文章编号:1673-5005(2017)06-0030-11 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.06.004

鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系

孙宁亮[1], 钟建华[1], 田东恩[2], 刘 闯[1], 曲俊利[3], 曹梦春[1], 杨冠群[1], 郝 兵[1]

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 陕西延长油田股份有限公司,陕西靖边 718500; 3. 国土资源部油气资源战略研究中心,北京 100034)

摘要:根据大量的岩心观察、钻测井资料、野外剖面观测及分析化验资料,对鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积及与致密油的关系进行研究。结果表明:研究区主要存在地震事件、火山事件、缺氧事件和重力流沉积 4 种典型的事件沉积现象,对各个事件沉积的共生组合关系进行分析,发现主要存在 4 种典型的组合关系,其中深水重力流沉积中的多期砂质碎屑流及多期浊积岩的垂向叠置最为常见,地震、火山诱发浊流沉积形成震浊积岩,并可见油页岩与浊积岩和凝灰岩的组合配置关系;研究表明研究区在长 6—长 7 期主要发生 5.5 ~ 6.5 级地震;三角洲前缘斜坡至半深湖—深湖区是记录事件沉积的重要区域,其中前缘斜坡坡脚处滑塌砂体的事件沉积记录最为丰富,深湖区是震浊积岩主要发育区域;缺氧事件形成的优质烃源岩是致密油藏的油源,重力流砂体是研究区致密油的重要储集层,同时地震事件及火山事件对储层也进行了有益的改造,砂质碎屑流沉积的储集层物性及含油性最好。

关键词:事件沉积; 深水重力流; 致密油; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码**:A

引用格式:孙宁亮,钟建华,田东恩,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):30-40.

SUN Ningliang, ZHONG Jianhua, TIAN Dongen, et al. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(6):30-40.

Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

SUN Ningliang[1], ZHONG Jianhua[1], TIAN Dongen[2], LIU Chuang[1], QU Junli[3], CAO Mengchun[1], YANG Guanqun[1], HAO Bing[1]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*; 2. *Yanchang Oilfield Incorporated Company*, *Jingbian* 718500, *China*; 3. *Strategic Research Center of Oil & Gas Resources*, *Ministry of Land & Resources*, *Beijing* 100034, *China*)

Abstract: Using a large number of core and and outcrop samples, and combining the drilling and logging data as well as laboratory measurements, the relationship between the event deposits and the tight oil of Yanchang formation in southern Ordos Basin were systematically studied. The results show that there are four kinds of typical event deposits, including seismic, volcanic, anoxic and gravity flow deposit events. There are four typical combinations among these event deposits, in which the superposition of multi-stage sandy debris flow sandbody and turbidite is the most common type. Earthquakes and volcanos may induce turbidity flow, and subsequently form seismic turbidities. In addition, the combinations of oil shale, turbidite and tuff can be found clearly. The vertical model of event deposits and the typical sedimentary structure phenomena of seis-

收稿日期:2017-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41572088);中央高校基本科研业务费专项(15CX06002A);中国石油大学(华东)研究生创新工程(YCX2015004)

作者简介:孙宁亮(1987-),男,博士研究生,研究方向为重力流沉积及非常规油气地质。E-mail:sunningliangll@163.com。

mites indicate that there were 5.5–6.5 magnitude earthquakes at Chang6 and Chang7 period in the study area. The event deposit model indicates that the regions with delta front slope, semi-deep and deep lake is the most important area to record event deposits. The slumping sand body in the delta front slope has the most plentiful records of event deposits. The seismic-turbidite mainly develops in deep lake area. High-quality source rocks caused by anoxic events are the source of tight oil; gravity flow sandbody is the important reservoir of tight oil; and seismic and volcanic events may improve tight reservoir. Sandy debris flow sandbodies are worth of great concern for their preferable properties and hydrocarbon potential.

Keywords: event deposit; deep-water gravity flow; tight oil; Yanchang Formation; Ordos Basin

事件沉积一直以来都是全球沉积学研究的热点,2014 年瑞士日内瓦召开的第 19 届国际沉积学大会上关于深水和事件沉积的相关论文就达 123 篇,占论文总数的 14.8%[1]。鄂尔多斯盆地南部延长期存在多种事件沉积现象,包括地震事件、火山事件、缺氧事件、重力流沉积事件等,已经引起了学者的广泛关注[2-3]。但是,大部分学者只是对单一事件进行描述[4-5],甚少将多个事件沉积作为一个整体研究,各个事件沉积存在的确切证据还有待于进一步分析。鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密油资源丰富,其中以长 7 油层组底部页岩油及长 6、长 7 油层组致密砂岩油最为典型。研究区长 6、长 7 油层组既存在多种事件沉积作用,也是致密油的重要产出层位。笔者在大量的岩心观察、钻测井资料、野外露头观测及分析化验资料的基础上,研究各种事件沉积之间的关系及相互作用,建立事件沉积背景下的沉积模式,探索致密储层的分布规律,为下一步鄂尔多斯盆地南部致密油的勘探开发提供指导。

1　区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国东西构造单元的结合部位,面积约 25×10^4 km^2,根据盆地现今构造形态、基底性质及构造特征,盆地可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、陕北斜坡、天环拗陷及西缘冲断构造带 6 个一级构造单元[6](图 1)。研究区位于鄂尔多斯盆地南部,地跨陕北斜坡及渭北隆起两个一级构造单元,地势南高北低,东高西低。

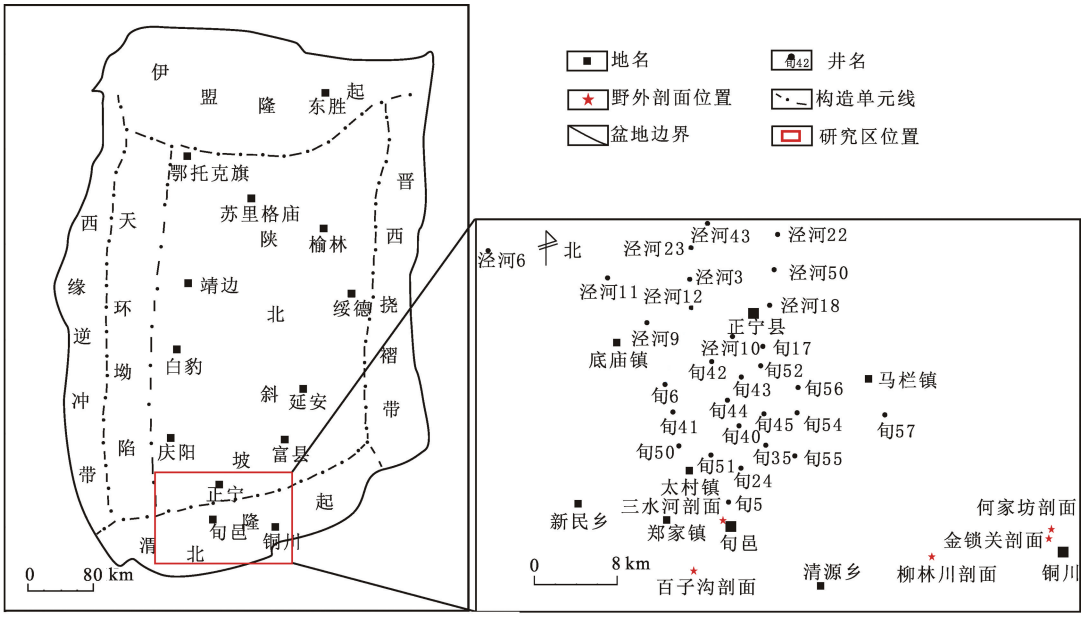


图 1　鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置

Fig. 1　Tectonic unit divisions of Ordos Basin and locations of study area

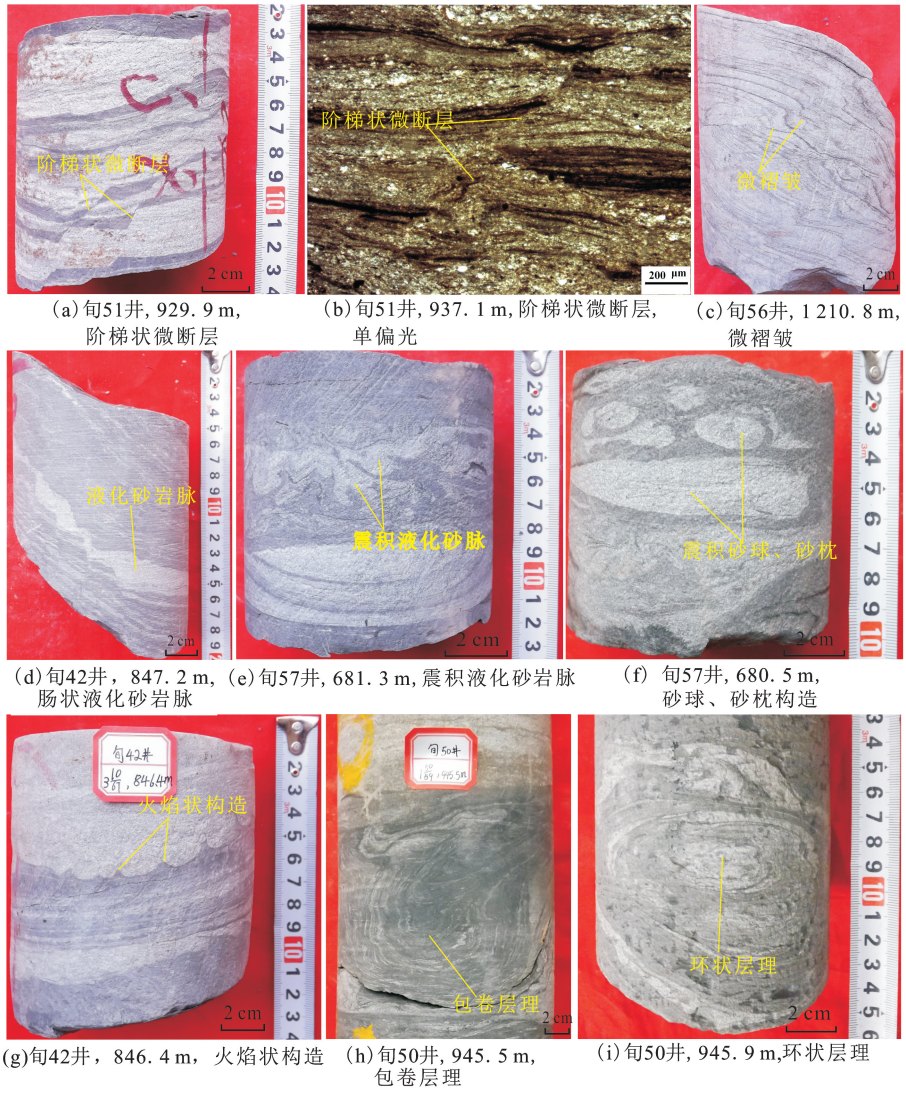
在晚三叠世延长期,鄂尔多斯盆地经历了大型内陆坳陷盆地形成、发展、消亡的全过程,沉积了一套厚度为 1 000 ~ 1 300 m 的陆源碎屑岩系,根据凝灰岩标志层(K_0—K_9)特征将延长组自下而上分为长 10—长 1 共 10 个油层组[7]。事件沉积发生的主要层位是长 7—长 6 油层组,长 7 期是湖盆最大湖泛期,底部沉积了厚层灰黑色油页岩及深灰色泥岩,中上部沉积厚层块状砂岩夹薄层泥岩,长 6 期深湖面积有所萎缩,底部以厚层块状砂岩夹薄层泥岩为主,中上部为深灰色泥岩与薄层粉、细砂岩互层沉积。

2　事件沉积作用

事件沉积是指由一系列的突发性的或灾变性的地质事件所引起的沉积物重新搬运和沉积作用[8]。通过对研究区 28 口取心井岩心观察和 140 口钻测井资料分析及对旬邑三水河、彬县白子沟、耀县瑶曲、铜川漆水河、铜川何家坊等 5 个野外剖面的详细观测,总结出研究区的事件沉积主要有地震事件、火山事件、深水重力流沉积及缺氧事件。

2.1　地震作用与震积岩

地震是指由火山活动、断裂和地层崩塌等因素诱发产生的地壳快速剧烈颤动,是地壳运动最直观的表现形式[9]。震积岩是指记录古地震活动,具有震积构造特征的有成因联系的岩石序列组合[10]。通过对研究区大量的岩心观察,发现了众多记录震积岩特征的典型标志,主要发育在长 6—长 7 油层组中的细、粉砂岩与泥岩互层或粉砂质泥岩中,包括阶梯状微断层(图 2(a)、(b))、微褶皱(图 2(c))、液化砂岩脉(图 2(d)、(e))、震积砂球砂枕(图 2(f))、火焰状构造(图 2(g))、包卷层理(图 2(h))、环状层理(图 2(i))等。



(a)旬51井, 929. 9 m, 阶梯状微断层　(b)旬51井, 937. 1 m, 阶梯状微断层, 单偏光　(c)旬56井, 1 210. 8 m, 微褶皱

(d)旬42井, 847. 2 m, 肠状液化砂岩脉　(e)旬57井, 681. 3 m, 震积液化砂岩脉　(f) 旬57井, 680. 5 m, 砂球、砂枕构造

(g)旬42井, 846. 4 m, 火焰状构造　(h)旬50井, 945. 5 m, 包卷层理　(i)旬50井, 945. 9 m,环状层理

图 2　鄂尔多斯盆地南部延长组震积岩特征

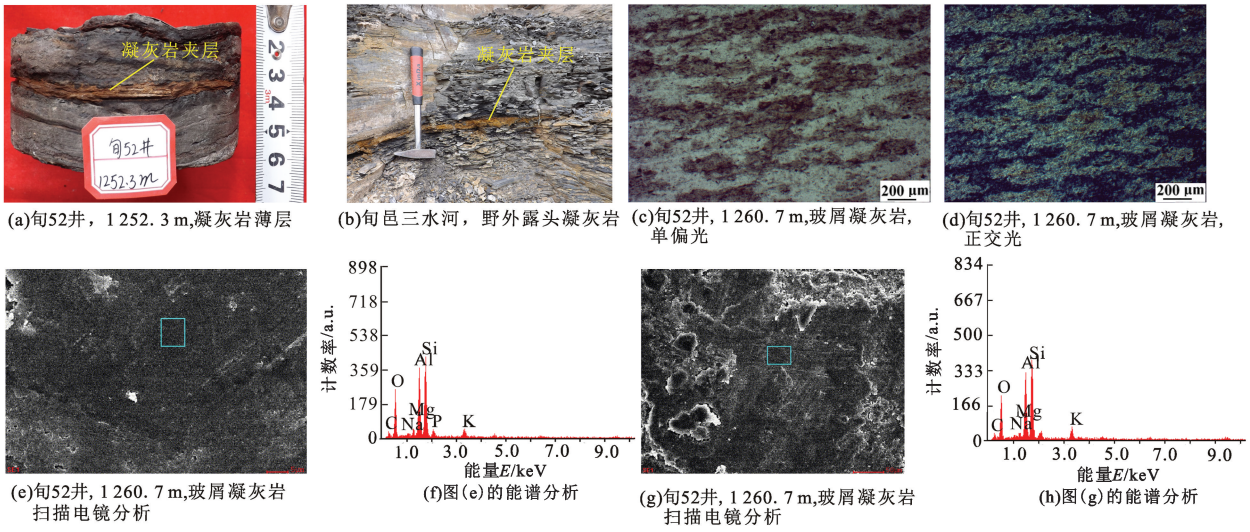
Fig. 2　Seismites features of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

地震作用作为研究区一种非常重要的构造活动,首先对研究区的沉积体系产生了重要的影响,其诱发三角洲前缘砂体发生滑塌形成深水重力流沉积,为深水隐蔽油气勘探奠定了物质基础;其次,地震作用对储层产生影响,一方面由地震产生的震裂缝、阶梯状断层改善了储层的渗透率,同时还可以作为油气运移的通道,震积角砾岩也可成为良好的油气储集体,另一方面地震的剪切作用可能引起沉积

颗粒的杂乱排列,降低储层的孔隙度和渗透率,成为储层致密化的一个重要原因。

2.2　火山作用与凝灰岩

鄂尔多斯盆地南部长 8 期末至长 7 期为构造活跃期,在此期间火山活动频发,沉积了多套凝灰岩,其火山喷发的时期主要集中在晚三叠世(距今约 221.8 Ma),与印支运动Ⅰ幕相对应,已经被学者证实[11]。凝灰岩通常发育页理,在岩心中以薄层状产出,夹于灰黑色的油页岩和炭质泥岩中,颜色鲜艳,多呈浅黄色、土黄色(图 3(a)),在野外露头中,凝灰岩也是夹杂于厚层的油页岩中,但因长期暴露地表易被风化成凝灰质的斑脱岩、黏土岩,颜色呈灰黄色(图 3(b))。在旬 52 井 1 260.7 m 处所采一块凝灰岩样品,通过薄片分析,该样品主要为玻屑凝灰岩,可见晶屑微粒,其质点细小,以尘灰级为主,显不连续的纹层(图 3(c)、(d))。同时,对该样品进行了扫描电镜及能谱分析,样品的元素以 O、Si、Al 为主,含有少量的 C、K、Mg、Na。O 的质量分数平均为 35.27%,原子分数平均为 40.51%;Si 的质量分数平均为 15.94%,原子分数平均为 10.87%;Al 的质量分数平均为 22.81%,原子分数平均为 14.94%,说明研究区长 7 油页岩中的凝灰岩以中、酸性为主,基性较少。凝灰岩夹层在电测曲线上表现为高声波时差、高自然伽马、低电阻、低密度的特征,同时也是进行区域地层对比和确定关键地质时间的可靠标志[12-13]。



(a)旬52井，1 252.3 m,凝灰岩薄层　(b)旬邑三水河，野外露头凝灰岩　(c)旬52井，1 260.7 m,玻屑凝灰岩，单偏光　(d)旬52井，1 260.7 m,玻屑凝灰岩，正交光

(e)旬52井，1 260.7 m,玻屑凝灰岩扫描电镜分析　(f)图(e)的能谱分析　(g)旬52井，1 260.7 m,玻屑凝灰岩扫描电镜分析　(h)图(g)的能谱分析

图 3　延长组凝灰岩特征

Fig. 3　Tuff features of Yanchang Formation

研究区火山活动与凝灰岩的存在与优质烃源岩的发育休戚相关。火山灰的沉降使得湖盆暂时处于缺氧环境,生物大量死亡,为油页岩的发育提供大量的生物残体,其对原先沉积的有机质还起到保护作用。此外,还有学者发现了凝灰岩中放射性铀异常,其富集生热有利于烃源岩的热演化和生烃[14]。

2.3　缺氧事件与烃源岩

由于印支期构造活动的影响,鄂尔多斯盆地在长 7 期发生强烈拗陷,深湖范围急剧扩大,水体变深,再加上因火山活动产生凝灰岩的覆盖作用,使得盆地在长 7 期发生区域性的缺氧事件,并在长 7 底部沉积了一套优质烃源岩。对长 7 底部的烃源岩进行扫描电镜及微量元素分析,发现了众多证明缺氧事件的证据。黄铁矿的发育指示了强还原环境,在长 7 的泥页岩中分布着许多条带状的黄铁矿(图 4),它们是缺氧事件的重要证据之一。放射性元素

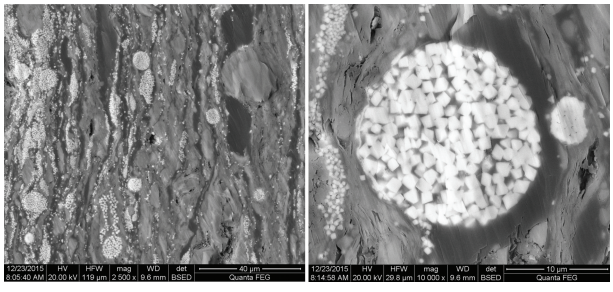


图 4　鄂尔多斯盆地南部延长组长 7 泥页岩中的黄铁矿(旬 41 井,1 090.3 m)

Fig. 4　Pyrite in shale of Chang7 interval of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

(well Xun 41, 1 090.3 m)

U/Th 的比值被广泛地应用于缺氧环境的研究中,Jones 等[15]通过研究北美、北欧的黑色页岩,提出了 U/Th 对缺氧环境的判别标准,认为 U/Th 的比值大于 1.25 显示厌氧环境,研究区所测的长 7 油页岩的

U/Th 比值平均为 1.92(表 1),反映了厌氧环境。一些微量金属元素,特别是第一过渡系列的元素常作为推断古代厌氧沉积环境的地球化学工具,Jones 等提出过渡金属元素的含量及 V/(V+Ni)和 Ce/La 的比值可以作为缺氧环境的重要判别标志,并确定出了相应的判别标准,V/(V+Ni)的比值大于 0.54,Ce/La 的比值大于 2.0 都表示厌氧环境。通过对研究区长 7 油页岩微量元素分析发现,V/(V+Ni)的比值平均为 0.72,Ce/La 的比值平均为 2.17(表 1),也都代表了研究区在长 7 期为缺氧环境。

对研究区长 7 烃源岩有机地化分析(表 2)表明,长 7 烃源岩为优质烃源岩,生烃潜力大。有机质类型以 $Ⅱ_1$ 型为主,可见少量 $Ⅱ_2$ 型;有机碳含量高,平均为 4.74,最高达 12.42;氯仿沥青"A"含量高,平均为 0.2004,为较好烃源岩;产烃潜量(S_1+S_2)平均为 22.43 mg/g,最大可达 68.27 mg/g;有机质成熟度 R_o 值和最高热解峰值都达到生油高峰阶段。

表 1　延长组长 7 油层组微量元素分析

Table 1　Trace element analysis of Chang7 interval of Yanchang Formation

井号	深度/m	U/10^{-6}	Th/10^{-6}	V/v	Ni/10^{-6}	Co/10^{-6}	Ce/10^{-6}	La/10^{-6}	U/Th	V/(V+Ni)	Ce/La
旬 40	1 077.1	14.11	10.60	129	49.9	16.4	98.1	46.8	1.33	0.72	2.10
旬 41	1 099.8	25.80	13.90	164	59.7	18.9	75.5	37.7	1.86	0.73	2.00
旬 41	1 090.3	34.20	12.35	187	48.1	15.6	85.2	34.7	2.77	0.80	2.46
旬 41	1 090.2	33.10	14.85	110	48.7	15.6	99.4	44.8	2.23	0.69	2.22
旬 52	1 253.5	29.00	9.26	208	48.9	15.9	56.9	26.1	3.13	0.81	2.18
旬 52	1 251.9	19.45	11.70	153	58.5	18.9	94.4	42.5	1.66	0.72	2.22
旬 52	1 252.9	15.53	10.40	136	56.3	18.6	91.7	43.6	1.49	0.71	2.10
旬 52	1 261.3	13.54	10.30	77	45.9	10.7	72.9	32.6	1.31	0.63	2.24
旬 55	1 003.1	15.38	10.50	113	49.4	12.9	86.5	42.6	1.46	0.70	2.03
均值		22.23	11.54	141.89	51.71	15.94	84.51	39.04	1.92	0.72	2.17

表 2　延长组长 7 烃源岩评价

Table 2　Source rock evaluation of Chang7 interval of Yanchang Formation

井号	深度/m	层位	岩性	有机质类型	有机碳含量/%	氯仿沥青"A"/%	产烃潜量 S_1+S_2/(mg·g^{-1})	有机质成熟度 R_o/%	岩石热解温度/℃
旬 40	1 107.1	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_2$	1.62	0.1200	4.60	0.78	444
旬 41	1 090.3	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	10.70	0.1727	63.41	0.59	437
旬 42	1001.8	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	1.55	0.1089	4.46	0.78	439
旬 44	1 159.2	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	1.96	0.1624	5.12	0.82	439
旬 50	946.4	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_2$	1.94	0.0651	3.86	0.68	449
旬 51	937.1	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	1.61	0.1382	4.78	0.77	445
旬 52	1 251.9	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	11.60	0.4195	59.17	0.78	440
旬 53	1 261.3	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	12.42	0.5481	68.27	0.78	442
旬 54	1 003.1	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_1$	1.46	0.0597	4.24	0.84	445
旬 55	1 050.9	长 7	黑色页岩	$Ⅱ_2$	2.51	0.2093	6.34	0.81	443
均值					4.74	0.2004	22.43	0.76	442

缺氧事件的发生促使了研究区优质烃源岩的发育,为整个鄂尔多斯盆地油气藏的形成提供源岩条件,是油气藏形成的关键。

2.4　深水重力流沉积

在地震、火山等触发机制的影响下,研究区在长 6—长 7 期广泛发育深水重力流砂体,成为研究区重要的储集层。通过岩心观察和野外典型剖面观测,共识别出了滑塌砂体、砂质碎屑流砂体、浊流砂体 3 种类型的深水重力流砂体。

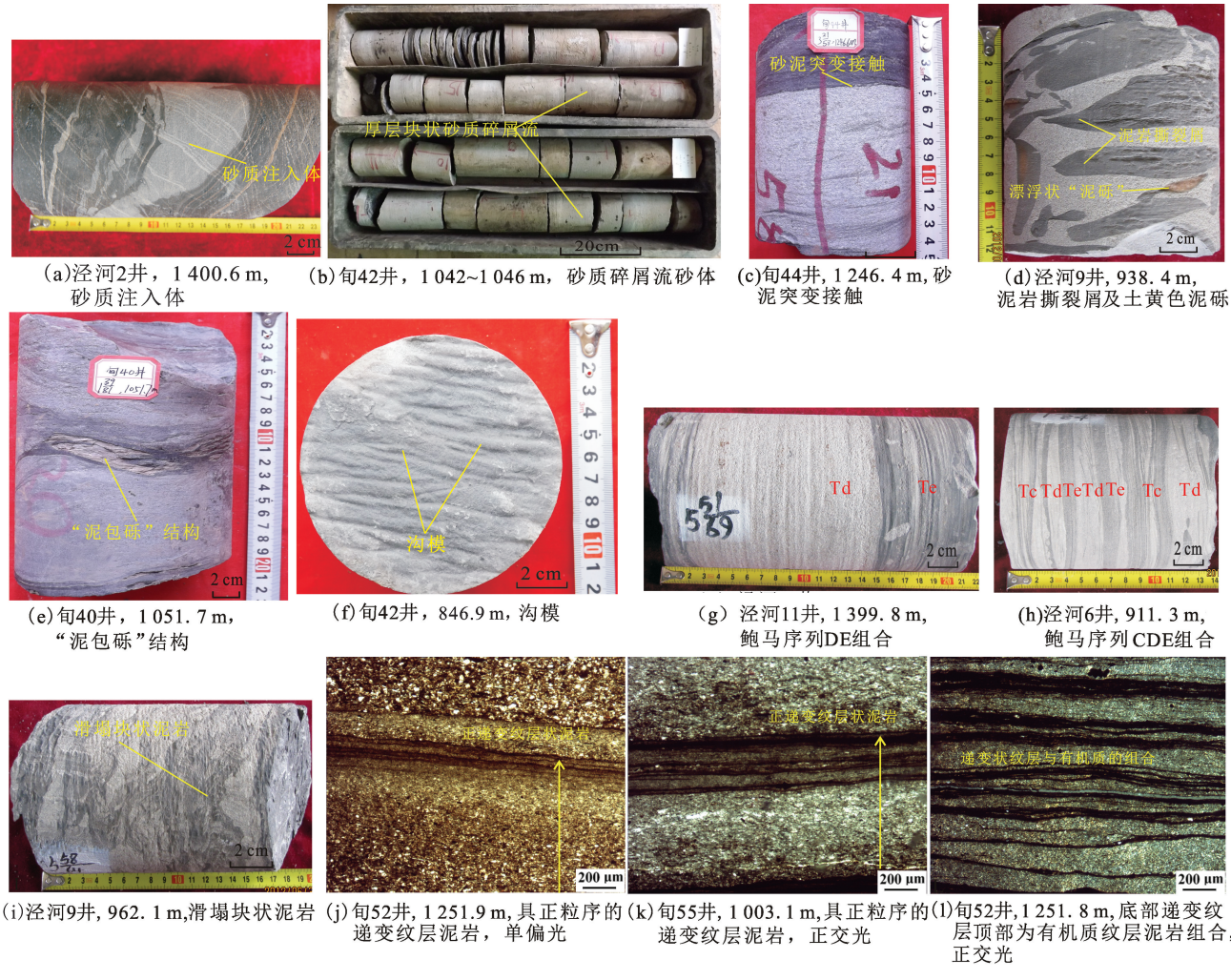
2.4.1　滑塌砂体

滑塌砂体是指位于三角洲前缘的砂体,受到外力作用的影响,使流体产生的超孔隙压力不足以支撑沉积物的重力,发生液化,并整体搬运,沿着下凹滑移面发生旋转剪切运动,在前缘斜坡坡脚处停止滑动并堆积下来形成滑塌岩。在滑塌过程中,砂体常发生卷曲变形,发育揉皱变形层理[16-17]及微褶皱、旋转火焰状构造、球枕构造,泥岩中可见砂质注入体(图 5(a)),这些成为识别滑塌砂体的重要特征。

2.4.2　砂质碎屑流砂体

砂质碎屑流是一种塑性流变、层流状态的沉积物流,沉积物通常以整体"冻结"的方式发生沉积[18]。在研究区广泛发育砂质碎屑流沉积,岩性以细砂岩、粉砂岩为主,整体呈块状,无层理,单层砂体厚度大(图 5(b)),一般大于 0.5 m,累积厚度可达 20 m,有较好的含油性;具突变的顶底面接触关系,

砂质碎屑流沉积物顶部常与泥岩突变接触(图 5(c)),这种接触方式是砂质碎屑流沉积物整体冻结沉积作用的重要证据;具泥岩撕裂屑及“漂浮状”泥砾(图 5(d)),灰黑色泥岩撕裂屑呈层状分布,大小混杂,分选、磨圆较差,具不明显的定向性,属内源型碎屑沉积物,“漂浮状”泥砾具浅黄的氧化色,磨圆较好,属外源型碎屑沉积物。砂质碎屑流还具有典型的“泥包砾”结构(图 5(e)),廖建波等[19]通过研究这种结构的形成,认为“泥包砾”反映了砂体整体搬运的状态,是确定砂体为深水砂岩的重要证据。砂质碎屑流砂体是研究区分布范围最广,储层物性、含油性较好的砂体。



(a)泾河2井,1 400.6 m,砂质注入体　(b)旬42井,1 042~1 046 m,砂质碎屑流砂体　(c)旬44井,1 246.4 m,砂泥突变接触　(d)泾河9井,938.4 m,泥岩撕裂屑及土黄色泥砾

(e)旬40井,1 051.7 m,“泥包砾”结构　(f)旬42井,846.9 m,沟模　(g)泾河11井,1 399.8 m,鲍马序列DE组合　(h)泾河6井,911.3 m,鲍马序列CDE组合

(i)泾河9井,962.1 m,滑塌块状泥岩　(j)旬52井,1 251.9 m,具正粒序的递变纹层泥岩,单偏光　(k)旬55井,1 003.1 m,具正粒序的递变纹层泥岩,正交光　(l)旬52井,1 251.8 m,底部递变纹层顶部为有机质纹层泥岩组合,正交光

图 5　延长组深水重力流沉积特征

Fig. 5　Sedimentary characteristics of deep-water gravity flow of Yanchang Formation

2.4.3　浊积砂体

浊积砂体是研究区重力流沉积的又一种表现形式,位于重力流沉积的末端。浊流属于牛顿流体,不具有任何屈服强度,一旦受到外力作用就会运动。其流动状态属于紊流[20],具有侵蚀性,因此在浊积岩的底部常见到槽模、沟模(图 5(f))等各种底模构造。浊流沉积具有正粒序的沉积特征,这是由于重力分异作用形成的,大的颗粒先沉积,小的颗粒后沉积。

研究区浊积砂体可分为近源砂质浊积岩和远端细粒浊积岩两种。近源砂质浊积岩岩性主要为细砂岩和粉砂岩,具侵蚀的底接触关系,浊积岩底部常见沟模、槽模等各种底模,砂质浊积岩一般由多个正韵律组合而成,每个正韵律厚度变化不大,一般为 0.3~0.5 m,构成不完整的鲍马序列,研究区常见的组合形式主要有 ABC、CD、CDE、DE 等(图 5(g)、(h))。远端细粒浊积岩岩性主要为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩及有机质,是低密度浊流的产物,其粒径一般小于 0.1 mm,其岩相组合主要是递变纹层泥岩相及块状泥岩相。递变纹层泥岩通常由底部粉砂岩顶部泥岩、有机质组成,厚度较薄,自下而上显由粗到细的正粒序,完整的层序组合自下而上为底

部递变层段,中部水平纹层段,顶部有机质层段(图 5(j)、(k))的“三元结构”,也可见到底部为粉砂质纹层泥岩,顶部有机质的“二元结构”(图 5(l))。滑塌块状泥岩(图 5(i))由泥质沉积物滑塌形成[21],其粒级递变不明显,但是有成分的递变,无任何明显的沉积构造现象,在岩心上可见小型变形层理、波状层理及泥岩撕裂屑。

深水重力流沉积的砂体是研究区致密油重要的储集层。砂质碎屑流沉积的厚层块状砂体的物性最好,平均孔隙度为 9.8%,平均渗透率为 0.89×10^{-3} μm^2,其次是近源砂质浊积岩砂体,平均孔隙度为 7.9%,平均渗透率为 0.42×10^{-3} μm^2,滑塌砂体及远端细粒浊积岩因含有较多的泥质物性较差,但其距优质烃源岩较近,也是研究区致密油重要的潜在储层。

3　事件沉积的共生组合关系

各个事件沉积之间不是相互独立的,而是存在多种必然的共生组合关系。地震、火山事件是重力流沉积的主要触发因素,同时地震、火山及缺氧事件之间也存在共生穿插关系。通过对研究区典型井的岩心描述(图 6),总结各个事件沉积之间的组合关系,研究区主要存在以下 4 种典型的组合:

(1)不同深水重力流砂体之间的组合。在长 6 油层组出现了多期重力流砂体的叠置,主要是多期砂质碎屑流砂体及多期浊积岩砂体的叠置,也可见砂质碎屑流砂体与浊积岩砂体之间的垂向叠置,重力流砂体之间的组合在研究区非常普遍,也是研究区存在厚层砂体的原因。

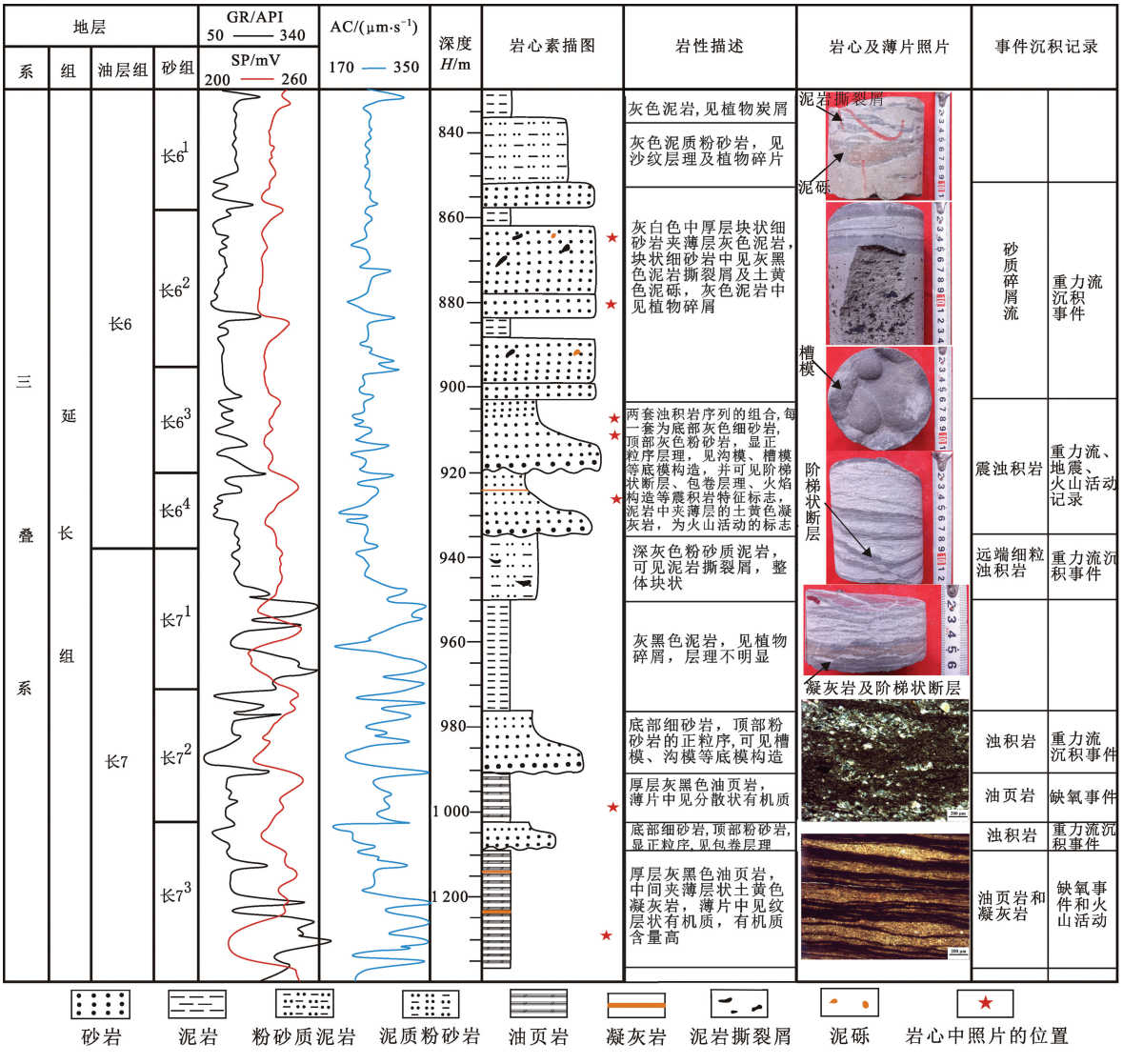


图 6　旬 51 井延长组长 6—长 7 岩心柱状图

Fig. 6　Core column of well Xun51 of Chang6-Chang7 interval of Yanchang Formation

(2)地震、火山、重力流沉积关联密切。地震、火山活动使得原地沉积的砂体发生改造,形成震积

岩,同时也可诱发重力流沉积,形成震浊积岩,一般形成底部震积岩顶部震浊积岩的垂向叠置关系。

(3)缺氧事件与重力流沉积的组合。在油页岩内可见薄层的浊积岩夹层,它是由地震活动引起的远端细粒浊积岩在半深湖—深湖的沉积,体现了这两种事件沉积的组合关系。

(4)火山活动事件与缺氧事件的组合。在长 7 底部的油页岩内常见到厚度不等的凝灰岩夹层,证明了油页岩的形成与火山活动同时期。印支期 I 幕构造活动引起了湖盆凹陷,深湖范围扩大,在缺氧的情况下沉积了厚层富含有机质的油页岩,同时由火山灰的沉降形成的凝灰岩降落在油页岩内部,形成了油页岩夹凝灰岩的地层。

通过事件沉积的共生组合关系研究,结合各个事件沉积的典型的伴生沉积构造现象,总结出了事件沉积的垂向组合模式(图 7),发现研究区火山、地震、缺氧及重力流事件之间存在垂向上的多种穿插共生关系。根据 Rodrguez-Pascua 等[22]震积岩地震震级判别图序,小于 5 级地震主要见扰动层理及震动卷曲变形,5 ~ 6 级地震见蘑菇状砂岩脉及肠状液化砂岩脉,6 ~ 7 级地震出现环状层理及砂球、砂枕构造,7 ~ 8 级地震出现枕状层,大于 8 级地震见阶梯状断层及砂砾岩中的液化砂脉,研究区液化砂岩脉、环状层理及砂球、砂枕构造广泛可见,因此判断研究区多次发生 5.5 ~ 6.5 级地震,并发现了阶梯状断层,有可能发生约 8 级的古地震。

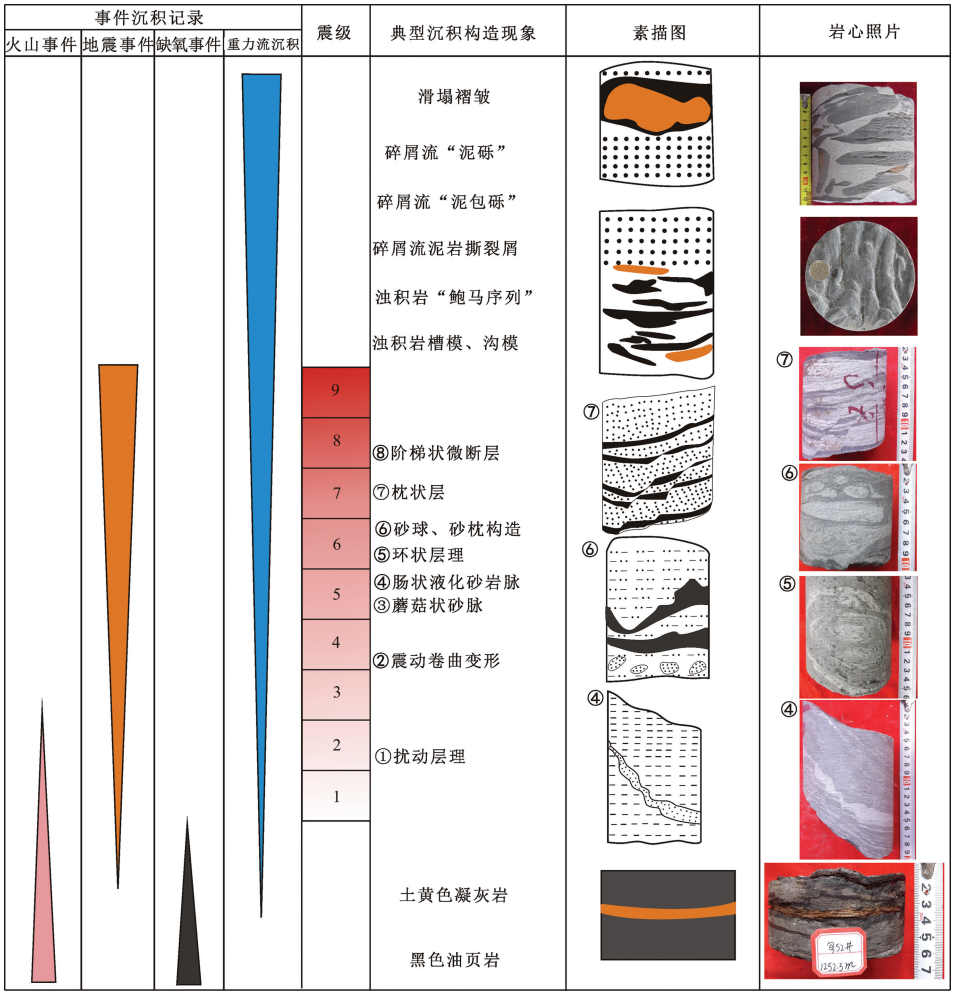


图 7　鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积垂向组合模式

Fig. 7　Vertical combination pattern of event deposits of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

4　事件沉积模式及其与致密油的关系

通过对研究区典型事件沉积特征及其垂向组合特征的精细解剖,结合野外剖面观测,总结鄂尔多斯盆地南部地区延长组事件沉积模式(图 8)。受地震、火山活动的影响,位于三角洲前缘的砂体发生滑动、滑塌,在三角洲前缘斜坡及斜坡坡脚处沉积下来,形成滑塌沉积岩,多呈孤立的透镜体状,同时受到地震的影响,沉积物受到改造,形成典型的震积岩。在三角洲前缘斜坡滑动砂体中可见阶梯状断

层;在三角洲斜坡坡脚滑塌砂体中软沉积变形构造最为丰富,可见滑塌褶皱、火焰状构造、砂球砂枕构造、包卷层理等;紧邻斜坡坡脚处的泥质沉积物中可见液化砂岩脉,关于这些典型的震积岩特征的分布位置,鄢继华等[23]通过模拟实验得到证实,并且它们与地震发生的强度及活动时间有着密切的关系。在半深湖—深湖区域还可以看到具有泥岩撕裂屑及泥砾的砂质碎屑流砂体及受到地震影响形成的震浊积岩。

致密油勘探的关键在于明确富有机质页岩分布范围及烃源岩与储层的匹配层段[24],研究区长 7 油层组底部油页岩非常发育,且厚度大、有机质含量高,是非常重要的页岩油潜在储层;邻近烃源岩的长 6—长 7 深水重力流砂体,具有近源优势,是致密油的有利含油层段。研究区长 7^3 油页岩非常发育且连续性好,长 7^2—长 6^4 深水砂岩油藏发育好,但连续性较差,多为孤立的透镜状隐蔽油藏,这也为勘探增加了难度。

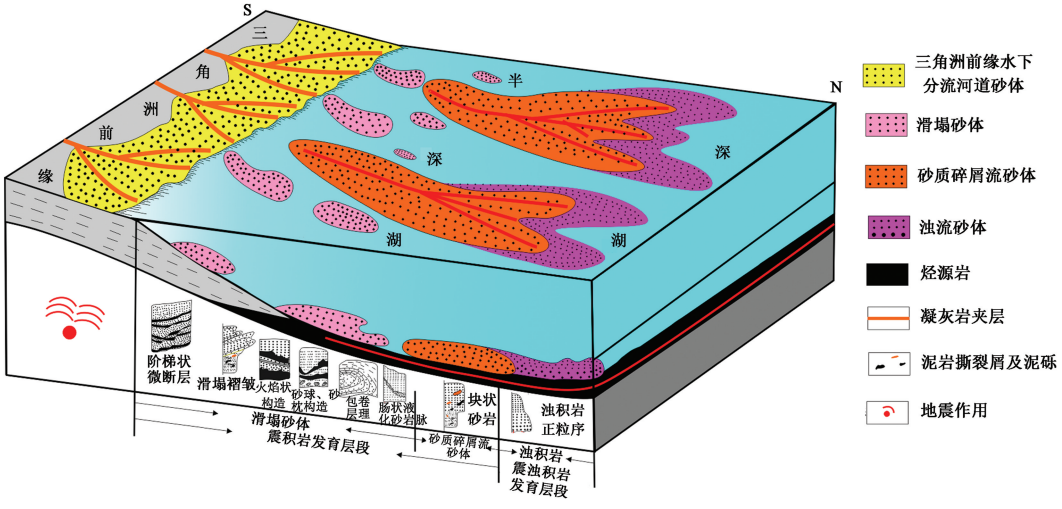


图 8　鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积模式

Fig. 8　Sedimentary pattern of event deposits of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

5　结　论

(1)研究区存在地震事件、火山事件、缺氧事件及深水重力流沉积 4 种典型的事件沉积现象,各种事件沉积特征明显,是相互联系的整体。地震作用形成了典型的震积岩;火山事件的记录为凝灰岩沉积;在缺氧的环境下形成的烃源岩富含丰富的有机质,是研究区油气成藏的油源,也是研究区页岩油潜在储集层;深水重力流砂体类型多,砂体叠置厚度大,是致密砂岩油重要储层。

(2)事件沉积之间共存在 4 种典型的配置关系,深水重力流砂体之间的组合最为普遍,主要表现为砂质碎屑流的多期叠置及浊积砂体的多期叠置,地震、火山及浊积岩的配置组合形成了典型的震浊积岩,此外烃源岩中也沉积了重力流砂体及凝灰岩,说明缺氧事件与重力流及火山活动之间也存在着密切的关系,通过事件沉积的垂向组合模式及震积岩典型沉积构造现象研究,发现研究区在长 6—长 7 期主要发生 5.5 ~ 6.5 级地震。

(3)三角洲前缘斜坡至半深湖—深湖区是事件记录的重要区域,前缘斜坡坡脚处的滑塌砂体具有记录事件沉积的多种典型特征,前缘斜坡到半深湖砂质碎屑流沉积区是震积岩主要发育层段,深湖区域主要发育震浊积岩。

致谢　感谢山东科技大学杨仁超老师提供部分岩心照片!

参考文献:

[1]　鲜本忠,朱筱敏,岳大力,等. 沉积学研究热点与进展:第 19 届国际沉积学大会综述[J]. 古地理学报,2014,16(6):816-826.
XIAN Benzhong, ZHU Xiaomin, YUE Dali, et al. Current hot topics and advances of sedimentology: a summary from 19th International Sedimentological Congress [J]. Journal of Palaeogeography, 2014,16(6):816-826.

[2]　赵俊兴,李凤杰,申晓莉,等. 鄂尔多斯盆地南部长 6 和长 7 油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. 石油学报,2008,29(3):389-394.
ZHAO Junxing, LI Fengjie, SHEN Xiaoli, et al. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang6 and Chang7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(3):389-394.

[3] 陈安清,陈红德,侯明才,等. 鄂尔多斯盆地中—晚三叠世事件沉积对印支运动Ⅰ幕的指示[J]. 地质学报,2011,85(10):1681-1690.
CHEN Anqing, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. The middle-late Triassic event sediments in Ordos Basin: indicators for episode Ⅰ of the indosinian movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(10):1681-1690.

[4] 夏青松,田景春. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组震积岩的发现及地质意义[J]. 沉积学报,2007,25(2):246-252.
XIA Qingsong, TIAN Jingchun. Characteristics and geological significance of seismites of the Yanchang Formation Upper Triassic Ordos Basin[J]. Acta Sedmentologica Sinica, 2007,25(2):246-252.

[5] 李洁,陈洪德,林良彪,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组古地震效应及其地质启迪[J]. 地质论评,2010,56(4):480-489.
LI Jie, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Effect of ancient earthquake and its geological significance of Upper Triassic Yanchang Formation in Southeast Ordos Basin[J]. Geological Review, 2010,56(4):480-489.

[6] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,2002.

[7] 付金华,郭正权,邓秀芹,等. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. 古地理学报,2005,7(11):34-44.
FU Jinhua, GUO Zhengquan, DENG Xiuqin, et al. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(11):34-44.

[8] 佟彦明,郭成贤,危宇宁. 长江三峡东部地区震旦纪事件沉积[J]. 古地理学报,2002,4(2):38-45.
TONG Yanming, GUO Chengxian, WEI Yuning. Sinian event deposits in the eastern part of the Yangtze Gorge[J]. Journal of Palaeogeography, 2002,4(2):38-45.

[9] 袁静. 中国震积作用和震积岩研究进展[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(1):144-149.
YUAN Jing. Research of seismic deposition and seismites of China[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2005,29(1):144-149.

[10] 吴勘. 震积岩、海啸岩、震浊积岩研究进展[J]. 地质学报,2010,30(2):136-139.
WU Kan. Advances in research for seismite, tsunamite and seismoturbidite[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 30(2):136-139.

[11] 邓秀芹,蔺芳晓,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其早印支运动关系的探讨[J]. 古地理学报,2008,10(2):159-166.
DENG Xiuqin, LIN Fangxiao, LIU Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the early Indosinian movement in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008,10(2):159-166.

[12] HUFF W D, BERGSTRÖM S M, KOLATA D R. Gigantic Ordovician volcanic ash fall in North America and Europe: biological, tectonomagmatic, and event-stratigraphic significance[J]. Geology, 1992,20:875-878.

[13] DESMARES D, GROSHENY D, BEAUDOIN B, et al. High resolution stratigraphic record constrained by volcanic ash beds at the Cenomanian-Turonian boundary in the Western Interior basin, USA[J]. Cretaceous Research,2007,28:561-582.

[14] 谭成仟,刘池洋,赵军龙,等. 鄂尔多斯盆地典型地区放射性异常特征及其地质意义[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(增Ⅰ):147-156.
TAN Chengqian, LIU Chiyang, ZHAO Junlong, et al. Radioactive anomaly character and its geological significance in typical area, Ordos Basin[J]. Science in China(Ser D): Earth Sciences, 2007,37(sup Ⅰ):147-156.

[15] BRYN Jones, DAVID A C, MANNING. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1995,111:111-119.

[16] 张雷,李振海,张雪娟,等. 重力流沉积岩相划分及其发育规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(1):17-24.
ZHANG Lei, LI Zhenhai, ZHANG Xuejuan, et al. Lithofacies classification and development rule of gravity flows deposits[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2015,39(1):17-24.

[17] SHANMUGAM G. 深水砂岩新论:成因、识别、触发机制与储层性质[M]. 北京:石油工业出版社,2013:29-86.

[18] 孙宁亮,钟建华,王书宝,等. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组重力流沉积特及其石油地质意义[J]. 古地理学报,2017,19(2):299-314.
SUN Ningliang, ZHONG Jianhua, WANG Shubao, et al. Sedimentary characteristics and petroleum geologic significance of deep-water gravity flow of the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2017,19(2):299-314.

[19] 廖建波,李相博,赵惠周,等. 鄂尔多斯盆地延长组深水块状砂岩"泥包砾"结构成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):46-53.

LIAO Jianbo, LI Xiangbo, ZHAO Huizhou, et al. Genetic mechanism of mud-coated intraclasts within deep-water massive sandstone in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017,41(4):46-53.

[20] MIDDLETON G V. Sediment deposition from turbidity currents[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1993,21:89-114.

[21] 饶孟余,钟建华,郭泽清,等. 济阳拗陷牛庄洼陷沙三段三角洲前缘浊积岩特征[J]. 高校地质学报,2004,10(4):624-633.

RAO Mengyu, ZHONG Jianhua, GUO Zeqing, et al. Turbidite characteristics of delta front for the 3rd member of shahejie formation in Niuzhuang sag, Jinyang Depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2004,10(4):624-633.

[22] RODRGUEZ-PASCUA M A, CALVO J P, DE VICENTE G, et al. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the late Miocene[J]. Sedimentary Geology,2000,135(1):117-135.

[23] 鄢继华,崔永北,陈世悦. 几种常见震积岩相标志在模拟实验中的识别[J]. 沉积学报,2009,27(6):1131-1137.

YAN Jihua, CUI Yongbei, CHEN Shiyue. Identification of common facies indicators of seismites in simulated experiments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009,27(6):1131-1137.

[24] 刘群,袁选俊,林森虎,等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨[J]. 沉积学报,2014,32(6):1016-1025.

LIU Qun, YUAN Xuanjun, LIN Senhu, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its depositional environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014,32(6):1016-1025.

(编辑　徐会永)