

文章编号: 1000-0747(2017)06-0860-11 DOI: 10.11698/PED.2017.06.03

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

潘树新¹, 刘化清¹, ZAVALA Carlos², 刘彩燕¹, 梁苏娟¹, 张庆石³, 白忠峰³

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020; 2. National University of the South, San Juan B8000CPB, Argentina; 3. 中国石油大庆油田公司, 黑龙江大庆 163000)

基金项目: “十三五”国家油气重大专项(2016ZX05001)

摘要: 以松辽盆地齐家—古龙地区白垩系嫩江组一段为研究对象, 通过地震沉积学、沉积构造和沉积序列等分析, 发现异重流成因的大型水道—湖底扇系统, 对大型坳陷湖盆深水区分布的异重流及其形成的异重岩进行研究, 构建了陆相湖盆异重流成因的水道—湖底扇沉积模式。研究表明, 异重流发源于盆地边缘, 经北部三角洲后在深水区形成完整的水道—湖底扇系统。自北向南依次发育顺直水道和弯曲水道, 直线延伸距离超过 80 km, 宽度 100~900 m; 水道末端发育湖底扇, 最大面积可达 20 km²。该系统主要以细粒沉积为主, 发育块状砂岩和流水成因的沉积构造, 内部发育侵蚀接触面, 富含陆源有机质碎屑, 具底床载荷和悬浮载荷兼有的形成机制。异重岩沉积序列表现为向上变粗和向上变细的旋回成对出现, 反映洪水逐渐增强随后又减弱的动力学特点。图 9 参 50

关键词: 松辽盆地; 白垩系; 嫩江组一段; 浊流; 浊积岩; 异重流; 异重岩; 沉积特征; 水道—湖底扇系统

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China

PAN Shuxin¹, LIU Huaqing¹, ZAVALA Carlos², LIU Caiyan¹, LIANG Sujuan¹, ZHANG Qingshi³, BAI Zhongfeng³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Lanzhou 730020, China; 2. National University of the South, San Juan B8000CPB, Argentina; 3. Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163000, China)

Abstract: Based on the integrated analysis of the seismic sedimentology, drilling and core data from the Nen 1 Member of the Cretaceous Nenjiang Formation in the Qijia-Gulong area, a large channel fan system of hyperpycnal flow origin was found in the Songliao Basin, and the hyperpycnal flows and hyperpycnites distributed in the deep water area of large depression lake basin were examined to find out the depositional model of channel-fan of hyperpycnal flow origin in the continental lake basin. The study shows that the hyperpycnal flow in this area originated from the edge of the basin, passed the northern delta, and then gave rise to a complete channel-fan system in the deep water area. The channel-fan system consists of straight channel and meandering channel from north to south with a straight extension of over 80 km and width of 100–900 m, and distal fan lobes at the channel tip with the maximum area of 20 km². Dominated by fine-grained deposits, the system contains massive sandstone and sedimentary structures of flow water origin, internal erosion surfaces, and rich continental organic clasts, and shows bed-load and suspended-load transportation mechanisms. The hyperpycnite sequence has a coarsening-upward lower sequence and fining-upward upper sequence appearing in pairs, reflecting the dynamic feature of flood strengthening and then weakening cycle.

Key words: Songliao Basin; Cretaceous; Nenjiang Formation; turbidity current; turbidite; hyperpycnal flow; hyperpycnites; sedimentary characteristics; sublacustrine channel-fan

引用: 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.

PAN Shuxin, LIU Huaqing, ZAVALA C, et al. Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 860-870.

0 引言

深水沉积一直是油气勘探和研究最为活跃的领域

之一。近 20 余年来的研究和勘探实践表明, 除浊流和块体搬运作用能形成大规模深水储集层外^[1-4], 异重流是另一种重要的将浅水沉积物向深水盆地长距离搬运

的地质营力,但在流体类型、搬运机制及形成的深水砂体等方面的研究却未受到重视^[5-6]。异重流是指因河口流体密度大于周围水体密度而形成沿盆地底部流动的高密度流体^[6-7]。除冰雪融化、堤岸溃坝、水库泄水、火山喷发等事件触发外,异重流主要由季节性洪水触发而形成^[7],携带大量沉积物的河流洪水,因密度大于汇水盆地水体密度,流体受浮力作用小,高密度洪水可以沿盆地底部长距离运移^[5]。

Bates^[8]早在1953年就发现这种流体并定义为异重流,但异重流得到学术界高度重视和认可是在1995年Mulder和Syvitski等^[9]对异重流的概念进行重新厘定之后。近20余年来,异重流的形成条件、沉积特征及油气勘探价值等已经成为深水沉积最为活跃和最热门的研究内容之一。2008年美国石油地质学家协会(AAPG)在阿根廷召开了赫德伯格会议,专门研讨了异重流沉积,并于2011年出版了地质研究专辑^[10]。异重流理论的建立标志着深水沉积理论的新发展,Mulder等^[5]将由外因触发而形成的浊积岩、块体搬运体与非激发型洪水异重流严格地区分开来,认为深水砂体可以由连续的源-汇系统所形成,洪水河流携带大量悬浮沉积物引起的异重流也许是自然界更常见、更重要的深水地质营力,改变了深水砂体形成机制的传统认识。洪水型异重流频繁发生于现代海洋和湖泊等深水环境^[9-11],在湖盆中心通常形成大规模的水道—海(湖)底扇系统^[12-19]。异重流形成的沉积物称为异重岩,具底床载荷和悬浮载荷兼有的形成机制,其典型沉积特征为一系列向上变粗的旋回和向上变细的旋回成对出现,反映了洪水先增强、后衰减的特征^[5];异重岩发育大规模流水成因沉积构造,但缺乏软沉积变形构造;其形成机制、沉积系列和沉积特征明显不同于块体搬运体和经典的浊流沉积^[5-7]。

近年来中国陆相湖盆深水砂体勘探不断取得突破^[20-22],对于深水砂体的成因研究,出现了滑坡及块体搬运^[23-25]、砂质碎屑流^[26-28]、异重流^[29-30]和深水底流^[31]等新观点,这些新认识极大地丰富了中国陆相盆地深水沉积理论。目前已有学者在鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地^[29-30]发现异重岩,然而洪水成因的异重流及异重岩的研究仍然极为薄弱。有鉴于此,笔者利用15口探井资料及2200 km²高精度三维地震资料,通过地震沉积学、沉积构造和沉积序列等分析,对松辽盆地齐家—古龙地区白垩系嫩江组一段(简称嫩一段)湖盆中心分布的深水砂体进行再认识,以期为湖盆中心

寻找大规模深水优质储集层提供新的解释思路。

1 沉积背景

松辽盆地是中国东部具有断拗双重结构的中新生代大型叠合沉积盆地^[32-34]。盆地以上古生界石炭系—二叠系变质岩和花岗岩为基底,沉积盖层依次为中生界侏罗系、白垩系及新生界第三系和第四系。

白垩系是松辽盆地最主要的沉积地层,下白垩统自下而上发育火石岭组(K_{1h})、沙河子组(K_{1sh})、营城组(K_{1y})、登娄库组(K_{1d})和泉头组(K_{1q});上白垩统发育青山口组(K_{2qn})、姚家组(K_{2y})、嫩江组(K_{2n})、四方台组(K_{2s})和明水组(K_{2m})。根据拗陷期构造和地质特征,综合基底性质、埋深和深层构造,将松辽盆地划分为5个一级构造单元,分别为中央拗陷区、东南隆起区、北部倾没区、西部斜坡区和西南隆起区。齐家—古龙凹陷位于中央拗陷区。

嫩江组沉积期处于陆内拗陷全盛发育末期,是盆地发育的又一个兴盛期。嫩一段、嫩二段沉积期,松辽盆地大面积沉降,大规模湖侵造成湖泊面积急剧扩大,形成一个面积和规模超越青山口组沉积期的广阔湖盆,沉积充填以半深湖—深湖泥岩为主。从嫩三段沉积期开始湖泊面积收缩,形成明显的水退沉积序列,三角洲为主要沉积类型,尤其是北部物源的高建设性三角洲向南逐步进积,影响了盆地大部分地区^[34]。

研究区位于齐家—古龙凹陷北部,嫩一段厚0~100 m,岩性主要为黑色、灰黑色泥岩,中部夹页岩和油页岩。嫩一段沉积期北部水系极为发育,西部、南部和东部水系规模较小,湖相建造是主要沉积充填类型,沉积相类型以三角洲及湖相为主(见图1)。

2 水道—湖底扇系统

研究区发现的嫩一段水道—湖底扇系统位于前三角洲深水区。地震沉积学揭示三角洲前缘由3个朵体组成,每个朵体均呈鸟足状展布,内部树枝状分流河道的形态极为清晰(见图2)。湖底水道自北向南延伸,部分水道延伸直线距离超过80 km,宽度100~900 m,具有期次多、流程远、宽度逐渐变窄、迁移频繁等特点,河道可以分为顺直水道和弯曲水道2种类型。水道末端湖底扇极为发育,最大面积可达20 km²。

根据源-汇系统的不同,顺直水道(Sc)、弯曲水道(Mc)和湖底扇(Df)按照自西向东及从北往南依次命名为Sc1—Sc4、Mc0—Mc6、Df1—Df3等。

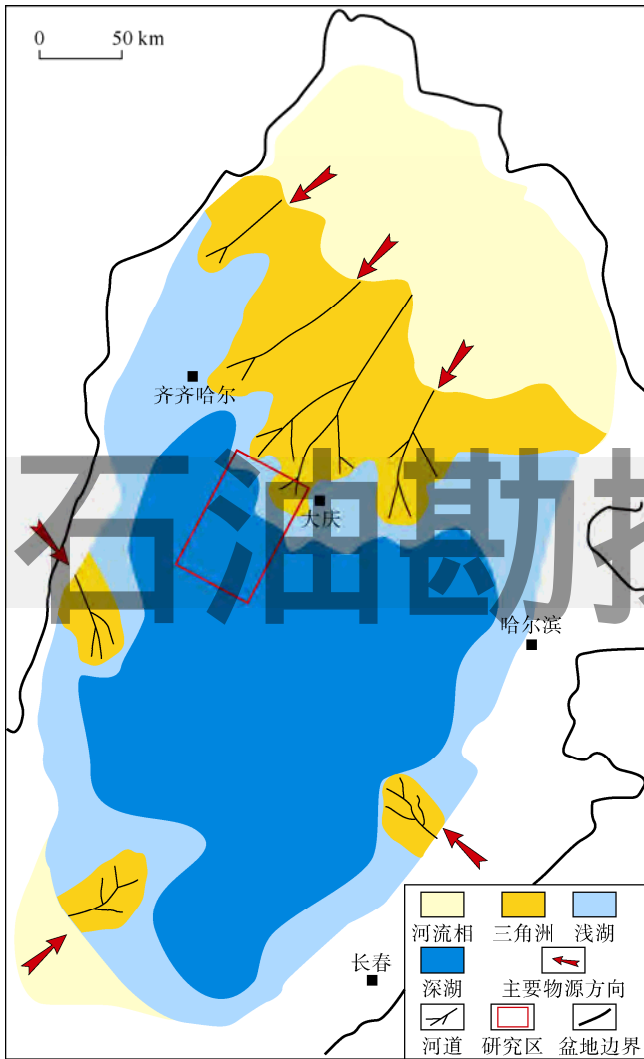


图1 松辽盆地白垩系嫩一段沉积相图(据文献[34-36]修改)

2.1 顺直水道

研究区发育 Sc1、Sc2、Sc3 和 Sc4 等 4 条顺直水道, 这些水道直接与三角洲前缘分流河道相连, 弯曲系数一般小于 1.2, 水道宽 100~900 m, 延伸长度 5~40 km。Sc1 和 Sc2 发源于三角洲前缘的朵体侧缘或朵体之间, 而 Sc3 和 Sc4 发源于朵体前缘。Sc2 是最典型的顺直水道, 其平面延伸距离超过 40 km, 随后水道分叉或者改道演变为弯曲水道。在地震剖面上, 顺直水道主要表现为强振幅、具有强烈下切及侵蚀前三角洲斜坡区的反射特征(见图 3a), 水道最宽可达 900 m, 平均宽度约为 500 m。钻遇 Sc2 水道的 W1 和 W2 井揭示, 水道砂岩分别厚 11.6 m 和 6.4 m, 岩心以粉细砂岩为主(见图 2b)。总体来说, 顺直水道平面形态较平直且分叉较少, 水道宽度和厚度向下游有变窄及变薄的趋势。

2.2 弯曲水道

弯曲水道位于水道—湖底扇系统的中下部, 上部与顺直水道相连, 末端均终止于湖底扇系统。顺直水

道 Sc1 向南延伸 20 km 后开始改道或者分叉, 西侧一枝转向南东方向, 延伸约 40 km 后终止于湖底扇 Df3; 东侧一枝由于晚期水道和三角洲切割与破坏, 展布形态极为不清。顺直水道 Sc2 向南延伸约 40 km 后分叉或者改道演变为弯曲水道, 西侧水道继续向南延伸 40 km 后终止于湖底扇 Df1; 东侧一枝向东南延伸约 7 km 后又转向近南北向延伸, 最终与弯曲水道 Mc3 汇集, 继续向南延伸约 12 km 后终止于湖底扇 Df2。顺直水道 Sc4 向南延伸约 5 km 后即转变为弯曲水道 Mc5, Mc5 向南延伸约 20 km 后出现了水道分叉或者改道, 西侧一枝依旧整体向南延伸并呈高弯度展布(见图 2b); 东侧一枝在分叉后向南东延伸, 长度超过 40 km, 超出研究工区, 推测这两支弯曲水道均终止于湖底扇系统。

研究区弯曲水道的弯曲指数为 1.51~1.71 (平均 1.58), 属于典型的曲流水道沉积^[37]。在地震剖面上弯曲水道表现为透镜状、强波峰的反射特征(见图 3b), 水道向湖盆中心明显变窄, 平均宽度仅 120 m。钻井资料揭示, 弯曲水道砂岩明显减薄, 并且表现为“泥包砂”的特征, 如钻遇 Mc3 的 W3 井累计砂岩厚度仅 4.6 m; 钻遇 Mc5 的 W6 井累计砂岩厚度仅 4.3 m(见图 2b)。另外, 弯曲水道外侧还发育中强振幅的扇形沉积体, 推测为溢岸沉积(见图 4)。

2.3 湖底扇

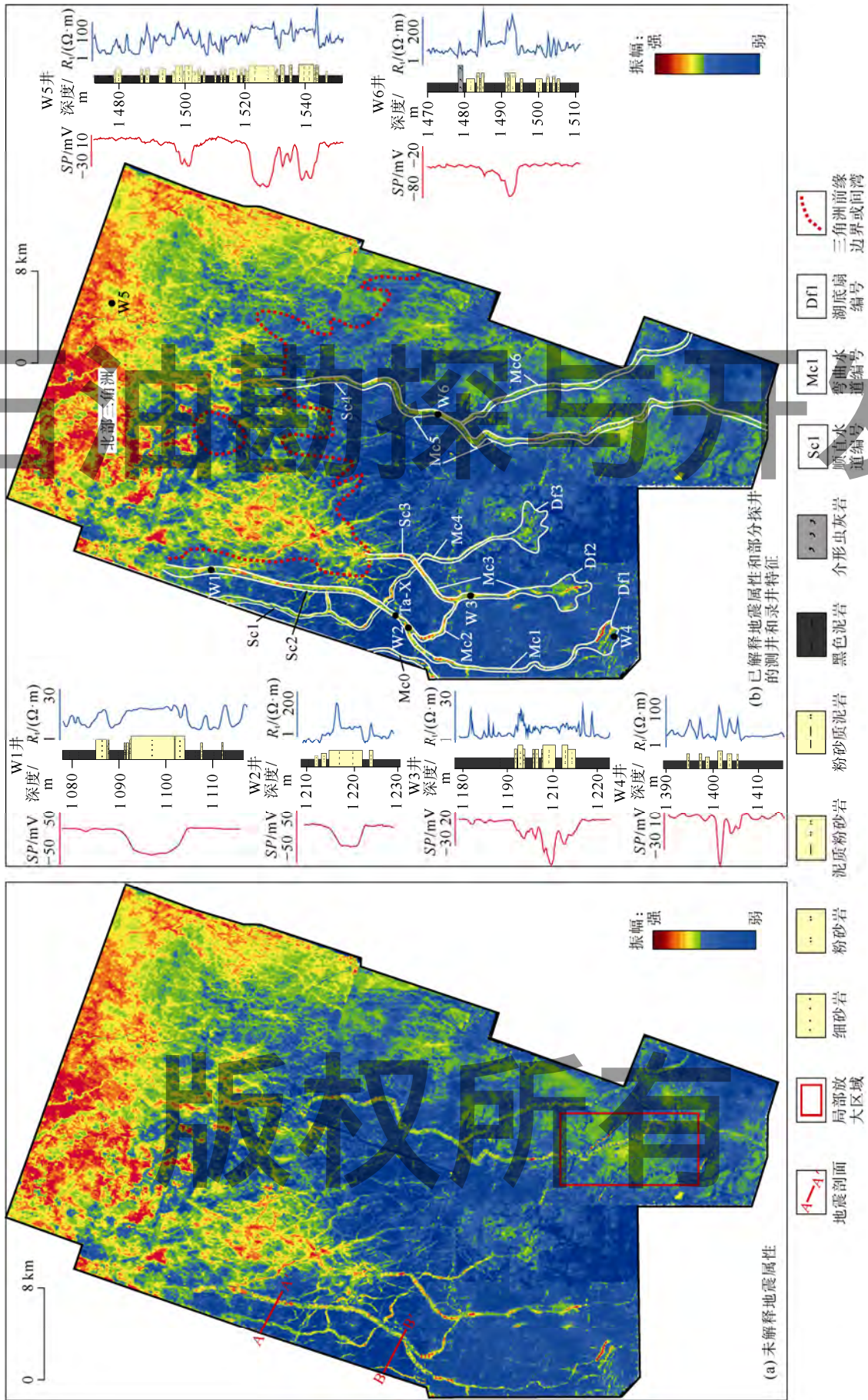
随着水道向湖盆中心地带过渡, 由于地形坡度逐渐变缓、流速降低、能量减弱, 沉积物大幅卸载而形成湖底扇, 研究区共发现 3 个湖底扇, 面积为 10~20 km², 均呈中强地震振幅, 反映泥质含量增高的特点。钻遇 Df1 的 W4 井揭示, 湖底扇以砂泥岩薄互层沉积为主, 砂岩单层厚度一般不超过 1 m, 岩性主要以粉砂岩和泥质粉砂岩为主(见图 2b)。

3 沉积特征

研究区钻井资料丰富, Ta-X 系统取心井位于水道轴部(见图 2b), 北距湖岸线约 30 km、处于顺直水道和弯曲水道的转换处, 钻遇砂岩 26 m, 为研究水道的沉积特征提供了资料基础。

3.1 岩石学特征

Ta-X 井岩性以粉砂岩为主, 单层砂岩厚度 0.03~5.00 m。岩石类型以岩屑长石粉砂岩为主, 成分成熟度普遍较低, 平均仅为 0.33。砂岩中石英含量约为 40%、长石平均含量 25%、岩屑含量 25%。砂岩颗粒分选好, 磨圆以次棱角状为主。接触方式为点状、线状和点线状, 胶结类型为孔隙式, 颗粒直径主要分布在 0.03~0.27 mm。



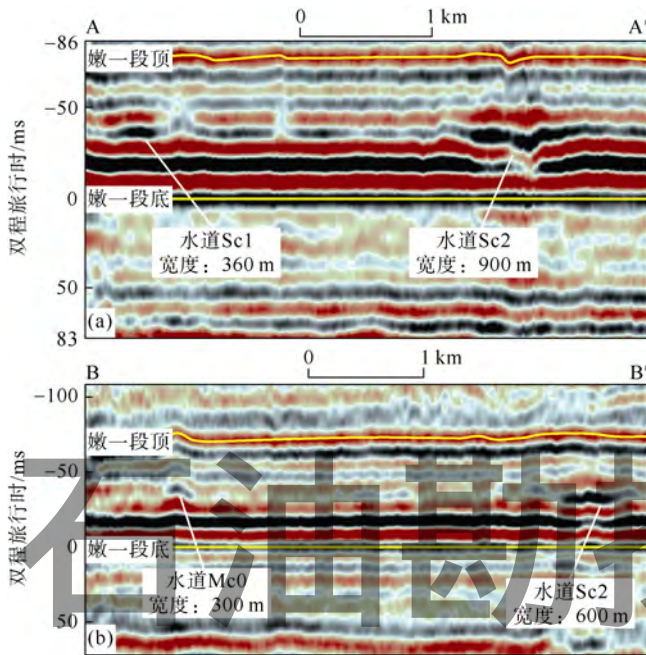


图3 松辽盆地嫩一段水道地震反射特征(剖面位置见图2a)

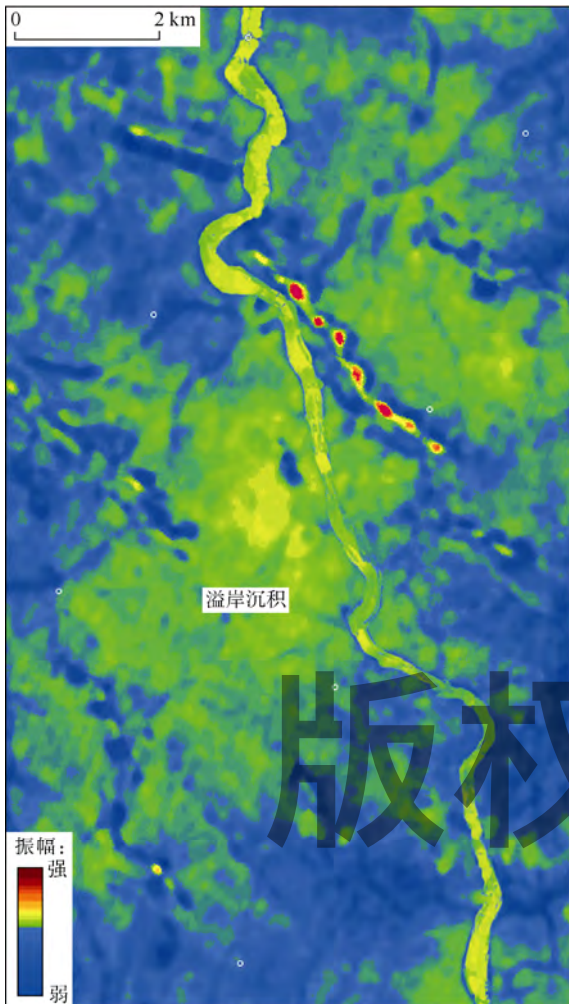


图4 弯曲水道均方根地震属性(平面位置见图2a)

3.2 粒度分布特征

概率累计曲线总体表现为以跳跃和悬浮为主的

段式,滚动总体不发育(见图5a),跳跃总体与悬浮总体交截点在粒度为4附近,并且悬浮总体的比例高达50%~90%,说明以悬浮搬运为主。粒度概率曲线的形态主要有2种类型:①曲线基本由一条斜率较高的直线段组成,与典型浊积岩的粒度分布曲线非常相似;②曲线有多个交截点并呈多段式展布,由多个次总体组成的跳跃总体粒度区间跨度大(0.5~4.0),斜率范围变化较大(10°~70°),分段性明显,但悬浮总体含量可高达90%,反映洪水增强时具有底载搬运和牵引流的沉积特征。从C-M图(C—累计质量分数为1%的颗粒直径,μm;M—粒径中值,μm)上来看,该套砂岩主要位于1区和2区(见图5b),说明该套沉积物兼有牵引流和重力流2种形成机制。

3.3 沉积构造

岩心观察表明,该系统沉积构造十分丰富,类型多样(见图6—图7)。除大规模发育块状层理外,还发育爬升层理、平行层理、交错层理和侵蚀构造等典型的流水成因沉积构造,另外还可见少量软沉积变形构造和生物成因构造等。

3.3.1 层理

块状层理。块状层理在Ta-X取心井中分布最为广泛(见图7a),85%以上的砂岩均为块状砂岩(见图6),异重岩中的块状砂岩主要是异重流中的悬浮物质快速沉积而成^[38]。块状砂岩中局部发育黑色泥砾,少数泥砾呈椭圆状,最大粒径可达5cm,多数泥砾呈叠瓦状分布在块状砂岩中(见图7b—7c)。Ta-X井块状砂岩中分布的泥砾与砂质碎屑流中分布的泥砾存在显著差异。砂质碎屑流中的泥岩碎块表现出杂乱分布的特征,泥岩碎屑的这些沉积特点既揭示了砂质碎屑流为层状流体,也反映了砂质碎屑流为整体“冻结式”的沉积过程^[24];而Ta-X井中的泥砾呈叠瓦状定向排列,反映了流体能量增强时的底载搬运作用。

平行、爬升和交错层理。发育流水成因的层理构造是异重岩有别于其他重力流沉积的重要标志之一^[5-10]。由于异重流在形成时伴随洪水水动力先增强后减弱的持续流水和波浪作用,因此交错层理和平行层理在异重岩中比较发育(见图7d—7g)。在较弱水动力条件下,当沉积物沉积速率大于搬运速率时会形成爬升层理(见图7e);当沉积物沉积速率等于搬运速率时会形成波状交错层理(见图7f);水动力作用较强阶段则以斜层理和平行层理为主(见图7d、图7g)。

3.3.2 软沉积变形构造

软沉积变形构造多出现在事件沉积地层中,也有学者将软沉积变形称之为同沉积变形、软岩石变形、

准同生变形或成岩前变形构造等^[39-40]。异重岩由于沉积速率极快，来不及充分排水，从而形成超孔隙压力，在沉积后期由于其他外因的触发，极易形成软沉积变

形构造。研究区异重岩底部软沉积变形构造比较发育，常见球枕构造、火焰状构造和滑塌变形构造（见图7h、图7i、图7k）。

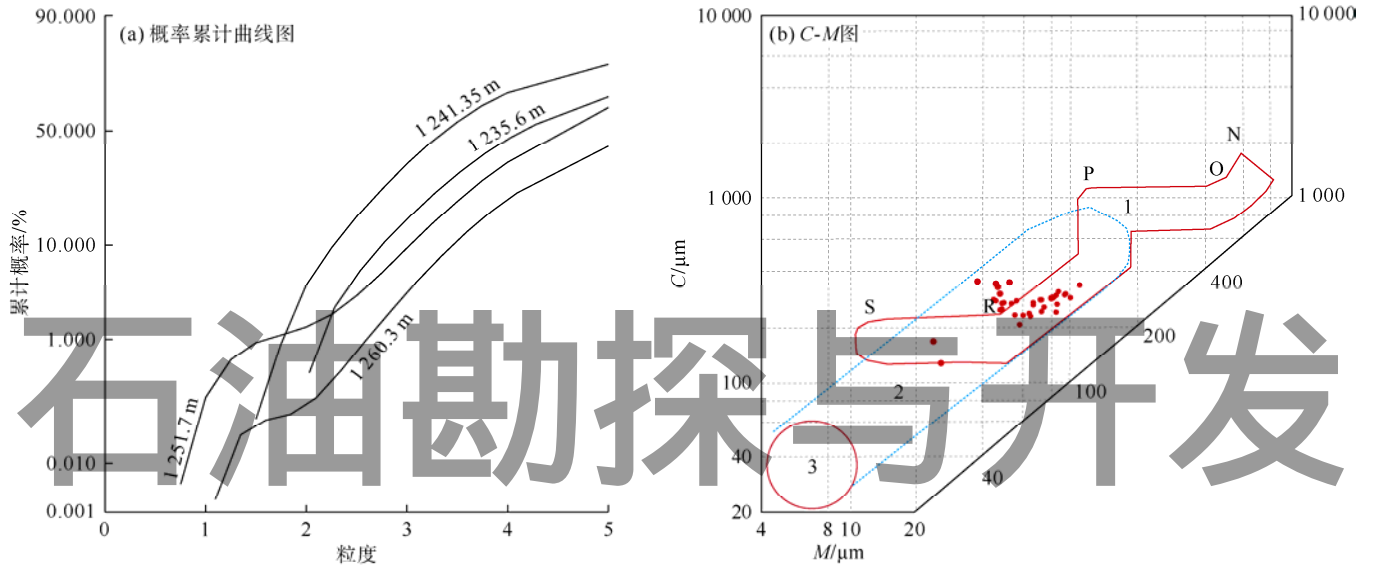


图5 Ta-X井概率累计曲线和C-M图

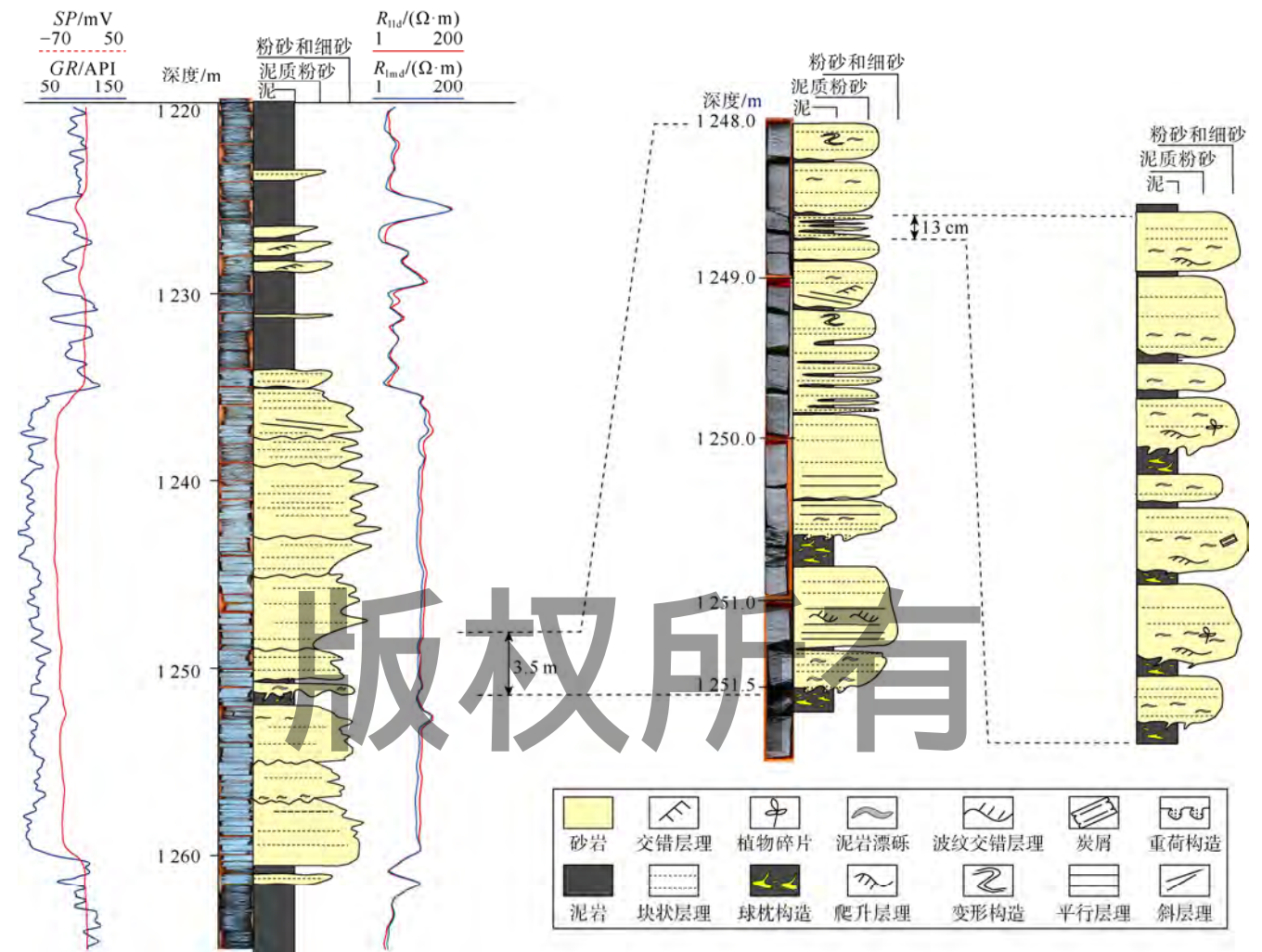
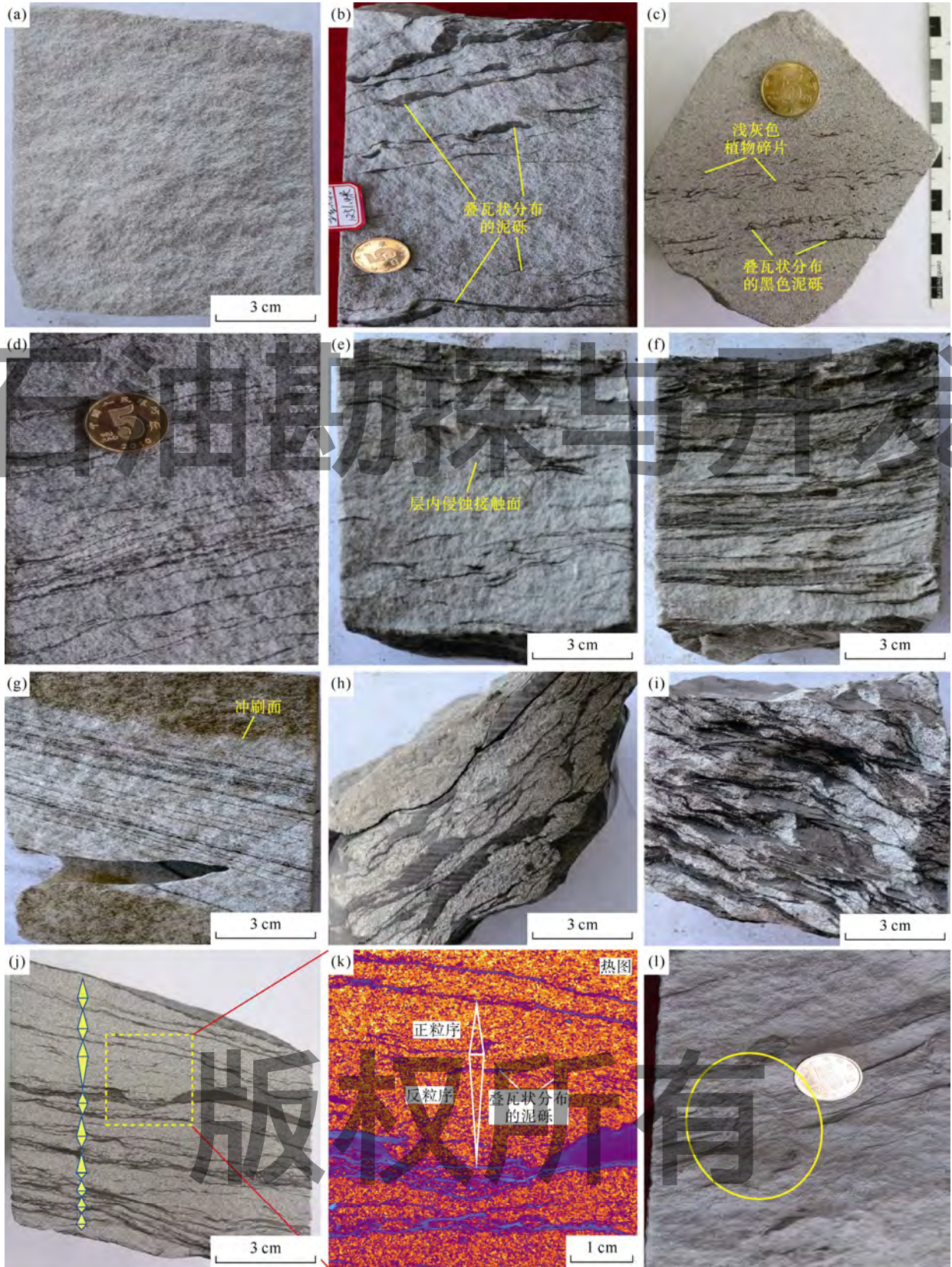


图6 松辽盆地 Ta-X 井嫩一段综合柱状图（井位置见图2b；SP—自然电位，mV；GR—自然伽马，API； R_{11d} —深侧向电阻率， $\Omega \cdot m$ ； R_{1md} —中感应电阻率， $\Omega \cdot m$ ）



(a) 1 253.10 m, 块状砂岩;(b) 1 251.40 m, 块状砂岩中分布的泥砾;(c) 1 248.00 m, 块状砂岩中分布的泥砾和植物碎片;(d) 1 251.30 m, 平行和波纹交错层理;(e) 1 227.00 m, 爬升层理, 可见层内侵蚀接触面;(f) 1 227.73 m, 交错层理和斜层理;(g) 1 236.13 m, 冲刷面下的平行层理;(h) 1 250.50 m, 砂岩底部的球枕构造;(i) 1 251.50 m, 砂岩底部的球枕和滑塌变形构造;(j) 1 248.50 m, 正反旋回叠置的异重岩;(k) 1 248.55 m, 旋回转换处发育大量叠瓦状展布的泥砾, 砂岩底部发育火焰状构造;(l) 1 228.00 m, 逃逸构造, 周围发育爬升层理及黑色泥砾

图 7 松辽盆地 Ta-X 井嫩一段异重岩沉积构造特征

3.3.3 生物成因构造

生物逃逸迹是最主要的生物成因构造,一般位于异重岩的中下部,表现为一种细长的垂直潜穴,逃逸构造内部的层理向上弯曲发生变形,代表了异重流以及底载沉积物到达时,动物为逃避被掩埋而向上逃逸形成的沉积构造(见图71)。

3.3.4 侵蚀构造

洪水型异重流存在流量增强和衰减2个阶段,当流速增强并超过侵蚀临界速度时开始对早期沉积物进行侵蚀;当后期流速降低时再次以沉积作用为主。因此晚期沉积物和早期侵蚀残余沉积物之间发育层内侵蚀接触面^[7]。侵蚀接触面的发育程度与洪水能量强弱有着密切的联系,洪水能量较弱时侵蚀作用微弱或不发生侵蚀作用;洪水能量较强时可形成明显的侵蚀接触面(见图7e—7f)。

4 成因机制分析和沉积模式

深水水道—海(湖)底扇系统广泛分布在古代深水地质体、现代湖泊及现代深海沉积体系中^[41-45],尤其是近20年来发现了大量的深水曲流或弯曲水道^[41-42],深水水道—扇体系统的成因、流体类型、形成过程成为深水研究的热点话题。目前多数学者认为深水水道主要为浊流成因^[41-43],但由于深水水道难以直接观察,其形成机制和流体性质依旧存在很大争议^[44-47],还存在异重流^[5,11]和砂质碎屑流^[48]等多种成因解释方案。

冯志强等^[34,49]通过高分辨率三维地震资料分析,在研究区东侧的大庆长垣地区嫩一段中也发现了水道—湖底扇系统,但解释为浊流成因。笔者以为,该套系统从沉积序列、沉积搬运方式和有机质碎片等方面分析,解释为异重流成因更为合理。

4.1 异重流成因的主要证据

4.1.1 沉积序列

异重岩沉积序列截然不同于经典浊积岩的鲍马序列,二者的搬运机制和沉积动力学均不同。Mulder等^[9]最早提出异重岩沉积序列具有以下特征:①异重岩由洪水增强期的逆粒序(Ha)和衰减期的正粒序(Hb)组成;②Ha段和Hb段的沉积厚度从几厘米到几米不等;③Ha段依次发育爬升波纹层理、交错层理、平行层理,而Hb段与经典浊流垂向序列相似;Ha段和Hb段的转换处通常发育突变接触面或者侵蚀接触面。Zavala等^[6,50]依据异重流时空演化特征,提出了更为完善的异重岩沉积序列、沉积构型及空间组合样式:①在靠近河口位置,异重流在发生和增强阶段主要以侵

蚀和沉积路过作用为主,导致河口区只有在异重流衰减时才接受沉积,沉积物主要为底载搬运沉积,因此形成了多套正粒序叠置的厚层砂岩,主要有块状基质支撑砾岩、碎屑支撑砾岩和各种流水成因的砂砾岩;②在远离物源区的位置,底床载荷部分逐渐减少,异重岩主要以悬浮载荷沉积为主,并具有较为完整的异重岩沉积序列。

Ta-X井位于水道轴部(见图2b),处于顺直水道和弯曲水道的转换处,沉积记录反映该井具有异重岩的典型特征。该井整体砂地比可达80%~95%,但单砂层厚度薄(从几厘米到几米不等),砂体之间发育大量的薄层泥岩夹层。测井曲线和取心资料反映出单层砂岩都具有正、反旋回成对出现的现象(见图6)。最为典型的异重岩分布在1248.5m附近(见图6、图7j—图7l),厚度仅13cm的一段岩心便发育9层泥岩夹层和8套砂岩,每套砂岩厚1~3cm,每套砂岩均有逆粒序-正粒序层构成的完整异重岩序列。通过局部放大和利用热图成像(见图7k),单套砂岩内部的逆粒序-正粒序层更加清楚,同时正、反旋回的转换处发育大量叠瓦状展布的泥砾,均为异重流最强时底载搬运所形成。

4.1.2 底载搬运

尽管异重岩与浊积岩均以悬载搬运为主,但异重流由于受洪水持续性补给并且能够持续数天或数周,因此高能量的异重流经常发育大量的底床载荷,高密度的底床载荷不仅可侵蚀早期地层,同时也可长距离运移并形成大量牵引流成因的沉积构造。

Ta-X井发育大量由底载搬运形成的沉积物及其相关沉积构造。大量叠瓦状排列的泥砾是底载搬运的直接证据,这些泥砾直径最大可达5cm,一般出现在正、反旋回的转换处,说明泥砾主要是在异重流及底载搬运最强时形成。粒度资料上除反映近直线段的浊流特征外,有些样点的跳跃总体还存在两段式或多段式,说明水道中仍有牵引流性质的流体存在(见图5a)。

4.1.3 陆源有机质

由于异重岩是陆上洪水河流携带的沉积物在汇水盆地深水区直接卸载而形成,因此异重岩中经常含有陆源成因的有机质^[6,9],包括炭质碎屑和植物碎片等。与此相反,由滑塌触发形成的经典浊积岩和砂质碎屑流一般不发育大量的陆源有机质碎屑。Ta-X井中的炭质碎屑和植物碎片的分布呈现2种状态:①直径较大的炭质碎屑和植物碎片(最大长度可达1cm)呈层状

分布(见图7c),通常位于逆粒序-正粒序的转换处,常与叠瓦状排列的泥砾岩相伴生,系异重流最强时底载搬运所致;②炭质碎屑和植物碎片呈杂乱状分布于块状砂岩中(见图8),黑色的植物碎片数量极大、且分布没有显著的定向性,粒径一般30~200 μm,系高浓度悬浮搬运载荷快速沉积所致。

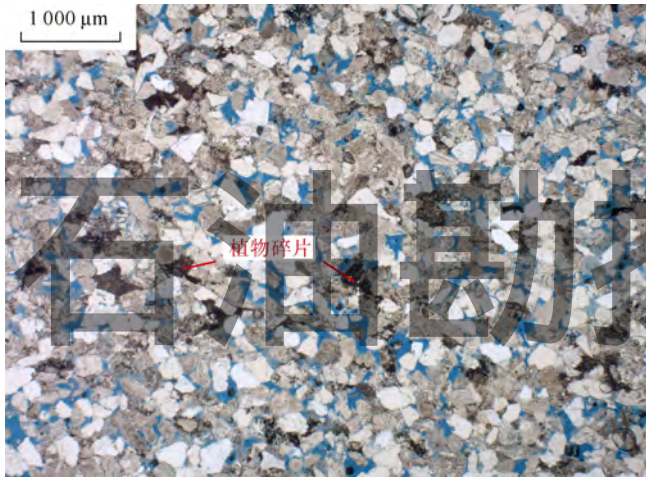


图8 Ta-X井块状砂岩中的植物碎片(1251.3 m,铸体薄片)

综上所述,洪水成因的异重岩与经典浊积岩在触发机制、搬运机制、沉积构型和是否含陆源有机质等方面均存在显著差异。Zavala等^[50]认为经典浊积岩由盆内滑塌等因素触发,因此称之为盆内浊积岩;而异重岩由外部洪水触发,因此将异重岩又称为盆外成因的浊积岩。Mulder等^[5]基于异重岩沉积序列和搬运机制的再研究,认为异重流是完全有别于浊流的一种全新深水地质营力。

4.2 沉积模式

图9概括了异重流成因水道—湖底扇系统的沉积模

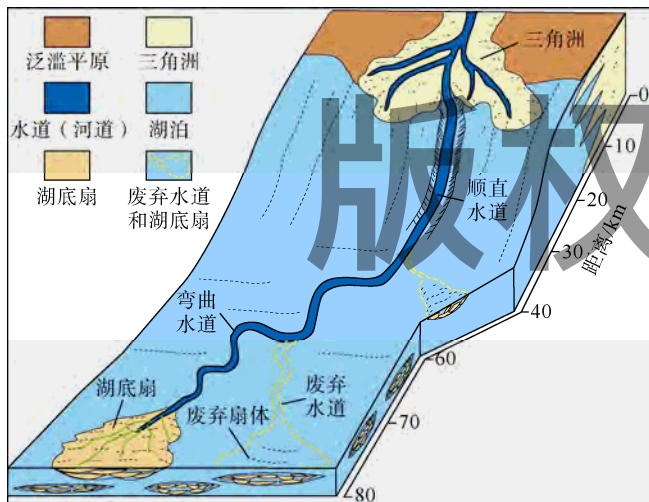


图9 嫩一段异重流成因的水道—湖底扇沉积模式

式。季节性的河流洪水形成异重流后直接入湖,异重流首先沿着坡折带沟谷体系形成了顺直水道沉积。随着湖盆地形变缓^[49],顺直水道逐渐演化为弯曲水道沉积,这些弯曲水道改道或者分叉极为频繁,因此在湖盆中心区形成了大量的弯曲水道沉积体系。最终这些水下水道均终止于湖底扇系统。水下弯曲水道与正常陆上曲流河沉积特征具有显著差异,水下弯曲水道不具有陆上曲流河典型的“二元”结构,大部分砂岩单砂层厚度薄(从几厘米到几米不等),具有逆粒序-正粒序层构成的完整异重岩序列,主要为悬浮搬运、快速沉降形成的块状层理。

5 结论

松辽盆地齐家—古龙地区嫩一段发现异重流成因的水道—湖底扇系统。湖底水道总体由北向南延伸,延伸直线距离超过80 km。水道可分为顺直水道和弯曲水道。弯曲水道改道频繁,水道末端发育湖底扇,最大面积可达20 km²。该系统主要以细粒沉积为主,单砂层厚度从几厘米到几米不等,单砂体沉积序列表现为向上变粗和向上变细的旋回成对出现,为典型异重岩的沉积序列。除大规模发育悬浮载荷成因的块状层理外,还发育少量爬升层理、平行层理、交错层理和侵蚀构造等典型的流水成因构造,同时富含有机质和陆源植物碎屑。粒度资料揭示该系统具底床载荷和悬浮载荷兼有的形成机制。异重流通过盆地连续的源-渠-汇系统可以形成大规模的深水储集层。

参考文献:

- [1] MOSCARDELLI L, WOOD L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research, 2010, 20(1): 73-98.
- [2] SHIPP R C, WEIMER P, POSAMENTIER H W. Mass-transport deposits in deepwater settings[M]. Tulsa: SEPM, 2011: 1-4.
- [3] SHANMUGAM G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(5): 471-491.
- [4] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths[J]. Earth Science Reviews, 2002, 58(3): 311-341.
- [5] MULDER T, CHAPRON E. Flood deposits in continental and marine environments: Character and significance[M]//SLATT R M, ZAVALA C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system. Tulsa: AAPG, 2011: 1-30.
- [6] ZAVALA C, ARCURI M, GAMERO H, et al. A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits[M]//SLATT R M, ZAVALA C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system. Tulsa: AAPG, 2011: 31-51.
- [7] 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.
- [8] BATES C C. Rational theory of delta formation[J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [9] MULDER T, SYVITSKI J P. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1995, 103(3): 285-299.
- [10] SLATT R M, ZAVALA C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system[M]. Tulsa: AAPG, 2011.
- [11] KATZ T, GINAT H, EYAL G, et al. Desert flash floods form hyperpycnal flows in the coral-rich Gulf of Aqaba, Red Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 417: 87-98.
- [12] AOKI S I, KATO S, OKABE T. Observation of flood-driven sediment transport and deposition off a river mouth[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116(1): 1050-1056.
- [13] BUATOIS L A, SACCAVINO L L, ZAVALA C. Ichnology signatures of hyperpycnal flow deposits in Cretaceous river-dominated deltas, Austral Basin, Southern Argentina[M]//SLATT R M, ZAVALA C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system. Tulsa: AAPG, 2011: 153-170.
- [14] CARMONA N B, PONCE J J. Ichnology and sedimentology of miocene hyperpycnites of the Austral Foreland Basin (Tierra del Fuego, Argentina): Trace fossil distribution and paleoecological implications[M]//SLATT R M, ZAVALA C. Sediment transfer from shelf to deep water: Revisiting the delivery system. Tulsa: AAPG, 2011: 171-192.
- [15] GARCÍA-GARCÍA F, CORBÍ H, SORIA J M, et al. Architecture analysis of a river flood-dominated delta during an overall sea-level rise (early Pliocene, SE Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 237(1): 102-113.
- [16] GIRARD F, GHIENNE J F, RUBINO J L. Occurrence of hyperpycnal flows and hybrid event beds related to glacial outburst events in a late Ordovician Proglacial Delta (Murzuq Basin, SW Libya)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(9): 688-708.
- [17] LAMB M P, MOHRIG D. Do hyperpycnal-flow deposits record river-flood dynamics?[J]. *Geology*, 2009, 37(12): 1067-1070.
- [18] OLARIU C, STEEL R J, PETTER A L. Delta-front hyperpycnal bed geometry and implications for reservoir modeling: Cretaceous Panther Tongue delta, Book Cliffs, Utah[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(6): 819-845.
- [19] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. 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.
- [20] 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.
- [21] 赵文智, 王兆云, 王东良, 等. 分散液态烃的成藏地位与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(4): 401-413.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Dongliang, et al. Contribution and significance of dispersed liquid hydrocarbons to reservoir formation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 401-413.
- [22] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 13-25.
- ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 13-25.
- [23] 潘树新, 刘化清, 肖文华, 等. 陆相湖盆水下滑坡体及其石油地质意义[C]//2015年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集. 北京: 中国地质学会, 2015: 30.
- PAN Shuxin, LIU Huaqing, XIAO Wenhua, et al. Sublacustrine landslides and implications for hydrocarbon exploration[C]//Abstracts of sedimentological and unconventional resources papers of China sedimentological congress in 2015. Beijing: Geological Society of China, 2015: 30.
- [24] 潘树新, 郑荣才, 卫平生, 等. 陆相湖盆块体搬运体的沉积特征、识别标志与形成机制[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(2): 53-61.
- PAN Shuxin, ZHENG Rongcai, WEI Pingsheng, et al. Deposition characteristics, recognition mark and form mechanism of mass transport deposits in terrestrial lake Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(2): 53-61.
- [25] PAN S X, WEI P S, WANG T Q, et al. Mass-transport deposits of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Terrestrial Basin, Northeast China: Depositional characteristics, recognition criteria and external geometry[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(1): 62-77.
- [26] 李祥辉, 王成善, 金玮, 等. 深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 77-86.
- LI Xianghui, WANG Chengshan, JIN Wei, et al. A review on deep-sea sedimentation theory: Significances to oil-gas exploration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 77-86.
- [27] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in Terrestrial Lacustrine Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075.
- [28] 李相博, 陈启林, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地延长组3种沉积物重力流及其含油气性[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(3): 16-21.
- LI Xiangbo, CHEN Qilin, LIU Huaqing, et al. Three types of sediment gravity flows and their petroliferous features of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(3): 16-21.
- [29] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 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.
- YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic lacustrine Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 10-20.
- [30] 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.

- YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Sediment dynamics process and sedimentary characteristics of hyperpycnal flows[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 23-33.
- [31] 潘树新, 陈彬滔, 刘化清, 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.
- [32] YANG W L, LI Y K, GAO R Q. Formation and evolution of nonmarine petroleum in Songliao Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(7): 1112-1122.
- [33] 方大钧, 张兆华, 王兆樑, 等. 松辽地块白垩纪古地磁与古构造[J]. *科学通报*, 1988, 33(3): 211.
- FANG Dajun, ZHANG Zhaohua, WANG Zhaoliang, et al. Paleomagnetic and paleo-structures in the Cretaceous Songliao Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(3): 211.
- [34] 冯志强, 张顺, 解习农, 等. 松辽盆地嫩江组大型陆相拗陷湖盆湖底水道的发现及其石油地质意义[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1226-1232.
- FENG Zhiqiang, ZHANG Shun, XIE Xinong, et al. Discovery of a large-scale lacustrine subaqueous channel in the Nenjiang Formation of the Songliao Basin and its implication on petroleum geology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(8): 1226-1232.
- [35] 潘树新, 郭维华, 马凤良, 等. 松辽盆地榆树水系泉头组—嫩江组沉积相特征及勘探潜力[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(1): 47-50.
- PAN Shuxin, GUO Weihua, MA Fengliang, et al. Characteristics of sedimentary facies and exploration potential of Quantou-Nenjiang Formation in Yushu System of Songliao Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(1): 47-50.
- [36] 潘树新, 卫平生, 王天琦, 等. 松辽盆地东部物源的发现及其石油地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6): 1021-1027.
- PAN Shuxin, WEI Pingsheng, WANG Tianqi, et al. Discovery of easter provenance in Songliao Basin and its implications on petroleum geology[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(6): 1021-1027.
- [37] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel pattern: Braided, meandering, and straight[J]. *Professional Geographer*, 1963, 9: 39-85.
- [38] CAMACHO H, BUSBY C J, KNELLER B. A new depositional model for the classical turbidite locality at San Clemente State Beach, California[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(9): 1543-1560.
- [39] 吕洪波, 章雨旭, 夏邦栋, 等. 南盘江盆地中三叠统复理石中的同沉积挤压构造: 一类新的沉积构造的归类、命名和构造意义探讨[J]. *地质论评*, 2003, 49(5): 449-456.
- LYU Hongbo, ZHANG Yuxu, XIA Bangdong, et al. Syn-sedimentary compression structures in the middle Triassic Flysch of the Nanpanjiang Basin, SW China[J]. *Geological Review*, 2003, 49(5): 449-456.
- [40] 李勇, 钟建华, 邵珠福, 等. 软沉积变形构造的分类和形成机制研究[J]. *地质论评*, 2012, 58(5): 829-838.
- LI Yong, ZHONG Jianhua, SHAO Zhufu, et al. An overview on the classification and genesis of soft-sediment deformation structure[J]. *Geological Review*, 2012, 58(5): 829-838.
- [41] KOLLA V, POSAMENTIER H W, WOOD L J. Deep-water and fluvial sinuous channels: Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6): 388-405.
- [42] WYNN R B, CRONIN B T, PEAKALL J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6): 341-387.
- [43] BABONNEAU N, SAVOYE B, CREMER M, et al. Sedimentary architecture in meanders of a submarine channel: Detailed study of the present Congo turbidite channel[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(10): 852-866.
- [44] DAMUTH J E, OLSON H C. Latest Quaternary sedimentation in the northern Gulf of Mexico Intraslope Basin Province: Sediment facies and depositional processes[J]. *Geosphere*, 2015, 11(6): 1689-1718.
- [45] GAMBERI F, ROVERE M, MARANI M P, et al. Modern submarine canyon feeder-system and deep-sea fan growth in a tectonically active margin (northern Sicily)[J]. *Geosphere*, 2015, 11(2): 307-319.
- [46] JANOCKO M, NEMEC W, HENRIKSEN S, et al. The diversity of deep-water sinuous channel belts and slope valley-fill complexes[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41(1): 7-34.
- [47] LABOURDETTE R, PONCET J, SEGUIN J, et al. Three-dimensional modelling of stacked turbidite channels in West Africa: Impact on dynamic reservoir simulations[J]. *Petroleum Geoscience*, 2006, 12(4): 335-345.
- [48] TALLING P J, WYNN R B, SCHMMIDT D N, et al. How did thin submarine debris flows carry boulder-sized intraclasts for remarkable distances across low gradients to the far reaches of the Mississippi fan?[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(10): 829-851.
- [49] ZHIQIANG F, SHUN Z, CROSS T A, et al. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China[J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 96-107.
- [50] ZAVALA C, ARCURI M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337: 36-54.

第一作者简介: 潘树新(1974-), 男, 甘肃临洮人, 博士, 中国石油勘探开发研究院西北分院高级工程师, 主要从事沉积学及油气勘探研究。地址: 甘肃省兰州市雁儿湾路535号, 中国石油勘探开发研究院西北分院, 邮政编码: 730020。E-mail: pansx@petrochina.com.cn

收稿日期: 2016-11-28 修回日期: 2017-10-13

(编辑 王晖)