 气候暂时性干旱,湖盆水体咸化、碳酸盐溶液饱和,快速析出沉淀,形成云(灰)质细粒混合沉积岩;
b. 陆源碎屑供应能力强,更多的长英质和粘土质悬浮负载搬运至深水区,并快速沉降

层状、纹层状的 SM3 和 SM4 组构混合的细粒混合沉积岩(图 7a)。这一过程反映了气候变化影响因素的减弱。

5.2 陆源碎屑供应强度

孔二段沉积期沧东凹陷盆地周缘具有多物源供应体系,较粗的碎屑物质在滨岸浅水地带发生了搬运和沉积,而细的悬浮物质则被搬到深水区发生沉积。洪水期,陆源碎屑物质供应能力强,大量悬移载荷的细粉砂和粘土搬运至深水区,沉积具有较高长英质矿物的细粒混合沉积物,形成 CM2 型的组分混合或 SM1 型组构混合样式。平水期,陆源碎屑物质供应能力减弱,悬移载荷搬运至深水区的长英质矿物减少,沉积速率减慢,形成粘土质细粒混合沉积岩,并逐渐向云(灰)质细粒混合沉积岩过渡。此时多形成 SM2、SM3 组构混合的细粒混合沉积岩(图 7b)。这一变化,基本反映了陆源碎屑供应影响的减弱和气候变化影响能力的增强。

6 结论

1) 沧东凹陷孔二段沉积时期深水区广泛发育细粒混合沉积岩,依据主要矿物类型与相对含量划分为长英质细粒混合沉积岩、云(灰)质细粒混合沉积岩和粘土质细粒混合沉积岩。研究区以长英质和云(灰)质细粒混合沉积岩为主。

2) 根据陆源碎屑和碳酸盐混合的比例和方式不同,将细粒混合沉积岩的混合样式分为组分混合和组构混合两大类。研究区主要发育粘土-碳酸盐型组分混合(CM1)和长英质-碳酸盐-粘土型组分混合(CM2),以及长英质/粘土-碳酸盐型组构混合(SM1)、长英质/粘土/碳酸盐型组构混合(SM2)、粘土/碳酸盐型组构混合(SM3)和粘土-碳酸盐/粘土-有机质型组构混合(SM4)。

3) 研究区细粒混合沉积岩的混积样式在垂向上表现为两种组合形式,岩石类型分别以云(灰)质细粒混合沉积岩和长英质细粒混合沉积岩为主,自下而上均表现为块状、层状和纹层状的有序变化。

4) 沧东凹陷孔二段深水细粒混合沉积岩的形成和发育受气候变化和陆源碎屑供应双重因素的影响。一般来说,气候变化影响下多形成云(灰)质细粒混合沉积岩,陆源碎屑影响下形成长英质细粒混合沉积岩,而两种因素的共同影响则形成复杂的混积样式和垂向组合。

参 考 文 献

- [1] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报,1989,16(2):87-92.
Zhang Jinquan, Ye Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1989, 16(2):87-92.
- [2] Maxwell W G H, Swinchart J P. Great barrier reef: regional variation in a terrigenous-carbonate province[J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(3):691-724.
- [3] Button A, Vos R G. Subtidal and intertidal clastic and carbonate sedimentation in a macrotidal environment: an example from the lower proterozoic of South Africa[J]. Sedimentary Geology, 1977, 18(1):175-200.
- [4] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. Geology, 1984, 12(7):432-435.
- [5] 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 Qing'an. Sedimentary environment of the middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan province: A kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2):59-66.
- [6] 王宝清,胡明毅. 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(4):285-290.
Wang Baoqing, Hu Mingyi. Mixed carbonate-terrigenous clastic sediments of middle Triassic Badong Formation in Nanzhang, Hubei [J]. Oil & Gas Geology, 1993, 14(4):285-290.
- [7] 江茂生,沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展,1995,10(6):551-554.
Wang Maosheng, Sha Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems [J]. Advances in Earth Science, 1995, 10(6):551-554.
- [8] Roberts H H. Modern carbonate-siliciclastic transitions: Humid and arid tropical examples[J]. Sedimentary Geology, 1987, 50(1-3):25-65.
- [9] Dolan J F. Eustatic and tectonic controls on deposition of hybrid siliciclastic-carbonate basinal cycles. Discussion with examples [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10):1233-1246.
- [10] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报,2000,19(4):32-34.
Zhang Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4):32-34.
- [11] Davis H R, Byers C W. Shelf sandstones in the Mowry Shale: evidence for deposition during Cretaceous sea level falls [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59(4):548-560.
- [12] Bechstadt T, Schweizer T. The carbonate-siliciclastic cycles of the East-Alpine Raibl Group: result of third-order sea-level fluctuations in the Carnian [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2-4):241-270.
- [13] Khetani A B, Read J F. Sequence development of a mixed carbonate-

- siliciclastic high-relief ramp, Mississippian, Kentucky, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72 (5): 657–672.
- [14] Campbell A E. Shelf-geometry response to changes in relative sea level on a mixed carbonate-siliciclastic shelf in the Guyana Basin [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 175(1–4): 259–275.
- [15] 李祥辉. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 395–404.
- Li Xianghui. Mixing of siliciclastic-carbonate sediments within systems tracts of depositional sequences and its controlling factors [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 395–404.
- [16] 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 on mixed rocks of terrigenous clastics and carbonates and their petroleum-gas geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 297–307.
- [17] 董艳蕾, 朱筱敏, 滑双君, 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.
- [18] 孙娇鹏, 陈世悦, 胡忠亚, 等. 柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1586–1593.
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, Hu Zhongya, et al. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the Northern Qaidam [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1586–1593.
- [19] 吴丽荣, 黄成刚, 袁剑英, 等. 咸化湖盆混积岩中双重孔隙介质及其油气储集意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(2): 59–67.
- Wu Lirong, Huang Chenggang, Yuan Jianying, et al. Double-porosity system of mixed sediments in Saline Lacustrine Basin and its significance to reservoir [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(2): 59–67.
- [20] 鄢继华, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 基于X射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(1): 48–54.
- Yan Jihua, Pu Xiugang, Zhou Lihong, et al. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction Data [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 48–54.
- [21] 李婷婷, 朱如凯, 白斌, 等. 混积岩储层特征——以酒泉盆地青西凹陷下白垩统混积岩为例[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 376–384.
- Li Tingting, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Characteristics of mixed sedimentary reservoir: Taking the Lower Cretaceous mixed sedimentary rock of Qingxi depression in Jiuquan Basin as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 376–384.
- [22] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 34–43.
- Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 34–43.
- [23] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(1): 1–22.
- [24] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 198–208.
- Chen Shiyue, Zhang Shun, Wang Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 198–208.
- [25] 王志峰, 张元福, 梁雪莉, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组不同水动力成因页岩岩相特征[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 623–632.
- Wang Zhifeng, Zhang Yuanfu, Liang Xueli, et al. Characteristics of shale lithofacies formed under different hydrodynamic conditions in the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2014, 35(4): 623–632.
- [26] 张磊磊, 陆正元, 王军, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段页岩油层段微观孔隙结构[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 80–86.
- Zhang Leilei, Lu Zhengyuan, Wang Jun, et al. Microscopic pore structure of shale oil reservoirs in the Lower 3rd of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 80–86.
- [27] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 708–716.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 708–716.
- [28] 张琴, 朱筱敏, 李晨溪, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组富有机质页岩孔隙分类及孔径定量表征[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 422–432.
- Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Li Chenxi, et al. Classification and quantitative characterization of microscopic pores in organic-rich shale of the Shahejie Formation in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 422–432.
- [29] 李玉喜, 张金川, 姜生玲, 等. 页岩气地质综合评价和目标优选[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 332–338.
- Li Yuxi, Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, et al. Geologic evaluation and targets optimization of shale gas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 332–338.
- [30] 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1362–1379.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Zhou Lihong, et al. Pull-apart basins within the North China Craton: Structural pattern and evolution of the Huanghua Depression in the Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1362–1379.
- [31] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. *沉积学报*,

- 2013, 31(4): 616–620.
- Li Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 616–620.
- [32] 刘惠民, 张守鹏, 王朴, 等. 沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 11–15.
- Liu Huimin, Zhang Shoupeng, Wang Pu, et al. Lithologic characteristics of Lower Es3 shale in Luoia area, Zhanhua sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 11–15.
- [33] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014(1): 184–196.
- Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014(1): 184–196.
- [34] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031–1039.
- Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 34(6): 1031–1039.
- [35] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 1–20.
- Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(3): 1–21.
- [36] Schieber J, Southard J, Thaisen K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760–1763.
- [37] Macquaker J H S, Samuel J B, Kevin M B. Wave-enhanced sediment-gravity flows and mud dispersal across continental shelves: Reappraising sediment transport processes operating in ancient mudstone successions [J]. *Geology*, 2010, 38(10): 947–950.
- [38] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制——以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1048–1059.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flows: A case study of the middle submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1048–1059.
- [39] 潘树新, 陈彬滔, 刘华清, 等. 陆相湖盆深水底流改造砂: 沉积特征、成因及其非常规油气勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1577–1585.
- Pan Shuxin, Chen Bintao, Liu Huaqing, et al. Deepwater bottom current rework sand in lacustrine basins: Sedimentary characteristics, identification criterion, formation mechanism and its significance for unconventional oil/gas exploration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1577–1585.
- [40] 周立宏, 蒲秀刚, 邓远, 等. 细粒沉积岩研究中几个值得关注的问题[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 6–15.
- Zhou Lihong, Pu Xiugang, Deng Yuan, et al. Several issues in studies on fine-grained sedimentary rocks [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(1): 6–15.
- [41] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. 古地学报, 2005, 7(1): 59–69.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 59–69.
- [42] 王冠民, 高亮, 马在平. 济阳坳陷沙河街组湖相页岩中风成粉砂的识别及其古气候意义[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 413–418.
- Wang Guanmin, Gao Liang, Ma Zaiping. Identification of aeolian silty sand in lacustrine shale of the Shahejie Formation in the Jiyang Depression and its indication to paleoclimate [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(3): 413–418.
- [43] 王冠民, 任拥军, 钟建华, 等. 济阳坳陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 834–838.
- Wang Guanmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua, et al. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 834–838.
- [44] 赵灿, 李旭兵, 郇金来, 等. 碳酸盐与硅质碎屑的混合沉积机理和控制因素探讨[J]. 地质论评, 2013, 59(4): 615–626.
- Zhao Can, Li Xubing, Huan Jinlai, et al. Mechanism of mixed siliciclastic-carbonate sediments and its controlling factors [J]. *Geological Review*, 2013, 59(4): 615–626.
- [45] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931–939.
- Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 931–939.

(编辑 张亚雄)