

文章编号: 1000-0550(2003)01-0148-07

湖泊水下扇沉积特征及影响因素

——以伊通盆地莫里青断陷双阳组为例

刘招君

(吉林大学地球科学学院 长春 130061)

摘要 伊通盆地莫里青断陷始新统双阳组发育典型的湖泊水下扇体。根据岩心、测井和地震资料,并结合粒度分析等方法,将其划分为内扇、中扇和外扇亚相及某干微相。影响水下扇形成和分布的主要因素是:同生断裂的活动造就了陡坡地形,其幕式活动成为水下扇形成的触发机制;阵发型水下扇主要发育在陡坡带,稳定型水下扇主要发育在扇三角洲的前端,气候因素也为稳定型水下扇形成创造了物源条件;基准面升降影响着水下扇的相序特征,低水位体系域和水退体系域易形成推进型水下扇,水进体系域易形成退缩型水下扇;半深湖-深湖的滞水条件是水下扇得以保存的前提。统计结果表明本区获工业油气流的井主要集中在中扇,其中辫状水道微相最为富集。

关键词 莫里青断陷 湖泊水下扇 识别标志 影响因素

作者简介 刘招君 男 1951年生 教授 博士生导师 沉积学与石油地质学

中图分类号 p512.2 **文献标识码** A

1 前言

20世纪50年代浊积岩的发现和浊流理论的探讨使地质学家们成功地解释了深水环境中大套陆源碎屑沉积和复理石建造的成因。其后,通过对碎屑流、颗粒流、沉积物液体化流及浊流的研究,建立了沉积物重力流理论体系。由于这类重力流在水下常呈扇状分布,从而产生了水下扇(又称海底扇)(submarine fan)的概念。最早认识到水下扇是基于对现代扇的研究^[1]。古代扇的研究则始于1960年^[2]。Jacka等第一次提出了水下扇模式,从此对水下扇模式的研究空前高涨^[3]。其中以Walker的模式最为经典,他将水下扇分为内扇、中扇和外扇三个部分,并将水下扇的特征归结为“与水道联系在一起的深水粗碎屑岩相”^[4]。Bauma等将水下扇定义为“一个水道-(堤岸)-越岸体系(深水)”^[5]。Shanmugam等的定义是“由沉积物重力流形成的,通常位于大陆架以外的深海环境中的水道和沉积舌状体(或层状浊积岩)的复合体系”^[6]。显然,初期的水下扇概念主要指海相环境的水下扇,随着研究的深入,在湖泊环境中也发现了大量水下扇沉积。我国很多学者^[7,8,9]对湖泊水下扇做了大量研究工作。

最近,作者对伊通盆地莫里青断陷始新统双阳组展开了系统的沉积学研究工作,发现前人普遍认为的

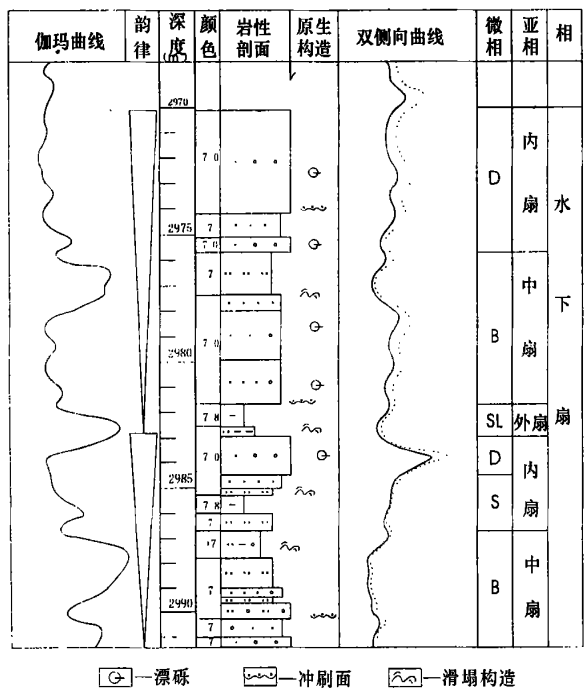
扇三角洲或辫状河三角洲相,实际上绝大多数为湖泊水下扇沉积。造成这一认识差异的主要原因是这两种沉积相有某些相似之处,它们一般形成在断陷盆地中,主要分布在受同沉积断裂控制的陡坡边缘一侧,呈扇状体分布,而且粒度较粗,多为叠合砂体。扇三角洲最早是由Holmes(1965)提出来的,他将其定义为从邻近高地进入稳定水体的冲积扇。Nemec(1988)在其主编的《扇三角洲》一书中将扇三角洲定义为由冲积扇为物源在水体中沉积的三角洲。他强调不将扇三角洲仅解释为是冲积扇直接进入水体形成的沉积体。因此,扇三角洲即有形成在浅水区的水下扇三角洲前缘和前扇三角洲沉积,又有形成在水上的扇三角洲平原沉积,并以牵引流沉积为特征。而湖泊水下扇完全处于较深水区,并以重力流沉积为特征。此外,它们在岩石学和地球物理资料等方面也有明显的区别。

伊通盆地属佳-伊地堑的南段,是郯庐断裂带的北延部分,为一长达300 km,宽仅有5~20 km的狭长盆地。该盆地可分为四个二级构造单元,其中莫里青断陷处于最南端。它西起东环屯,东到双榆树,北至靠山镇,南达伊通,面积约540 km²,是全盆地勘探程度较高的地区。现揭示地层主要为第三纪地层,自下而上发育下第三系的双阳组、奢岭组、永吉组、万昌组、齐家组和上第三系的岔路河组。其中双阳组见工业油气,它也

是本次研究的主要层位。

2 湖泊水下扇识别标志

通过详细的岩心观察,录井、测井和地震资料分析,显微镜研究和粒度分析,在研究区双阳组地层中发现了大量湖泊水下扇沉积体系,并可参考 Walker 的模式自物源区向盆地方向将其进一步分为内扇、中扇和外扇三个亚相。一个完整的推进型湖泊水下扇自下而上具有外扇→中扇→内扇亚相的垂向相序特征,呈向上变厚、变粗的反粒序序列,在电性上总体呈齿化漏斗状,或指状测井曲线特征(图 1, 2)。



D-主水道(泥石流); S-滑塌堆积; B-辫状水道; SL-叠复舌扇; T-典型浊积岩; 7-灰色; 7.0-深灰色; 7.8-灰黑色

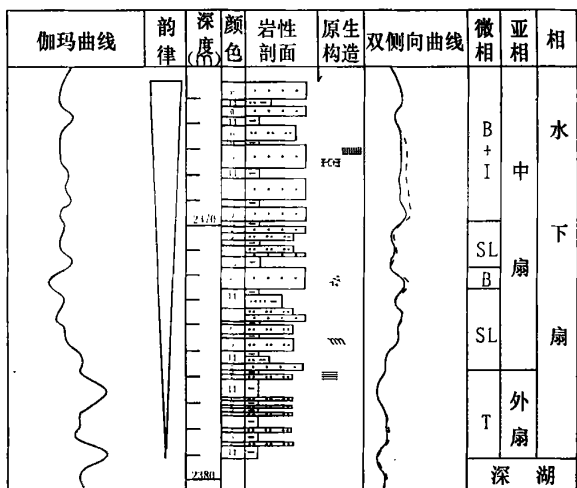
图 1 伊 42 井双阳组二段水下扇垂向相序与相标志

Fig. 1 Facies sequence and marks of Member 2 of Shuangyang Formation subaqueous fan in Well Yi 42

2.1 内扇亚相

内扇可进一步划分为主水道(又称补偿水道)、主水堤和滑塌堆积微相(图 1)。主水道实际上是一个欠补偿的下切谷,主要由基底支撑灰色砾岩、砂砾岩组成,具有分选性极差的混杂构造,常见大量巨砾漂(悬浮)在杂基中,底部常发育冲刷面,可称其为水下泥石流沉积。主水堤由漫出水道的低密度浊积岩组成,但容易被破坏,而不易保存。滑塌堆积也是内扇的重要组成部分,它常由灰色滑塌角砾岩或滑塌岩组成。角砾常为泥质,岩层呈现先前沉积岩层破碎或同生褶皱,即变形构造发育。滑塌堆积可出现在主水道外,也可发育在主

水道内。在电性和伽玛测井曲线上内扇多呈微齿化箱型。



槽模 平行层理 递变层理 波状层理 水平层理

B-辫状水道; I-水道间; SL-叠复舌扇; T-典型浊积岩; 0-白色; 14-深灰色

图 2 伊 45 井双阳组三段水下扇垂向相序与相标志

Fig. 2 Facies sequence and marks of Member 3 of Shuangyang Formation subaqueous fan in Well Yi 45

2.2 中扇亚相

中扇亚相由辫状水道、水道间和叠复扇舌微相组成(图 2)。辫状水道是中扇的主体,它由灰色、灰白色砂砾岩、砂岩组成,成分成熟度和结构成熟度中等或较低,其底部常见冲刷面和底面印模(如槽模),其内部常发育块状层理,有时见递变层理、平行层理或交错层理。多个辫状水道充填沉积构成叠复砂岩相,可将其解释为由鲍玛序列中多个 A 相组成,即 AAAA 相序。由于辫状水道没有堤,加之水道易发生侧向迁移,使水道间形成的细粒物质易被冲刷掉(Walker, 1979)。在本区水道间主要由辫状水道砂岩中的薄层泥岩夹层组成。叠复扇舌与辫状水道相比粒度偏细,岩层减薄,泥质夹层增多,可出现鲍玛序列的 ABCDE ABC AB 组合,具近源浊积岩特征。一般 A 段常见递变层理或块状层理, B 段常为平行层理, C 段为波状层理或变形层理, D 段为水平层理, E 段为块状层理。E 段实际上属正常深水湖的沉积,其块状层理与生物搅动作用有关。在典型浊积岩中常发育槽模及工具模等。中扇一般具有正旋回性,电性上常为指状、钟状或齿状箱形特征。

2.3 外扇亚相

外扇位于湖泊水下扇的最前缘,与正常深水湖泊相邻。它由中-薄层较细粒的典型浊积岩夹于深湖暗色泥岩组成,具鲍玛序列的 CDE 相序,有时也发育 B 相,属远源浊积岩,其特点表现为连续性较好的层状粉

砂岩, 偶见薄层细砂岩 C段常见波纹层理或变形层理, D段见水平层理, E段为块状层理或水平层理, 实为正常湖泊沉积 电性上为低幅齿化曲线。

2.4 粒度分布特征

在概率累积曲线图上, 水下扇中扇的粒度分布主要有两种类型: 三段式或二段式 (图 3) 从形态上看这一组成似乎与一般河流相和三角洲前缘亚相十分相似, 但实际上存在着本质性差异。一是水下扇各总体斜率低, 表明分选差; 二是基质 ($> 4. \phi$ 的颗粒) 含量高, 一般都 $> 15\%$, 反映了杂砂岩的一般特点; 三是悬浮总体含量高, 一般都 $> 30\%$, 有的甚至 $> 50\%$, 充分反映了浊流悬浮搬运方式, 悬浮总体又可细分为均匀悬浮搬运和递变悬浮搬运 在有些样品中 (如伊 42- 8) 还存在一定含量的跳跃或滚动总体 一般这一搬运方式主要发育在扇中辫状水道中, 反映了在这一环境中存在浊流向牵引流过渡的性质。这也是为什么在这类砂体中有时发育斜层理的原因所在 在 C- M 图上, 本区湖泊水下扇具有一般水下扇的粒度分布特征, 即点群平行 $C= M$ 线分布 (如伊 22 井), 反映出递变悬浮搬运的特征 在伊 45 井, 除具有平行 $C= M$ 线分布的递变悬浮搬运外, 还有一些点平行 C 值 (纵线) 分布 (图 4), 反映出中扇存在少量滚动 (或跳跃) 总体搬运的特征。这一特点与概率累积曲线图反映的特点一致

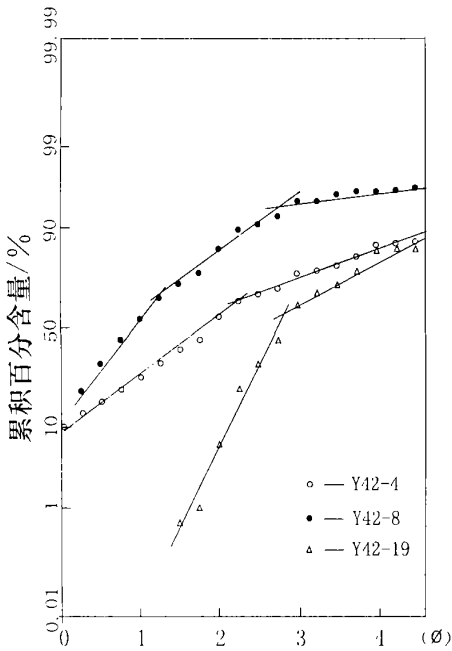


图 3 伊 42 井水下扇中扇概率累积曲线图

Fig. 3 Accumulative curve map of probability in the middle fan of subaqueous fan in Well Yi 42

2.5 地震相特征

地震相分析是划分沉积相的重要标志。通过岩芯

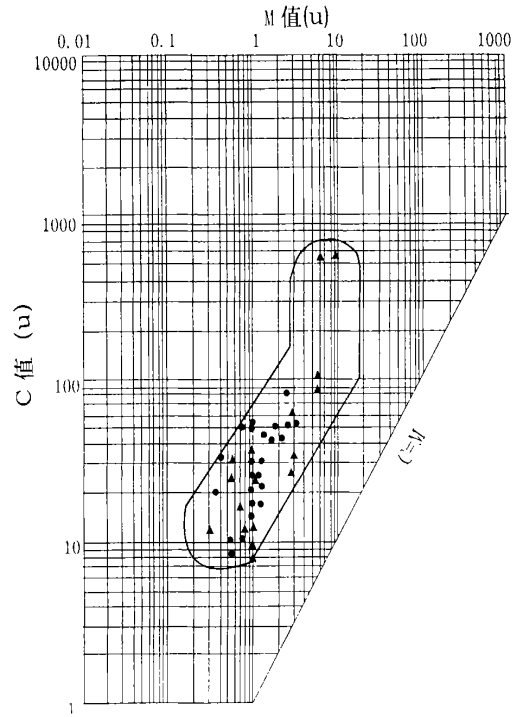


图 4 伊 45 井水下扇 C- M 图

Fig. 4 C- M map of subaqueous fan in Well Yi 45

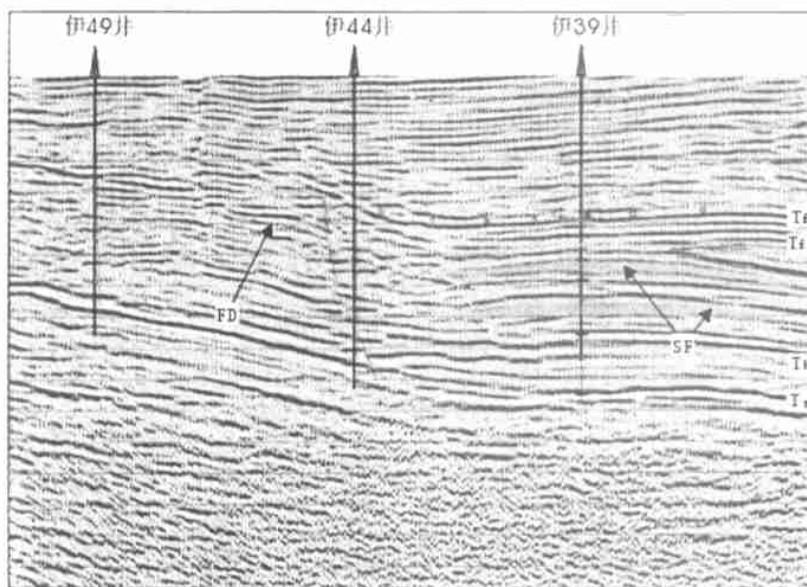
相 → 测井相 → 地震相的转换, 认为本区湖泊水下扇各亚相也存在一些地震相特征 内扇具有中振幅低连续杂乱反射特征, 反映了水下泥石流和下滑塌堆积的特征。中扇具有中振幅较连续乱岗状反射特征或弱振幅较连续亚平行反射特征, 前者为辫状水道, 后者多为叠复扇舌。外扇一般具有空白反射或弱振幅较连续平行反射特征 在顺重力流运动方向, 湖泊水下扇具有楔形结构, 而垂直方向表现为双向下超的丘形结构特征, 这一特征显然与扇三角洲的前积结构不同 (图 5)。

3 湖泊水下扇影响因素

一般认为触发机制 地形坡度和滞水环境为水下扇形成的基本条件。由于物源条件的限制, 湖泊中只能形成规模较小的湖泊水下扇 根据触发机制, 又可分为阵发型和稳定性, 前者由偶然因素 (如火山、地震、重力滑坡等) 诱发而成, 而后者则与较稳定的物源 - 河流, 尤其是洪水期河流密切相关^[7]。地形坡度是重力滑坡的前提, 滞水环境则是水下扇得以保存的必要条件。据此, 作者建立了半地堑断陷盆地沉积体系空间展布模式 (图 6), 以上条件取决于以下几种主要因素:

3.1 构造与地形因素

通常称伊通盆地为“伊通地堑”, 即认为该盆地两侧均发育同生控盆断裂 但根据莫里青断陷地震剖面分析, 发现只有西北缘断裂为同生控盆断裂 它具有梨式正断层性质, 并在一些地区识别出半花状构造, 表明



FD- 扇三角洲 (前积结构); SF- 湖泊水下扇 (丘型结构)
 图 5 Crossline 579地震剖面水下扇与扇三角洲地震反射特征

Fig. 5 Seismic reflection features of subaqueous fan and fan-delta in the crossline 579 seismic profile

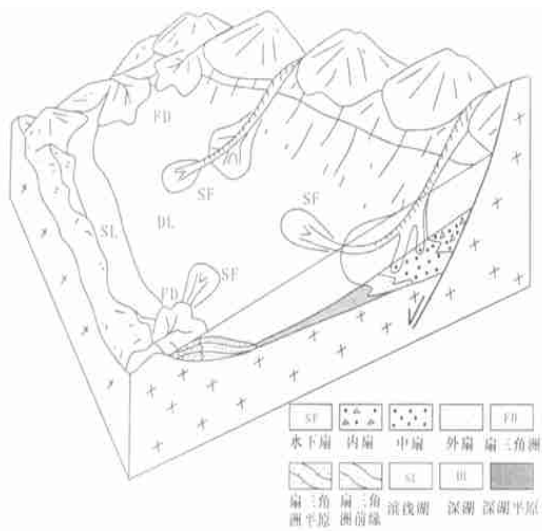


图 6 半地堑断陷湖盆沉积体系展布模式图
 Fig. 6 Distribution model of depositional system model in half graben lacustrine basin

该盆地为一具伸展-走滑性质的半地堑断陷盆地(图6)。受其影响,盆地西北缘厚度巨大,向东南缘其厚度逐渐减薄,造成以前“地堑”结论的原因可能是在东南缘——即缓坡带,局部发育一些与西北缘主控断裂倾向相反小型同生断层,但其规模小,延伸短。它们应属于极性断层,或称补偿断层,是主控断层派生产物^[10]。

构造发育史剖面分析表明,西北缘主控断裂在双阳组沉积时期具有长期活动的特点,其中在双二段时期活动强度最大。结果导致盆地西北边缘地形陡,坡

度大,为水下扇的形成创造了有利坡降条件(图7)。

3.2 触发机制与气候因素

根据本区水下扇的分布特点,也可分为两种类型:阵发型水下扇和稳定型水下扇。阵发型水下扇分布在西北缘,即主控断裂一侧。同生断裂的活动不仅造成大的地形高差,同时幕式活动诱发的地震成为水下重力流形成的触发机制,即动力来源。这也促进了物源区风化作用和剥蚀作用的加强,使西北缘老山成为水下扇的主要物源区。本区水下扇以点物源为特征,形成相互独立的扇体。当物源供给充足时,相邻扇体(尤其是外扇)相联,或叠置,在平面上呈扇裙分布(图7)。有些扇体进入盆地中心后顺盆地轴部向南转向,形成轴向水下扇(图6)。轴向水下扇指向盆地最深水区,这符合重力流流向趋向最低洼处的一般规律。阵发型水下扇具有粒度粗、砂体厚度大,一般分布在陡岸带等特点,是本区最主要的水下扇类型,它主要发育在双阳组二段、三段时期,双一段也有发育,但规模较小。

稳定水下扇主要形成在具有缓坡性质的东南缘,而且与扇三角密切共生,并主要分布在扇三角洲前端。这类水下扇具有规模小,粒度细,一般不发育内扇等特点。其形成显然与扇三角有关。扇三角洲砂体是此类水下扇的主要物源。从该缓岸水下扇主要形成在水进期的实际情况,认为这是一种与洪水作用有关的稳定型重力流,也可以说是一种气候事件的产物。稳定型水下扇主要发育在双一段的东南缘(缓坡带),

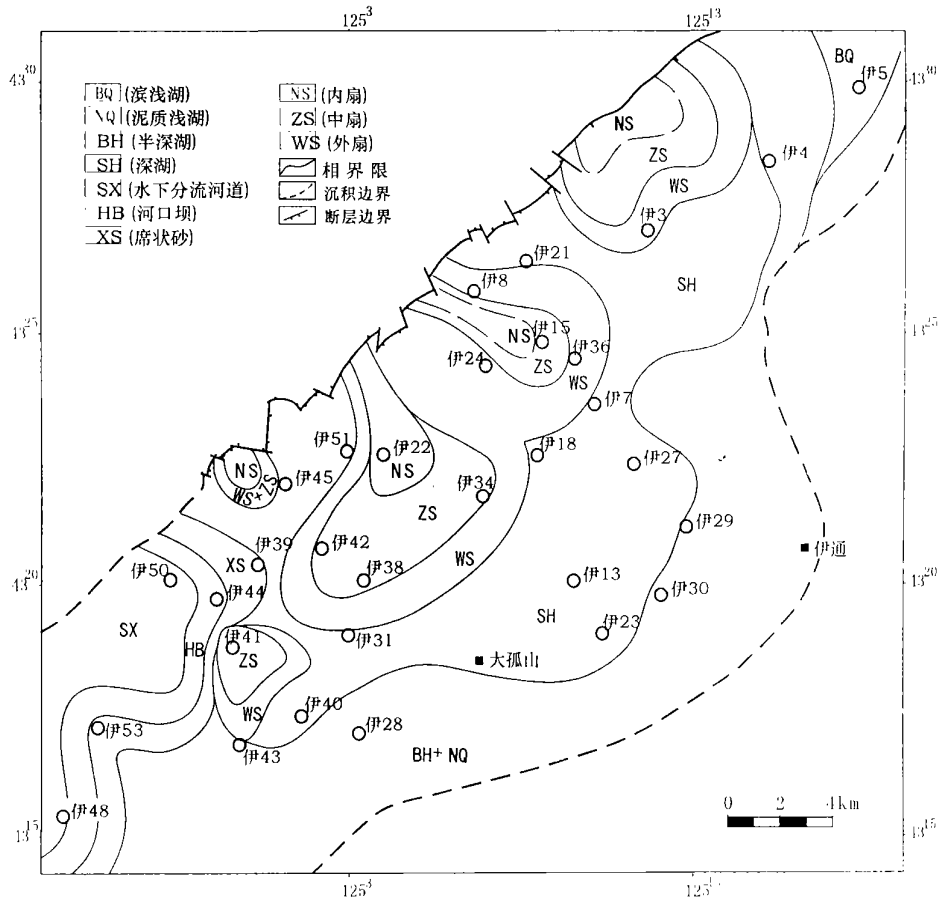


图 7 莫里青断陷双阳组二段 5 砂组沉积微相分布图

Fig. 7 Sedimentary microfacies distribution of the 5th sandstone set of Member 2 of Shuangyang Formation in Moliqing fault subsidence

但在双二段伊 41 井区 (陡坡带) 也有发育 (图 7)

3.3 基准面变化因素

在经典层序地层学理论中,水下扇仅形成在低水位体系域中,即低水位盆底扇和斜坡扇^[11]。后来又发现世界上约 80% 的岩性油气藏都集中于此,从而掀起了寻找低水位体系域热。然而这一来自于海相被动大陆边缘的模式并不完全适用于陆相湖盆。因为湖泊水下扇不仅发育在低水位体系域中,在水进体系域、水退体系域均有发育^[12]。而形成各体系域的最终因素则是基准面。

基准面是一个相对于地球表面波状起伏的、连续的、总体上略向盆地方向倾的抽象曲面,其位置、运动方向及升降幅度不断随时间而变化 (Cross, 1994)。基准面变化是构造沉降速率与沉积物供给速率共同作用的结果。受其影响形成两种水下扇序列类型:推进型和退缩型。当基准面下降时,形成推进型水下扇。推进型具有向上粒度变粗、砂层厚度变厚的序列特征,自下而上由外扇→中扇→内扇亚相组合而成,是本区最常见

的类型。它主要出现在低水位体系域和水退体系域中 (如伊 38 井双二段 5 砂组和伊 40 井双二段 2 砂组)。该类型反映了水下扇体不断向盆地深水区推进的过程。显然,沉积物供给速率大于构造沉降速率是形成该序列的主要原因。当基准面上升时,形成退缩型水下扇。退缩型具有向上粒度变细、砂层厚度变薄的相序类型,自下而上一般由外扇→中扇→内扇亚相组合而成,它一般形成在水进体系域中 (如伊 41 井双二段 4 砂组合)。当构造沉降速率大于沉积物供给速率 (一般发生在伸展断裂活动期),使基准面整体抬升,产生水进,使物源区不断退缩,形成上述序列特征。

3.4 水深与滞水环境因素

从本区水下扇的分布特征看,它们主要分布在深湖和半深湖环境中 (图 6、7)。深水区是盆地最低洼带,是水下重力流运动的指向区。更重要的是深湖区一般具有滞水条件,使水下扇得以保存。即使浅水区有形成水下重力流的可能,但也不利于保存,因后期的波浪改造作用使其被破坏。

以上仅从单因素讨论了水下扇的特征与成因机制。但实际情况往往是多因素综合作用的结果。比如即使在基准面(或湖平面)上升的前提下,如果有充足的物源和较强的水下重力流能量,也可产生推进型水下扇,甚至于切过前期扇体,向前推进,在更远地区形成新的扇体(图 6)。

3.5 湖泊水下扇与油气分布

经典层序地层学的观点认为大部分油气产于低水位体系域的碎屑岩中^[13],而且主要集中在以水下重力流为特征的盆底扇和斜坡扇中。南非 Bredasdorp 盆地实践表明,低水位体系域中的盆底扇(尤其是水道充填)是重要的油气储集层,勘探成功率达到 30%。在预测的该区地 112~109.5 Ma 时期的盆底扇层位,9 口钻井中有 7 口钻遇盆底扇,有 5 口井获得商业性成功。本区的研究结果表明,水下扇不仅仅发育在低水位体系域中,水进体系域和水退体系域均有发育,这就为在湖泊环境中寻找水下扇类岩性油气藏提供了比海相环境更广宽的层位。莫里青地区统计结果表明,在内扇、中扇、外扇均有油气显示,获工业油气流的主要集中在中扇,其中以中扇辫状水道最为富集(如伊 40 井双二段 4 砂组)。辫状水道特有的物性特征和上下共生的深湖泥岩创造了最佳生储盖组合配置,形成透镜状岩性油气藏。

4 结论

伊通盆地莫里青断陷始新统双阳组发育典型的湖泊水下扇体,可进一步划分为内扇、中扇和外扇亚相和若干微相,它们在岩心、测井、地震资料和粒度分布等方面都有明显的特征。根据触发机制可划分为阵发型水下扇和稳定型水下扇。阵发型水下扇受偶然因素影响,主要分布在受同生断裂控制的陡坡带,稳定型水下扇与较稳定的物源有关,主要发育在扇三角洲的前端。研究结果认为,构造作用、古地形、触发机制、气候条件、基准面变化和滞水环境是影响和控制水下扇形成和分布的主要影响因素。

参考文献 (References)

- Gorsline D S, Emery K O. Turbidity current deposits in San Pedro and Santa Monica basins of southern California [J]. *Geol Soc America Bull*, 1959, 70: 279~290
- Sullwold H H, Jr. Tarzana fan—deep submarine fan of late Miocene age, Los Angeles County, California [J]. *AAPG Bull*, 1960, 44:

433~457

- Jacka A D, *et al.* Permian deep-sea fans of the Delaware mountain group (Guadalupian), Delaware basin [J]. *Soc Econ Paleontol Mineral Permian, Basin Section Publ*, 1968, 68-1: 49~90
- Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps [J]. *AAPG Bull*, 1978, 62: 932~966
- Bauma A H, Normark W R, Barnes N E. Submarine fans and related turbidite systems [M]. New York: Springer-Verlag, 1985. 351
- Shanmugam G, Moiola R G. Submarine fans: characteristics, models, classification, and reservoir potential [J]. *Earth Sciences Review*, 1988, 24: 383~428
- 刘招君,王东坡,何起祥. 攀西地区上三叠统湖泊浊积岩沉积特征及其地质意义 [A]. 见: 张云湘主编. 中国攀西裂谷文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1985. 298~306 [Liu Zhaojun, Wang Dongpo, He Qixiang. Sedimentary Character and Geological Significance of Upper Triassic Lake Facies Turbidite in Panxi Area [A]. In: Zhang Yunxiang, ed. Contribution to Panxi Rift China [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1985. 198~306]
- 吴崇筠,李纯菊,等. 断陷盆地中的浊积岩 [A]. 见: 中国石油学会石油地质委员会主编. 碎屑岩沉积相研究 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1988. 1~17 [Wu Chongyun, Li Chunju, *et al.* Turbidite in faulted subsidence-lake basin [A]. In: Petroleum Geology Institute of Chinese Petroleum Society, ed. Study of Clastic Sedimentary Facies [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988. 1~17]
- 丘东洲,何治亮. 陆盆扇体沉积的形成机制及其油气意义 [A]. 见: 中国石油学会石油地质委员会主编. 碎屑岩沉积相研究 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1988. 148~154 [Qiu Dongzhou, He Zhiliang. Oil and Gas Reservoir in Continental Basin [A]. In: Petroleum Geology Institute of Chinese Petroleum Society, ed. Study of Clastic Sedimentary Facies [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988. 148~154]
- Allen P A and Allen J R. Basin analysis: principles and applications. Blackwell Scientific Publications [C]. Oxford, London, 1990
- Posamentier H W and Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II—Sequence and systems tract models [A]. In: Wilgus C K, *et al.*, eds. Sea-level changes: an integrated approach [C]. SEPM Special Publication, 1988, 42: 125~154
- 刘招君,董清水,王嗣敏,等. 陆相层序地层学导论与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 [Liu Zhaojun, Dong Qingshui, Wang Siming, *et al.* Introduction to Continental Sequence Stratigraphy & Application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002]
- Van Wagoner J C, *et al.* Siliciclastic sequence stratigraphy, in well logs, cores and outcrops: concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies [M]. Published by the American Association of Petroleum Geologists. Oklahoma, USA, 1990

lacus Subaqueous Fan Sedimentary Characteristics and Influence Factors

—— A Case Study of Shuangyang Formation in Moliqing Fault Subsidence of Yitong Basin

LIU Zhao-jun

(College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061)

Abstract It is typically developed lacus subaqueous fan of Shuangyang Formation in Moliqing fault subsidence of Yitong Basin in Eocene. According to core, well-logging and seismic data, associated with grading analysis and other methods, lacus subaqueous fan is divided into inner fan, middle fan and out fan. From bottom to top a integrated prograding lacus subaqueous fan is consisted of out fan, middle fan and inner fan subfacies in vertical, and it has the features that show thicker, coarser towards up. Inner fan can be further separated into channel, channel levee and slump deposits, middle fan is classified into braided channel, braided interchannel and suprafan lobes, and out fan is consisted of classic turbidites and lacustrine mudstone. Subaqueous fan is mainly formed at the side of steep slope controlled by contemporary fault, and some formed at the front of fan- delta. Primary factors which influence the distribution and emergence of subaqueous fan is that movements of contemporary fault bring steep landform, episode movements of which make up of the burst mechanics of subaqueous gravity flow forming. Subaqueous fan of steep slope mainly occurs at the zone of steep slope, stable subaqueous fan mostly emerges at the front of fan- delta, meanwhile climate is a favorable factor for stable subaqueous fan. Base-level affects the features of facies orders. It is easily formed prograding subaqueous fan in lowstand systems tracts and regressive systems tracts, there develop regressive subaqueous fan in the transgressive systems tracts as well. The precondition that preserves subaqueous fan is the backwater environment of deeper or deep lacus. The results of statistics show that all that bear industrial petroleum and gas mostly concentrated in the middle fan, and of which is much rich in the braided channel.

Key words Moliqing fault subsidence, lacus subaqueous fan, recognition mark, influencing factors