

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2019.5.16

涸西南凹陷陡坡带流一段上亚段异重流沉积新发现

金杰华¹, 操应长^{1,2,*}, 王健^{1,2}, 杨田¹, 刘娟³, 王心恠¹, 王淑萍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. 青岛海洋科学与技术国家重点实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071

3. 中海石油(中国)有限公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057

JIN Jiehua¹, CAO Yingchang^{1,2,*}, WANG Jian^{1,2}, YANG Tian¹, LIU Juan³, WANG Xinyi¹,
WANG Shuping¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Eastern China), Qingdao 266580, China

2. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Zhanjiang Technical Department, CNOOC, Zhanjiang 524057, China

JIN Jiehua, CAO Yingchang, WANG Jian, et al. New discovery of hyperpycnal flow deposits in the $E1_1^s$ section of the steep slope belt in the Weixinan sag. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(4): 250-258

Abstract: In a case study in the lower part of the first member of the Liushagang Formation ($E1_1^s$) in the middle of the steep slope zone in the Weixinan sag, we examined the sedimentary characteristics, controlling factors and distribution features of deep-water fan formed by hyperpycnal flow through analyzes of 3D seismic information, well logging and core drilling data and laboratory measurements. The results show that hyperpycnites are distributed from the steep slope to the bottom of lacustrine basin, where hyperpycnal flow developed sequentially straight and meandering channels and lobes which expand 15 km long and 50-100 m wide. The seismic reflections of hyperpycnites are obviously stronger than that of the surrounding deep-water mudstones. Hyperpycnites are mainly composed of fine-grained sandstone, siltstone and small amounts of pebbly sandstone; terrigenous biolastics (plant material) are also common. The grain size accumulation curve is mainly overarching and the sample point distribution is roughly parallel to the baseline of $C=M$, showing the characteristics of gravity flow deposits. A bed of sandstone is usually composed of paired inverse and normal grading sequences, with the coarsest grain depositing in the middle of the bed. Rip-up mud clasts are typical with imbrication. The intrasequence weak erosional contacts are also obvious. In addition, hyperpycnal flow developed sedimentary structures of massive and parallel bedding, Hummocky cross-stratification and climbing sand ripples by bed- and suspended-load transportation. Since sedimentary characteristics and distribution of hyperpycnites are determined by source-to-sink system, magmatic rocks originated from eastern Wanshan uplift provided the material basis of hyperpycnites, while strong tectonic movements, steep slope, wet-half humid climate and relatively low density of water are the main controlling factors for the development of hyperpycnites. Our discovery of hyperpycnal flow deposits in the study area not only enriches our knowledge of sedimentary environment in the steep slope belt in lacustrine basin, but also provides theoretical guidance for further hydrocarbon exploration in steep slope regions.

Key words: hyperpycnites; sedimentary characteristics; controlling factors; steep slope; lower part of the first member of the Liushagang Formation; Weixinan sag

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2019-04-15

基金项目: 中国科学院战略型先导科技专项(A类)子课题(XDA14010301); 国家自然科学基金项目(U1762217); 国家科技重大专项专题(2017ZX05009001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(16CX06036A, 18CX05027A); 中国博士后科学基金面上项目(2017M622314)

作者简介: 金杰华(1990—), 男, 博士研究生, 地质学专业。E-mail: jinjiehuaupc@163.com

* 通讯作者简介: 操应长(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 地质学专业, 主要从事沉积学、层序地层学及油气储层地质学的教学与科研工作。E-mail: cyc8391680@163.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2019, 26(4)

摘要:以涠西南凹陷北部陡坡带中段流一段下亚段为研究对象,综合利用三维地震、测井、录井、钻井岩心及分析测试等资料,对研究区异重流成因深水扇的沉积特征、控制因素及沉积模式进行了研究。结果表明,断陷盆地陡坡带至湖盆底部可发育洪水型异重流沉积,依次为顺直水道、弯曲水道和朵叶体,其延伸距离约为15 km,宽度为50~150 m。其中,水道地震反射明显强于周围深水泥岩,其内部沉积以砂岩和含砾砂岩为主;朵叶体沉积主要为细砂岩或粉砂岩,富含陆源植物碎屑,其粒度概率曲线以上拱弧式及宽缓上拱式为主,样品点分布大致平行于 $C=M$ 基线,指示重力流沉积动力特征。垂向上,单层砂岩一般表现为逆粒序与正粒序成对出现,中部粒度最粗,可见泥质碎屑呈叠瓦状排列,且发育层内微侵蚀面。此外,异重流沉积内部发育块状层理、平行层理、波状交错层理及爬升砂纹层理等沉积构造。“源-汇”系统决定了异重流的沉积特征与展布,万山隆起东部岩浆岩等物源输入是异重流形成的物质基础,强构造运动、陡坡折带、湿润-半湿润气候及低湖水密度是控制异重流发育程度的主要因素。研究区异重流的发现不仅丰富了断陷湖盆陡坡带沉积相类型,也为陡坡带进一步油气勘探提供了理论依据。

关键词:异重流沉积;沉积特征;控制因素;陡坡带;流一段下亚段;涠西南凹陷

中图分类号:P534.61;P539.6;P618.130.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2019)04-0250-09

0 引言

随着油气勘探开发程度的提高,深水重力流沉积成为目前国际上油气勘探和研究最为活跃的领域之一^[1-4],深水重力流砂体不仅记录了沉积物从物源区经剥蚀—搬运—沉积的一系列地质信息,而且作为油气储层具有重要的经济价值。深水砂岩成因一直是地质学家关注的焦点^[5-10],地震等阵发性事件可引起沉积物再搬运沉积,形成滑塌重力流沉积砂体,该方面研究已得到广泛关注,且取得了长足的进展^[5,7-13]。洪水携带沉积物由陆上直接潜入盆底形成异重流沉积,其研究也逐渐引起国内外学者的关注。国外学者主要对海相异重流特征、发育机理及沉积分布进行了深入研究,推动了异重流沉积研究的进程^[14-16]。然而,陆相盆地异重流沉积研究鲜有报道,国内陆相湖盆异重流沉积研究尚且处于起步阶段,目前仅在鄂尔多斯盆地延长组、松辽盆地白垩系嫩江组、东营凹陷古近系以及西湖凹陷花港组取得一些进展^[3-4,12,17],断陷湖盆陡坡带异重流研究尚为空白。

异重流是指在汇水盆地深水条件下形成的沿盆地底部流动的高密度流体,由于流体携带大量沉积物颗粒,导致其密度大于稳定环境水体密度,流体受浮力影响小^[12]。异重流的形成受地形坡度^[6,18]、构造活动强度^[19-20]、沉积物供给^[15,21-22]、气候条件^[19]、洪水发生频率、汇水盆地水体深度、水平面高度^[23]、水体密度差等多种因素综合控制。受构造和气候等因素的控制,陆相淡水盆地地形陡峭,碎屑物供给丰富,湖水密度低,发育季节性洪水河流,尤其是山区短源河流更容易形成异重流^[3-4,12,24]。

涠西南凹陷陡坡带历经数十年的勘探,发现的油气藏类型以构造油气藏为主^[25],近年来,随着滚动勘探程度的不断加深,发现的地层岩性油气藏逐渐增多。目前,涠西南凹陷陡坡带流沙港组砂体主要为近岸水下扇及扇三角洲沉积^[26-30],流沙港组沉积时,涠西南凹陷为典型陆相断陷盆地,理论上应该具有与其他陆相断陷盆地相似的沉积相类型。然而,在流一段早期,仅在1号断层西段下降盘发现了近岸水下扇沉积(图1),陡坡带中段有利储集砂体尚未发现。因此,在对比国内其他陆相断陷盆地沉积特征的基础上,本文综合地震资料、W1井测录井资料、岩心资料以及分析测试资料,经分析后认为涠西南凹陷陡坡带中段流一段发育典型异重流沉积,并详细解剖了陡坡带异重流沉积特征,探讨了异重流沉积发育的控制因素,建立了涠西南凹陷陡坡带流沙港组异重流沉积模式,旨在为涠西南凹陷陡坡带地层岩性油气藏滚动勘探开发提供指导。

1 区域地质概况

涠西南凹陷位于北部湾盆地北部凹陷,为中国南海北部大陆架西部的一个重要的富油气凹陷。凹陷东南缘与企西隆起相接,西北缘为涠西南断层,西南缘与海中凹陷相邻,中间被涠西南低凸起相隔^[30],总面积为 $2.3 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。凹陷内发育3条近北东-南西向大型断裂,即1号、2号和3号断裂,这3条断裂的活动与静止控制着整个凹陷构造格局的演化。受1号断裂活动影响,古近系涠西南凹陷为典型断陷盆地,呈现北陡南缓的箕状构造样式,东西向为长轴方向(图1)。

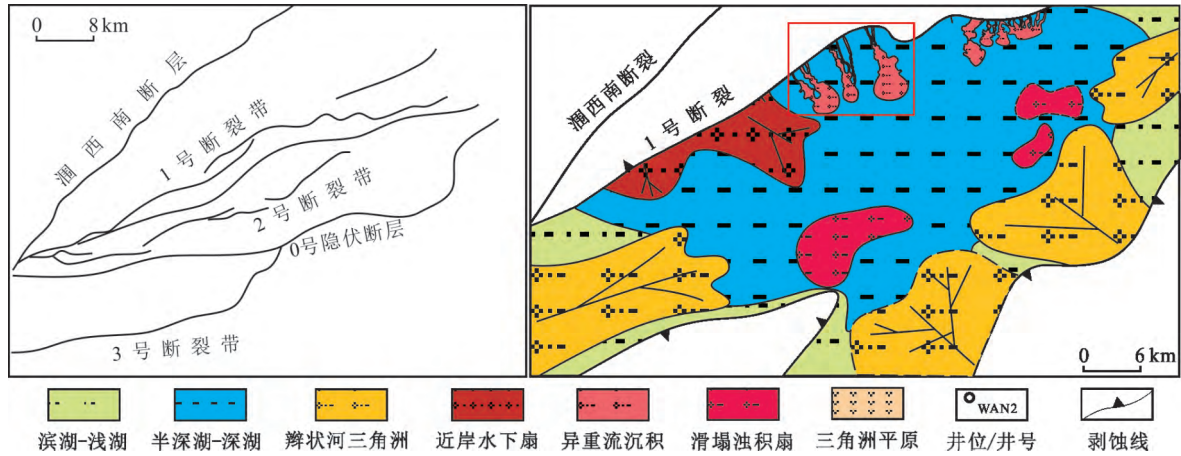


图 1 涠西南凹陷构造背景及流一下亚段沉积相平面分布图
 Fig.1 Tectonic background and sedimentary distribution in the lower part of the first member of the Liushagang Formation ($E1_1^x$) in the Weixinan sag

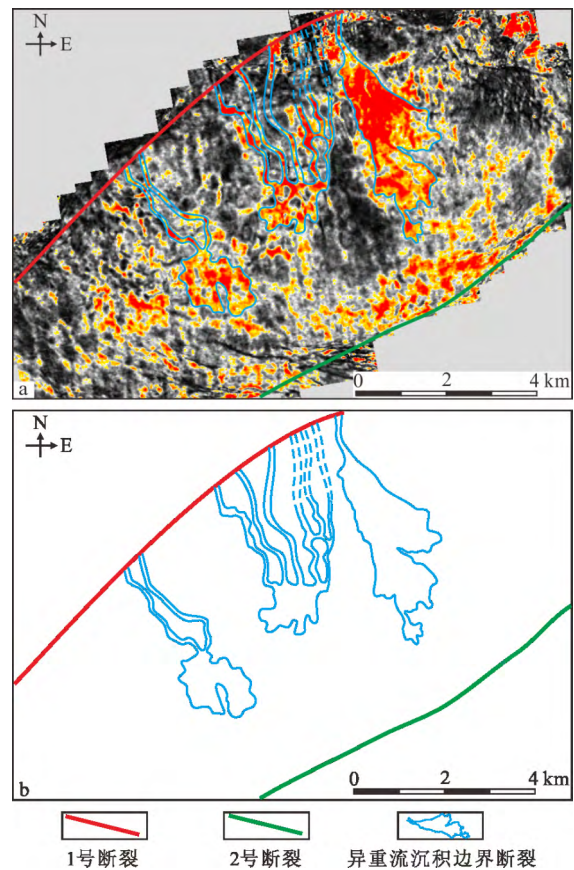
涠西南凹陷总体经历了三次张裂和裂后沉降^[31-32]。流沙港组沉积时处于始新世第二次张裂期,近北北西-南南东向拉张应力导致北东东-南西西向控拗 1 号断层形成,流沙港组经历了由扩张、鼎盛到萎缩的过程^[25]。流沙港组自下而上可划分为流三段、流二段和流一段。流一段自下而上,沉积环境由半深湖-深湖演变为滨浅湖,流一段下亚段沉积时水体快速上涨,湖盆范围相对流二段继续扩大,沉积环境以半深湖-深湖为主,约占整个湖盆面积的 60%^[27],早期沉积体主要为泥岩夹薄层砂岩。

2 异重流沉积特征

通过对涠西南凹陷北部陡坡带中段流沙港组一段下亚段地震属性、沉积构造与沉积组合序列等特征的研究,认为在陡坡带中段发育异重流沉积。相关特征如下。

2.1 地震相特征

通过对涠西南凹陷北部陡坡带中段流沙港组一段下亚段地震属性提取及河道特征 RMS 地震属性精细解析,可以发现在流一段下亚段发育异重流水道系统,异重流水道分布与物源方向一致(图 2)。异重流水道自陡坡带向湖盆中心展布,并由顺直水道逐渐分叉演变为弯曲水道。由于异重流流体能量较大,陡坡带顺直水道较少分叉,延伸距离较短,一般为 2~3 km;湖盆中心地形坡度变缓,异重流流速逐渐降低,水道出现分叉且变得弯曲,延伸较远,最远可延伸至湖盆中心,延伸距离一般为 10~14 km。凹陷西部异重流水道主要表现为单一水道,水道前端



a—异重流沉积 RMS 地震属性图;b—异重流沉积地震属性解释,实线表示确定的异重流沉积边界,虚线表示可能存在的水道。

图 2 涠西南凹陷陡坡带流一段下亚段异重流沉积平面分布特征图

Fig.2 Distribution characteristics of hyperpycnal flow deposits in the $E1_1^x$ section of the steep slope belt in the Weixinan sag

朵叶体规模较小,东部异重流水道则表现为多个水道垂向叠加,水道前端形成相对较大规模朵叶体沉积,整体上东部水道规模略大于西部水道规模(图 2)。

此外, 东部异重流水道发育处地震属性颜色明显强于西部, 这可能是由于东部物源供给强于西部, 水道内沉积以砂岩或含砾砂岩为主, 而西部水道内沉积可能为粉砂岩或泥质粉砂岩。

从垂直异重流水道地震反射剖面可以看出, 异重流水道地震反射结构主要表现为在水道发育部位均表现为强振幅地震反射, 其地震波能量明显强于周围深水泥岩, 横向延伸距离较短, 约 50~150 m。凹陷东部水道相对较宽, 横向延续较远, 可能是多个水道多次叠加的结果(图 3)。

2.2 粒度特征

“源-汇”系统差异是决定异重流沉积物粒度大小的关键因素, 陡坡带山区河流距物源较近, “源-汇”系统复杂, 物源沉积物粒度存在较大差异, 导致异重流沉积物粒度也具有较大差异^[12,20]。根据研究区 W1 井流一段下亚段 8 个样品点粒度统计结

果, 该段沉积物粒度概率曲线以宽缓上拱式及上拱弧形式为主, 悬浮组分所占比例较高, 范围在 35%~65%(图 4a)。由 $C=M$ 图可知, C (粒度概率累计曲线上 1% 处对应的粒度, 即最粗颗粒粒度) 为 400~950 μm , M (累积频率曲线 50% 处对应的粒度, 即粒度中值) 为 50~220 μm , 样品点集中分布区间大致平行于 $C=M$ 基线(图 4b), 指示流一段下亚段具有重力流沉积特征。上述分析表明, 研究区流一段下亚段发育堆积速率较快的突发性重力流沉积^[33], 且以重力流悬浮搬运沉积为主^[34]。

2.3 沉积构造特征

由于受洪水能量控制, 异重流沉积发育逆-正粒序沉积序列组合, 该沉积序列组合反映了陆上物源供给及洪水能量由弱变强再变弱的特征; 同时沉积物中发育交错层理、平行层理、层内微侵蚀接触面、泥岩撕裂屑、碳质碎屑及植物碎片等沉积构造,

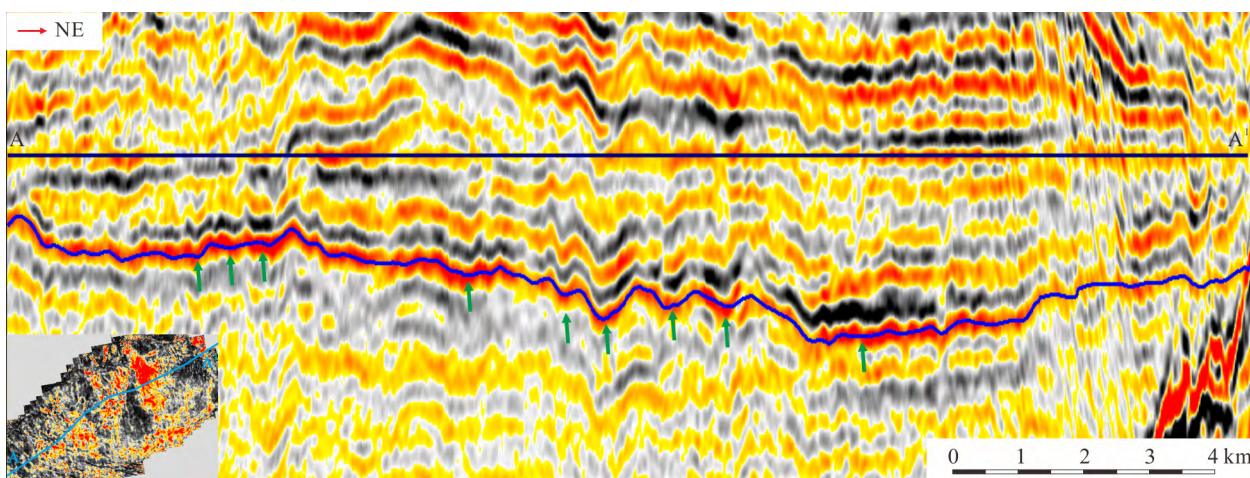
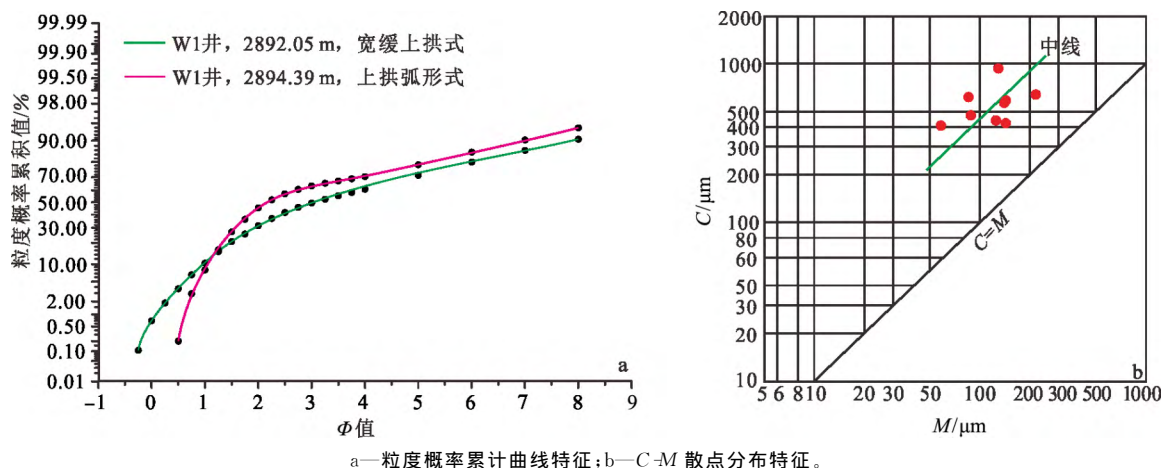


图 3 涪西南凹陷北部陡坡带流一段下亚段近于垂直水道地震相特征图

Fig.3 The characteristics of seismic facies perpendicular to the water channel in El_1^s , Weixinan sag



a—粒度概率累计曲线特征; b—C-M 散点分布特征。

图 4 涪西南凹陷陡坡带流一段下亚段异重流沉积粒度特征图

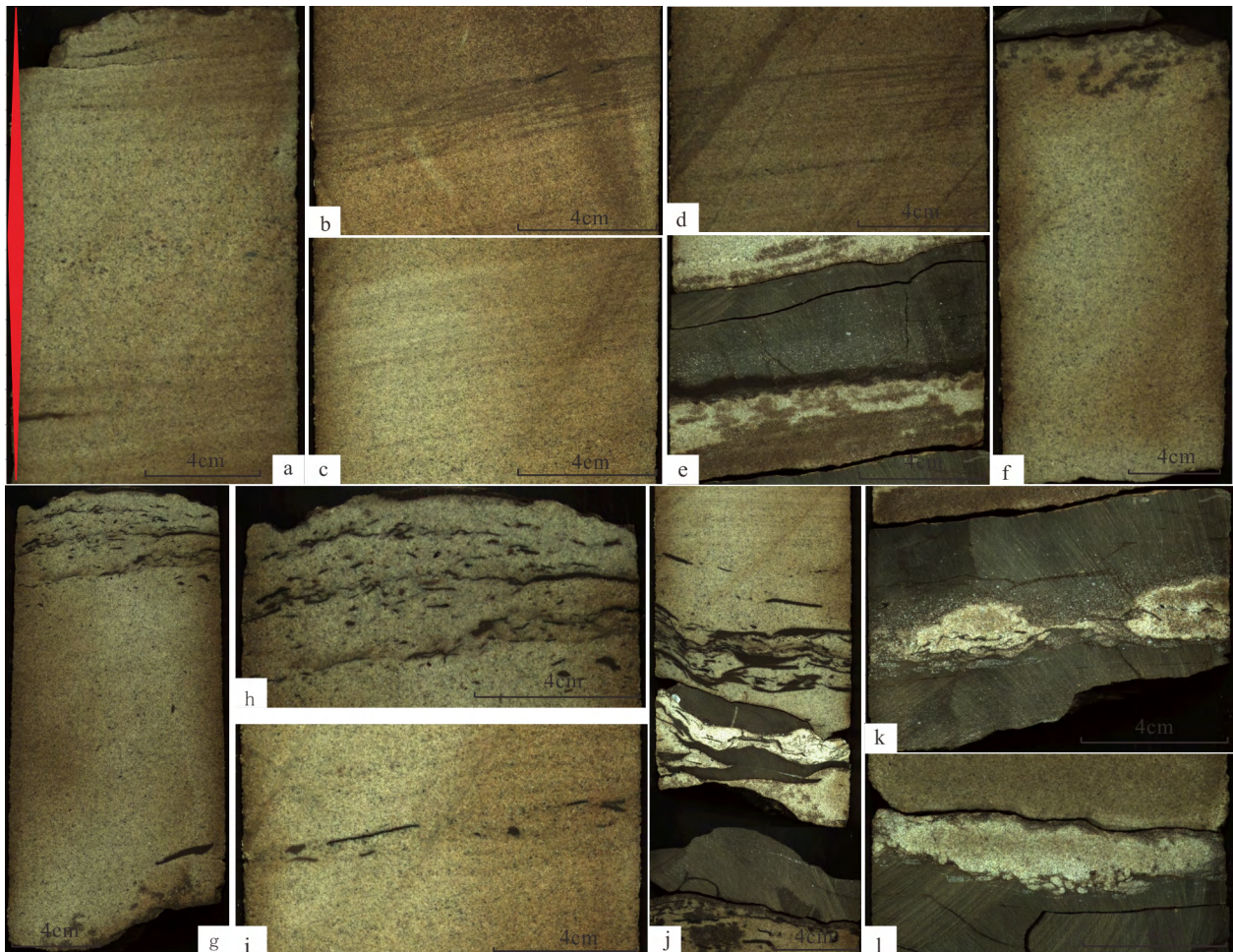
Fig.4 Characteristics of hyperpycnal flow deposits in El_1^s , Weixinan sag

这些沉积构造可反映洪水的流动特征。因此,通过对沉积序列组合和沉积构造的综合分析,可较为准确地识别异重流沉积^[12,22,35]。

岩心观察表明 W1 井垂向上发育多个粒度向上变粗的逆粒序与粒度向上变细的正粒序组合(图 5a)。逆-正粒序组合厚度不一,最厚可达数十厘米,最薄仅有 3~5 cm,沉积物粒度在逆-正粒序变换处最粗,主要为中粗砂。下部逆粒序与上部正粒序沉积组合代表了洪水能量的增强和减弱,但转换界面的边界较为模糊;一个逆粒序-正粒序组合只能表明洪水能量的相对增强和减弱,并不能代表一次完整的洪水事件^[24]。随着洪水能量逐渐增强,洪水流速持续增大,当流速超过砂体侵蚀临界速度时,早期逆粒序砂体遭受侵蚀;而洪水后期,随洪水能量逐渐减弱,洪水流速降低,晚期沉积砂体

与早期侵蚀残留沉积层接触,形成层内微侵蚀面,其位置对应于层内粒度最粗处。但若洪水能量足够强时,洪水会完全侵蚀底部逆粒序层,形成块状正粒序砂岩或含砾砂岩。流一段下亚段也发育单一正粒序,粒度最粗可达到含砾粗砂级别,正粒序底部多见冲刷面(图 5g)。单一洪水事件中异重流沉积层一般与上覆深水滞水环境下形成的灰黑色泥岩间具有明显接触面,该接触面可以指示一次重力流事件的结束(图 5e)。

W1 井中块状层理最为发育,是异重流携带悬浮物质快速堆积的结果^[4],其岩性分布较广,主要有含砾砂岩、中砂岩及细砂岩(图 5f)。此外,岩心中可见平行层理(图 5d)、波状层理(图 5c)及爬升砂纹层理(图 5b)等流动成因构造,这些沉积构造主要出现在正粒序顶部,形成于洪水减弱的末期^[12]。异重



a—逆粒序-正粒序组合,正粒序顶部发育微弱的平行层理;b—爬升砂纹层理;c—波状层理;d—平行层理;e—岩性突变接触,代表一次重力流事件的开始和结束;f—块状层理,岩性为含细砾中粗砂岩;g—正粒序,顶部为片状碳质碎屑;h—为g图顶部碳质碎屑部分放大,碳质碎屑具微弱的叠瓦状构造;i—泥砾层,位于正粒序的底部;j—泥岩撕裂屑,块状层理,为碎屑流沉积特征;k—砂质球枕构造,呈现“泥包砂”特征;l—重荷模及火焰状构造。

图5 涪西南凹陷陡坡带流一段异重流沉积沉积构造特征

Fig.5 Sedimentary structural features of hyperpycnal flow deposits in $E1^8$, Weixinan sag

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2019,26(4)

流形成过程中沉积物持续供给,并在侧向上发生推移,因此水平层理和交错层理在异重流沉积岩中较为发育^[4]。当洪水能量减弱,即在弱水动力条件下,沉积物沉积速率大于搬运速率,易形成爬升砂纹层理(图 5b)。流动成因层理构造是异重流沉积有别于滑塌重力流沉积的典型标志之一。

异重流沉积是陆上河流携带沉积物在汇水盆地卸载形成,因此沉积产物含有大量陆上植物碎屑或碳质碎屑也是异重流沉积的典型特征(图 5g, 5h)。研究区流一段下亚段中碳质碎屑和植物碎屑沉积主要形成于异重流沉积晚期,即砂质沉积结束后悬浮碳质碎屑和植物碎片发生集中沉降^[12]。碳质碎屑与泥质碎屑呈叠瓦状排列表明异重流沉积中可形成流动成因构造(图 5h)。

在洪水成因异重流沉积中经常可以见到泥岩撕裂屑,其主要发育在块状层理砂岩中(图 5j),具有杂乱分布的特征,整体呈块状构造。这些特征表明研究区流一段下亚段存在砂质碎屑流沉积,同时也反映了层状砂质碎屑流具有整体“冻结式”沉积过程^[4]。

W1 井岩心中软沉积物变形构造也比较发育,常见火焰状构造、重荷模(图 5l)以及球枕构造(图 5k)。由于流一段下亚段异重流为洪水型重力流,沉积物沉积速率快,孔隙水来不及充分排出形成孔隙流体超压,沉积期后在其他外力作用下形成软沉积物变形构造。

2.4 单井沉积特征

洪水型异重流为突发性事件,异重流沉积可以从陆上一直推进到盆地中心,因此,异重流沉积主要表现为砂岩与泥岩互层,具有“泥包砂”的特征。受物源供给量及异重流能量差异的影响,不同期次异重流沉积厚度存在明显差异,研究区 W1 井流一段下亚段异重流砂岩最大厚度可达 11.16 m,最小为 1 m(图 6)。异重流沉积的测井响应多呈钟形,块状厚层砂岩以箱形为主。受“源-汇”系统控制,异重流既可以沉积相对较粗的沉积物,也可以沉积相对较细的沉积物^[20],W1 井异重流沉积整体以含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩以及泥质粉砂岩为主。通过取心段岩心描述可知,砂岩段中单层砂岩具有逆粒序-正粒序成对出现的特征(图 6),逆粒序与正粒序呈突变式接触或渐变式接触。逆粒序与正粒序渐变接触面的沉积物粒度最粗,且泥质碎屑大量出现,多呈现叠瓦状展布,表明其沉积于异重流能量最强时,由底负载搬运形成^[4]。

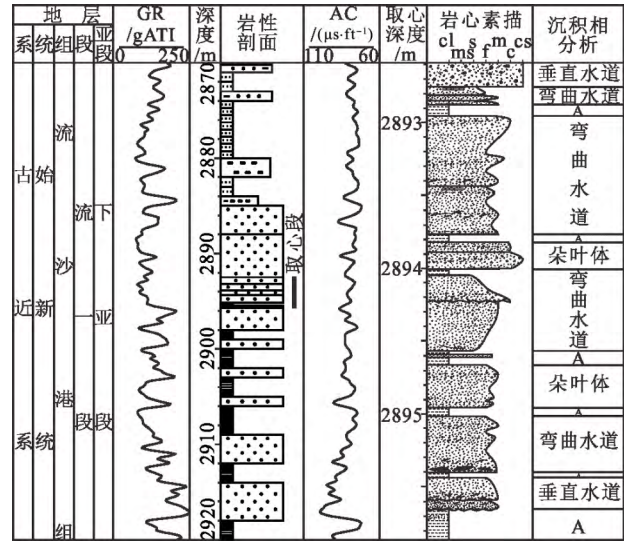


图 6 涠西南凹陷北部陡坡带 W1 井流一段下亚段单井特征图
Fig.6 Sedimentary characteristics of the W1 well in E11, Weixinan sag

3 异重流沉积控制因素

异重流的形成受地形坡度、构造活动强度、气候条件、物源性质、沉积物供给、水体密度等多种因素控制^[6, 15, 18-22, 36]。异重流发生无须地震、火山等因素作为触发机制,强烈的构造活动形成的足够的地形坡度是异重流形成的主要控制因素。地形坡度增大、构造活动增强等特殊地质条件可增加异重流形成的概率。

从构造背景看,涠西南凹陷 1 号断裂自长流组沉积时期开始持续活动,至涠洲组沉积之后才逐渐减弱^[36]。涠西南凹陷陡坡带流二段沉积时期处于北部湾盆地古近系第二幕断陷期,1 号断裂活动速率约为 280 m/Ma^[37],至流沙港组流一段沉积前,构造活动虽有所减弱,但陡坡带地形坡度平均可达 20°。此外,涠西南凹陷北部 1 号断裂性质在西部和东部存在差异,西部断裂走向为 NEE 向,东部断裂走向为近 EW 向,西部断裂断距明显大于东部,由于断裂走向及断距的差异性,在研究区形成了构造转换带(图 1)。构造转换带一般认为是物源进入沉积区的主要通道,是物源水系发育的主要控制因素,对沉积体系展布具有明显控制作用^[38-39]。因此,研究区构造转换带是物源水系进入坡折带的优势通道^[40],有利于异重流沉积物的搬运。

从气候背景看, 北部湾盆地流一段沉积时期古气候为热-亚热带湿润-半湿润气候^[37,41]。流一段沉积时期, 研究区沉积物物源主要位于万山隆起北东部, 异重流沉积砂体岩石类型主要为长石质岩屑砂岩, 岩屑平均含量为 23.81%, 岩屑成分主要为岩浆岩, 表明物源区主要发育岩浆岩^[42]。岩浆岩抗剥蚀能力较强, 因而物源丰度较低, 且物源区与盆地沉积区距离相对较远, 长距离搬运导致研究区形成大规模沉积砂体的难度增大。但流一段沉积时期, 季节性湿润-半湿润气候可提供充沛的降雨量, 中-小型高密度河流发育, 并且湖盆水体充盈, 水体密度相对较小, 阵发性洪水有利于物源区沉积物发生较长距离搬运, 洪水将沉积物直接由物源区搬运至湖盆底部。

总的来说, 万山隆起北东部较难剥蚀的岩浆岩虽然很难提供大量沉积物供给, 导致研究区不能形成大规模砂体, 但在强构造运动和湿润-半湿润气候综合影响下, 有限的沉积物在陡坡带被洪水以异重流形式搬运至沉积盆地。因此, 较强的构造运动、较陡的坡折、湿润-半湿润气候以及相对较低的湖水密度是控制异重流发育的主要因素。

4 异重流沉积模式

在单一期次洪水迁移演化过程中, 从陡坡带到盆地深水区洪水流速变化依次滞后, 异重流沉积主要经历了早期侵蚀—侵蚀过路—后期沉积的演化过程^[24]。在上述研究的基础上, 笔者建立了涠西南凹陷陡坡带流一段下亚段异重流沉积模式(图 7)。季节性洪水携带异重流通过陡坡带直接入湖, 起初由于洪水能量较强, 坡折至坡脚处发育顺直水道, 水道内部主要为异重流衰减期形成的块状或正粒序沉积砂体, 岩性以细砾质砂岩或粗砂岩为主, 可见明显冲刷-充填构造, 底部发育泥质碎屑。随着异重流能量逐渐减弱, 坡脚至深水处顺直河道逐渐演化为弯曲河道, 坡脚处强烈的水力跳跃作用导致异重流流体易于分叉改道, 发育多个分叉弯曲水道^[43], 这些弯曲水道形成了复杂的水道沉积体系, 水道内部主要沉积正粒序以及逆粒序-正粒序组合砂岩, 在逆粒序-正粒序组合的顶部多见平行层理或波状层理, 逆粒序-正粒序转换处可见较小泥质碎屑呈叠瓦状排列, 由于洪水能量的增强, 局部可见层内微侵蚀面。最终, 在深水平缓区, 异重流能量减弱导致底床载荷

部分逐渐减少, 搬运方式以悬浮载荷为主, 沉积物堆积形成异重流前端扇朵叶体, 扇朵叶体内部岩石粒度较细, 单层厚度较薄。

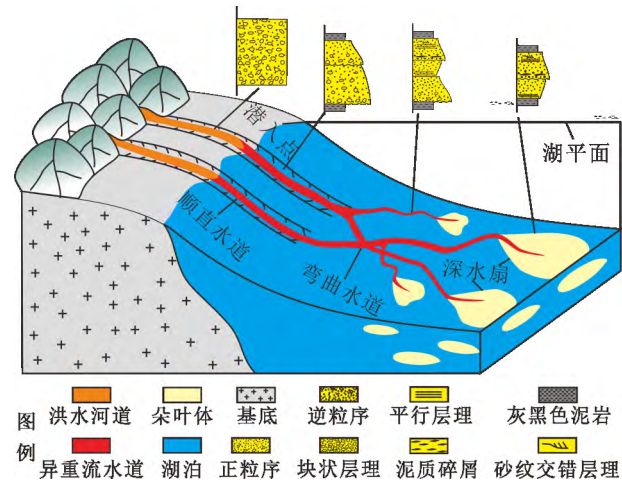


图 7 涠西南凹陷北部陡坡带流一段下亚段异重流沉积模式图
Fig.7 The sedimentary pattern of hyperpycnal flow deposits in EL₁ of steep slope in Weixinan sag

5 地质意义

有别于似涌浪浊流, 异重流是一种特殊类型的浊流, 异重流砂体已成为当今陆相湖盆勘探中重要的潜在砂体类型^[3-4,12,24,44]。涠西南凹陷陡坡带异重流沉积砂体的发现对于陆相断陷湖盆陡坡带砂体成因类型研究具有重要意义。涠西南凹陷陡坡带异重流的发育受构造与气候的双重控制, 强烈的构造运动和湿润-半湿润气候均有利于异重流的发育。同时, 异重流砂体的形成为弱物源区砂体沉积分布提供合理解释, 在流沙港组流一段下亚段沉积时期, 万山隆起北东部形成的沉积物相对较少, 与 1 号断裂西段相比, 1 号断裂转换带距物源更远, 砂体发育较弱。在“源-汇”系统控制下, 万山隆起来源的沉积物沿构造转换带内物源水系系统, 经较强能量洪水携带由物源区向盆地中心长距离搬运^[45], 异重流分层效应可将沉积物进行一定程度的分选。因此, 异重流沉积动力学过程的阐明可以合理解释陆相盆地陡坡带深水低杂基含量砂体的成因。

此外, 异重流沉积砂体具有极大的勘探意义, 深水重力流砂体形成机制在很大程度上会影响砂体展布及其连通性^[12], 异重流砂体作为陆相湖盆深水环境下形成的一种重要储集砂体类型^[3], 其粒度相对较粗, 分选性较好, 且泥质含量较低, 易于形成有利

储层。涠西南凹陷流沙港组流二段及流一段下亚段泥岩为品质较好的烃源岩, 异重流砂体与烃源岩相邻, 具有明显的近源成藏优势, 有利于形成岩性油气藏, 流一段下亚段是现今岩性油气藏有利勘探区。异重流沉积理论将在未来深水砂体预测和油气勘探中发挥更重要的指导作用。

6 结论

(1) 涠西南凹陷北部陡坡带流一段下亚段发育一套水道-深水扇模式的异重流沉积。水道由北向南延伸, 根据水道弯曲度将水道分为顺直水道和弯曲水道, 顺直水道延伸距离一般为 2~3 km, 弯曲水道延伸距离为 12~14 km, 水道宽度一般在 50~100 m 左右, 水道地震反射明显强于周围深水泥岩, 内部沉积以砂岩和含砾砂岩为主, 朵叶体沉积主要为细砂岩或粉砂岩, 富含陆源植物碎屑。

(2) 涠西南凹陷北部陡坡带异重流沉积粒度概率曲线以上拱弧形式为主, 悬浮组分比例较高, $C=M$ 图上样品点集中分布区间大致平行于 $C=M$ 基线, 表明沉积物搬运方式为重力流悬浮搬运。单层砂岩厚度从数厘米至数十厘米, 垂向上常见逆粒序与正粒序成对出现, 逆-正粒序中部岩性粒度最粗, 一般为细砂-中砂, 泥质碎屑呈叠瓦状排列, 逆-正粒序转换处可见层内微侵蚀面, 为异重流沉积的典型特征。此外, 异重流内部发育悬浮载荷快速沉积形成的块状层理以及流动成因的平行层理、交错层理、波状交错层理与爬升砂纹层理。

(3) “源-汇”系统控制异重流的沉积特征及其展布, 万山隆起北东部岩浆岩是异重流形成的物质基础, 较强的构造运动、较陡的坡折、湿润-半湿润气候及相对较低的湖水密度是控制异重流发育的主要因素。异重流沉积砂体作为涠西南凹陷深水环境下形成的一种重要储集砂体类型, 其粒度相对较粗, 分选较好, 泥质含量低, 且紧邻烃源岩, 有利于形成岩性油气藏, 是潜在的有利勘探区。异重流沉积砂体分布规律研究将在未来深水砂体预测和油气勘探中发挥十分重要的作用。

参考文献

[1] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition[C]// MIDDLE-

TON G V, BOUMA A H. Turbidites and deep-water sedimentation. Los Angeles, California: SEPM Pacific Section, 1973: 1-38.

[2] VALLE G D, GAMBERI F. Erosional sculpting of the Caprera confined deep-sea fan as a result of distal basin-spilling processes (eastern Sardinian margin, Tyrrhenian Sea)[J]. Marine Geology, 2010, 268(1/2/3/4): 55-66.

[3] 杨仁超, 金之钧, 孙东胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10-20.

[4] 潘树新, 刘化清, ZAVALA C, 等. 大型坳陷湖盆异重流成因的水道-湖底扇系统: 以松辽盆地白垩系嫩江组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 860-870.

[5] MULDER T, MIGEON S, SAVOYE B, et al. Inversely graded turbidite sequences in the deep mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents?[J]. Geo-marine Letters, 2001, 21(2): 86-93.

[6] ALEXANDER J, MULDER T. Experimental quasi-steady density currents[J]. Marine Geology, 2002, 186(3): 195-210.

[7] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones: implications[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 316-324.

[8] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 125(3): 244-287.

[9] 鲜本忠, 万锦峰, 姜在兴, 等. 断陷湖盆洼陷带重力流沉积特征与模式: 以南堡凹陷东部东营组为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 121-135.

[10] 廖继佳, 朱筱敏, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 29-39.

[11] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows?[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(1): 2-10.

[12] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 异重流沉积动力学过程及沉积特征[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 23-33.

[13] 操应长, 王思佳, 王艳忠, 等. 滑塌型深水重力流沉积特征及沉积模式: 以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙三中亚段为例[J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 419-432.

[14] PIPER D J, NORMARK W R. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: a marine geology perspective[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(6): 347-362.

[15] MUTTI E, BERNOULLI D, LUCCHI F R, et al. Turbidites and turbidity currents from alpine 'flysch' to the exploration of continental margins[J]. Sedimentology, 2008, 56(1): 267-318.

[16] TALLING P J. On the triggers, resulting flow types and fre-

- quencies of subaqueous sediment density flows in different settings[J]. *Marine Geology*, 2014, 352(3): 155-182.
- [17] 刘江艳, 张昌民, 侯国伟, 等. 西湖凹陷中部花港组异重流沉积特征及模式[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(2): 17-24.
- [18] STEVENSON C J, PEAKALL J. Effects of topography on lofting gravity flows: implications for the deposition of deep-water massive sands[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1366-1378.
- [19] PATTISON S A J, BRUCE-AINSWORTH R, HOFFMAN T A. Evidence of across-shelf transport of fine-grained sediments: turbidite-filled shelf channels in the Campanian Aberdeen Member, Book Cliffs, Utah, USA[J]. *Sedimentology*, 2007, 54(5): 1033-1064.
- [20] MUTTI E, TINTERRI R, BENEVELLI G, et al. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 733-755.
- [21] MULDER T, SYVITSKI J P, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 861-882.
- [22] PETTER A L, STEEL R J. Hyperpycnal flow variability and slope organization on an Eocene shelf margin, Central Basin, Spitsbergen [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (10): 1451-1472.
- [23] PLINK-BJÖRKLUND P, STEEL R J. Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for eocene hyperpycnal flow turbidites[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 165(1): 29-52.
- [24] 孙福宁, 杨仁超, 李冬月. 异重流沉积研究进展[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 452-462.
- [25] 谭卓, 刘志国, 李运振, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷陡坡带砂体成因类型及其演化[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(1): 1-9.
- [26] 董桂能. 涠西南凹陷流一段扇三角洲沉积特征及其对隐蔽油气藏形成的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2008, 20(5): 298-301.
- [27] 董桂能, 李俊良. 北部湾盆地涠西南凹陷流一段非构造油气藏[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(5): 552-560.
- [28] 王健, 操应长, 李俊良. 北部湾盆地涠西南凹陷古近系层序结构与非构造圈闭[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 304-312.
- [29] 方勇, 张树林, 胡林, 等. 涠西南凹陷流一段两种岩性圈闭成因模式分析[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(5): 16-20.
- [30] 裴健翔, 董桂能, 朱其. 北部湾盆地涠西南凹陷流一段强制湖退沉积体的特征及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 520-527.
- [31] 张智武, 刘志峰. 北部湾盆地裂陷期构造及演化特征[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2013, 35(1): 6-10.
- [32] 刘震, 谭卓, 蔡东升, 等. 用断面正压力法分析北部湾盆地涠西南凹陷断层垂向封闭性及其演化[J]. *地质科学*, 2008, 43(4): 695-711.
- [33] 刘化清, 洪忠, 张晶, 等. 断陷湖盆重力流水道地震沉积学研究: 以歧南地区沙一段为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(4): 784-794.
- [34] WANG J, CAO Y C, LIU H M, et al. Formation conditions and sedimentary model of over-flooding lake deltas within continental lake basins: an example from the Paleogene in the Jiyang Subbasin, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2015, 89(1): 270-284.
- [35] ZAVALA C, PONCE J J, ARCURI M, et al. Ancient lacustrine hyperpycnites: a depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of West-central Argentina[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76 (1): 41-59.
- [36] 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏[J]. *石油学报*, 1998, 18(7): 6-10.
- [37] 徐建勇, 张功成, 梁建设, 等. 北部湾盆地古近纪幕式断陷活动规律及其与油气的关系[J]. *中国海上油气*, 2011, 23(6): 362-368.
- [38] 刘恩涛, 刘华, 李媛, 等. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带对层序及沉积体系的控制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(3): 17-29.
- [39] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义[J]. *古地理学报*, 2008, 10(5): 555-560.
- [40] 鲍志东, 赵艳军, 祁利祺, 等. 构造转换带储集体发育的主控因素: 以准噶尔盆地腹部侏罗系为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 867-877.
- [41] 罗威, 谢金有, 刘新宇, 等. 北部湾盆地海中凹陷古近纪古气候研究[J]. *微体古生物学报*, 2013, 30(3): 288-296.
- [42] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物源分析中的应用: 以涠西南凹陷古近系流三段下亚段为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 835-841.
- [43] POSAMENTIER H W. Depositional elements associated with a basin floor channel-levee system: case study from the Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 677-690.
- [44] 杨仁超, 何治亮, 邱桂强, 等. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 661-670.
- [45] 操应长, 徐琦松, 王健. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展[J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 116-131.