

文章编号: 1000-0550(2011)06-1115-07

利用上超点法重建渤海湾盆地辽中凹陷 渐新世湖平面变化^①

吴伟¹ 林畅松² 刘景彦² 赖维成³ 李全² 吕家康¹

(1. 河南理工大学 河南焦作 454003; 2. 中国地质大学 北京 100083; 3. 中国海洋石油有限责任公司天津分公司 天津 300452)

摘要 标准层序是指同时包含高位体系域 HST、湖侵体系域 TST、下降体系域 FSST 和低位体系域 LST 的三级层序。通过对标准三级层序各类体系域中上超特征的分析,将一个标准层序的上超点分为 5 大类,即 LST 上超点、TST 上超点、早期 HST 上超点、晚期 HST 上超点和 FSST 上超点,提出了通过统计层序内各类上超点来反演湖平面变化史的方法。利用这种方法,结合渤海湾盆地辽中凹陷渐新统地层剖面特征,在划分三级层序的基础上,统计上超点并绘制岸线迁移和湖平面升降幅度曲线,并将渐新世划分为 4 个湖平面升降旋回,对比钻遇沉积物的纵向变化特征,认为湖平面变化曲线可信度很高,同时也证实了上超点方法反演湖平面变化在陆相古湖泊学研究中的可行性。

关键词 上超点 湖平面变化 渐新世 辽中凹陷

第一作者简介 吴伟 男 1979 年出生 博士 讲师 含油气盆地分析 E-mail: wei@hpu.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 前言

海平面变化分析是海相层序地层动力学研究的重要内容之一,也是陆相层序地层学者效仿的主要方法。早在层序地层学发展的第二阶段——地震地层学阶段,Vail 和 Mitchum 等先行者均以海平面升降作为沉积旋回和层序划分的核心依据^[1~3],Vail 等人首次以地震剖面中的滨岸上超点概念绘制了相对海平面变化曲线,并引发上世纪 80 年代国外学者对海平面变化研究的热潮^[4~8],其中的杰出人物 Haq 将滨岸上超点的方法进行全面推广,并绘制了 250 Ma 至今全球海平面变化历史图表^[9]。另外,Haq 经过 20 多年的努力,将海平面升降历史扩展到 550 Ma^[10]。陆相湖盆与海相盆地在盆地规模、盆地动力学背景、影响因素等方面存在很大的差异,而且陆相湖盆常因内部断裂系统复杂造成地震资料品质较差且上超点难于识别,但是尽管如此,仍有不少学者进行了尝试。贾爱林、Bartov 等学者对湖盆露头剖面进行分析,并利用上超点的概念重建了不同湖盆的湖平面变化历史,从理论上支撑了地震剖面上超点反演湖平面变化的可行性^[11,12]。王跃等在对上超点方法及接触关系类型(上超、下超、顶超、削截、退覆等)分析的基础上,开发 Motif 软件开发平台,利用该软件对地震剖面

上超点进行分析,并制作了相对湖平面变化曲线^[13]。然而,这项研究中没有注重地震剖面的筛选,从而降低了成果的精度;同时没有对上超点进行分类,将滨岸上超和盆内上超混为一谈,造成研究成果可信性降低。鉴于陆相湖平面变化研究存在诸多难点且没有比较完美的研究成果^[14],笔者拟在精选高精度地震剖面的基础上,对上超点进行识别,尝试使用滨岸上超点方法分析渤海湾盆地辽中凹陷渐新世的湖平面变化特征,分析这种方法是否适用于古湖泊研究,进而为辽东湾地区价格昂贵的近海隐蔽油气藏勘探提供帮助。

1 方法——上超点重建湖平面变化

对地震剖面地层结构的详细解剖是进行湖平面变化分析的基础。首先,一个标准的三级层序中包含低位体系域(LST)、湖侵体系域(TST)、高位体系域(HST)和下降体系域(FSST)四个体系域,尽管不是所有的三级层序均有所有的体系域类型。相对于继承性沉积剖面的湖平面正弦变化的作用,会产生可容空间供沉积物充填,不同的湖平面变化趋势会产生不同沉积叠加序列的充填响应(图 1):(1) LST 底部,湖平面位于旋回的最低位置时,易形成盆底叠加的低位扇沉积,这种沉积充填类型对于划分层序界面有用,

^①国家自然科学基金项目(批准号:41102059)与河南理工大学博士基金(编号:B2011-073)联合支助。
收稿日期:2010-11-20;收修稿日期:2011-03-14

但对湖平面变化的反演不起作用; (2) LST 顶部, 湖平面缓慢上升, 但是由于沉积物供给量超过湖平面上升产生的可容空间, 湖盆坡折以下继承性沉积断面之上形成进积 (progradation) 和加积 (aggradation) 并存的充填模式, 坡折之上可以识别连续上超的地震反射终端响应特征, 这些都是湖平面上升的指示; (3) TST 体系域中, 湖平面快速上升, 产生的可容空间远远超过沉积物的供给量, 湖岸越过坡折带且快速后退, 形成退积 (retrogradation) 的沉积充填叠加模式, 同时可以在湖盆边缘识别连续上超的地震反射终端响应特征, 这些上超点是岸线后退及湖平面上升的证据; (4) HST 体系域内部, 湖平面上升速率明显下降, 物源供给速率由弱增强, 初期物源供给速率小于可容空间的建造速率时沉积充填模式以加积为主, 坡折以下有明显的进积现象, 此时湖盆边缘上超点仍然可以辨别并推测湖平面变化, 而晚期物源供给速率明显增加并大大超过可容空间的建造速率, 沉积充填叠加序列以明显的顶超和前积为特征, 此时岸线继续向湖盆推进但湖平面基本没有变化; (5) FSST 体系域内, 湖平面出现明显的下降导致沉积物可容空间减小, 同时物源供给速率仍然较大, 形成呈退覆特征的进积沉积叠加序列, 上超点呈向盆地方向推进且纵向上不断降低的特征, 是湖平面下降的标志。

根据地震剖面地震反射终端特征识别层序界面和体系域界面是分辨不同类型上超点的基础。本次研究将上超点分为 5 种类型 (图 1 不同颜色点表示): LST 上超点、TST 上超点、早期 HST 上超点、晚期 HST 上超点和 FSST 上超点。LST 上超点在坡折带以下, 上超过程向岸方向迁移慢, 而向上迁移速度较快; TST 上超点向岸和向上迁移的速度均比较快; 早期 HST 上超点仍向岸和向上迁移, 但是沉积前端响应转变为向湖盆方向的进积; 晚期 HST 上超点迁移方向开始转变, 转为向湖盆方向迁移且速度很快, 而纵向上高度基本没有变化; FSST 上超点继续向岸方向迁移且速度有所减缓, 纵向上转变为向下迁移。识别不同类型上超点之后, 需要记录关于上超点的沉积时间、距岸线某一基准点的横向距离、距某一基准点的纵向距离三个要素。沉积时间的确定需要各种定年手段来实现, 而内部连续时间可以根据湖盆中心泥岩段厚度的百分比来确定。

2 实例—辽中凹陷渐新世湖平面变化

辽东湾拗陷位于渤海湾盆地的东北部, 东西分别为胶辽隆起和燕山隆起, 南部与渤中拗陷相邻, 北部与辽河断陷接壤, 呈北东向条带状展布。辽东湾拗陷东西向呈三凹夹两凸的构造格局 (图 2) 辽中凹陷位

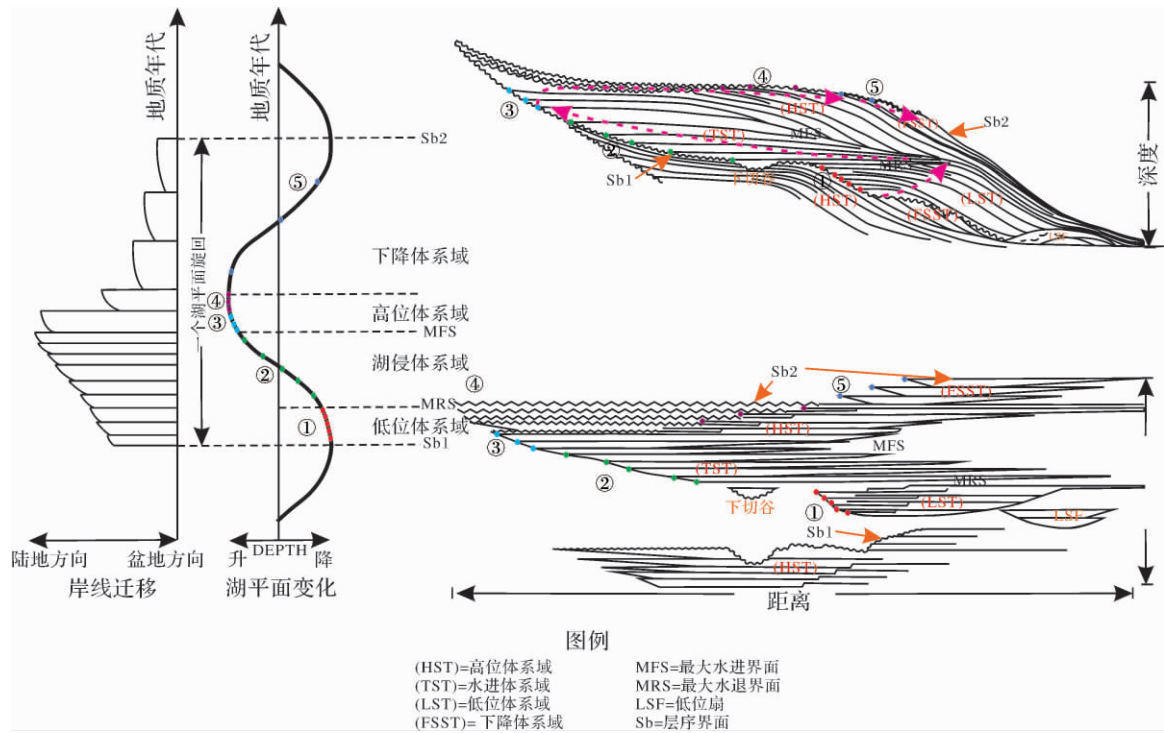


图 1 上超点方法重建湖平面变化示意图

Fig. 1 Outline map of lake level reconstruction by onlap points

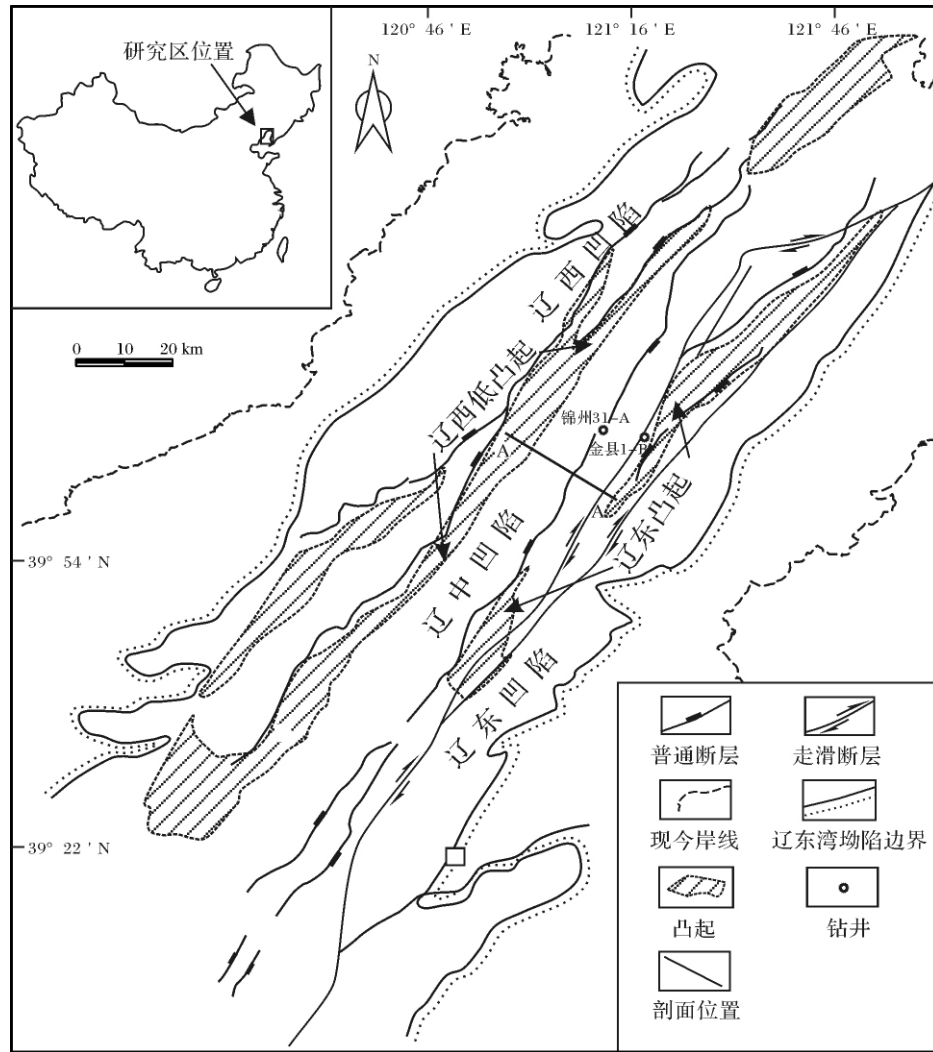


图 2 研究区位置图

Fig. 2 Location map of the Study area

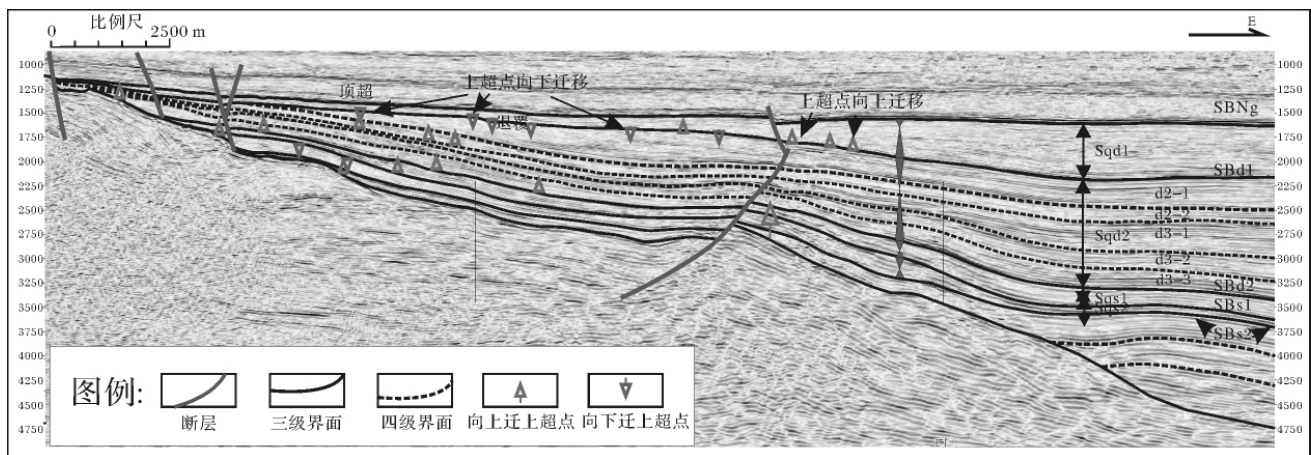


图 3 辽中凹陷渐新统上超点识别分析剖面

Fig. 3 Seismic profile showing onlap points of the Oligocene in Liaozhong depression

于其中部,是面积最大的次级构造单元,具有东断西超特征的不对称箕状特征。辽中凹陷 3D 地震资料品质较好,覆盖面积大,适宜作为上超法研究的研究区。

2.1 地震层序的划分

为适应油田勘探生产的需要,有关辽中凹陷层序地层研究将渐新统划分为 5 个三级层序,分别与地层单元中的沙二段、沙一段、东三段、东二段、东一段大致对应^[14,15]。本文在对地震反射终端响应细致分析的基础上,根据滨岸上超的变化情况,将辽中凹陷渐新统划分为 4 个三级层序(SQd1、SQd2、SQs1、SQs2)(图 3)。三级层序对应的 6 个层序界面分别为 SBNg、SBd1、SBd2、SBs1、SBs2,均具有区域性不整合或局部侵蚀不整合的特征。界面 SBNg 为一全区不整合界面,在地震剖面上对应标志反射层 T2,表现为多轨强振幅高连续反射轴,界面之下常见高角度削截现象,界面之上局部可见河道下切冲刷现象。界面 SBd1 为一局部不整合及其对应的整合面,在地震剖面对应标志反射层 T3u,表现为大型三角洲—辫状河三角洲的顶超面,且顶超倾末端常见上超现象。界面 SBd2 为一区域性不整合,大致对应地质分层东营组地层的底部,地震剖面上相当于标志反射层 T3,界面之上具有普遍上超的特征,在局部地区为一低位三角洲的下超面。界面 SBs1 对应 T4 反射标志层,在地震剖面上表现为高连续强振幅反射,局部可以看到上超现象。界面 SBs2 是渐新统地层的底部,对应标志反射层 T5,其下部有明显的削蚀特征,上部有连续上超现象。

2.2 湖平面变化曲线的绘制

在三级层序内识别层序界面上部的上超点向上迁移(LST 上超点、TST 上超点、早期 HST 上超点)和界面下部的上超点向下迁移(晚期 HST 上超点、FSST 上超点),记录各类上超点的三个要素,包括对应的沉积时间、横向相对距离和纵向深度。关键界面点的沉积时间由渤海石油研究院研究提供,而其内插点的沉积时间根据盆地内部对应等时点与关键界面间泥岩厚度占上下关键界面间泥岩总厚度的百分比来确定。横向相对距离是相对于横向某一基准点的位移,记录中以地震剖面道号与道间距的乘积进行记录。纵向深度以双程时间与邻近钻井的 VSP 时深数据转换得到。

制作湖平面变化曲线过程中选取盆底第一个上超点(渐新统的初始上超)为基准点,以沉积时间为

纵轴,分别以横向相对距离和纵向深度为横轴绘制两条曲线(图 4),一条曲线反映了岸线随时间的迁移情况,另一条曲线则反映了湖平面升降幅度。

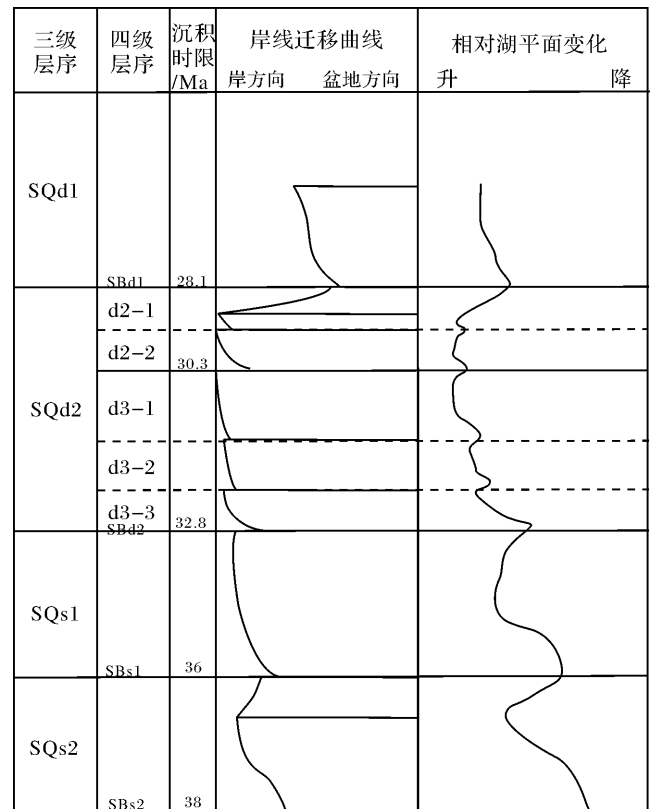


图 4 辽中凹陷古近纪渐新世湖平面变化

Fig. 4 Lake level changes of the Oligocene in Liaozhong depression

2.3 相对湖平面变化分析

辽中凹陷在渐新世存在四个比较明显的湖平面升降旋回: 38 ~ 36 Ma 是第一个升降旋回,湖平面经过长时间的反复上升在中晚期达到最高水位,同时岸线后撤较多,湖盆扩大,后期在较短的时间内湖平面大幅回落,而岸线向前小规模推进; 36 ~ 32.8 Ma 是第二个湖平面升降旋回,早期湖平面在低位震荡徘徊,中期湖平面迅速大幅上升达到一个很高的位置,同时岸线大幅后退,晚期湖平面小幅震荡回落,而岸线向前推进很小; 32.8 ~ 28.1 Ma 是第三个湖平面升降旋回,也是沉积时间最长且沉积记录最丰富的,早期湖平面突然上升到一个台阶之后转为反复震荡上升并达到渐新世最高水位和最大湖盆范围,到 30.3 Ma 左右湖平面持续下降,岸线向前快速推进,反映了物源供给充足; 28.1 ~ 25 Ma 是第四个湖平面升降旋回,由于地层中顶部沉积大部分被剥蚀,地层记录的

湖平面只有一个缓慢上升的过程。

在对地震剖面滨岸上超点分析的基础上, 将湖平面变化曲线与辽中凹陷湖盆中心某钻孔实测数据、沉积环境研究结果进行对比分析, 可以得到湖平面变化趋势与钻遇的沉积相迁移密切相关(图 5)。

第一个湖平面升降旋回(38~36 Ma)在钻孔中对应了 SQs2 层序中的辫状河三角洲前缘沉积, 但是前缘的推进情况与湖平面升降密切相关: 低位期沉积物以砂体为主, 颗粒粒径较大, 以前缘亚相中河口坝等微相砂体为主; 湖侵期沉积物泥质含量明显增高, 砂体减少且主要为远砂坝、席状砂等微相砂体; 高位期及湖平面下降期对应的沉积物砂体明显增多、灰质成分有所增加, 颗粒变粗, 以河口坝等砂体为主。

SQs2 层序中沉积物从下向上的转变过程, 反映了沉积环境中沉积物进积—退积—加积—进积的过程, 反映沉积物供给变化不大情况下湖泊水位从低位—水进—高位—水退的整体变化特征, 与从地震上超点得出的相对湖平面变化规律一致。

第二个湖平面升降旋回(36~32.8 Ma)在钻孔中对应了 SQs1 层序的中滨浅湖沉积。沉积物从下向上的转变特征表现为滩坝为主—滨浅湖泥为主—滩坝、滨浅湖泥互层; 且沉积物中灰质含量比较高, 灰质含量变化表现为高一低—高, 沉积物的微相变化和灰质含量变化均表现了湖泊水位从低位—水进—高位或水退的变化特征, 与地震上超点得出的相对湖平面变化规律一致。

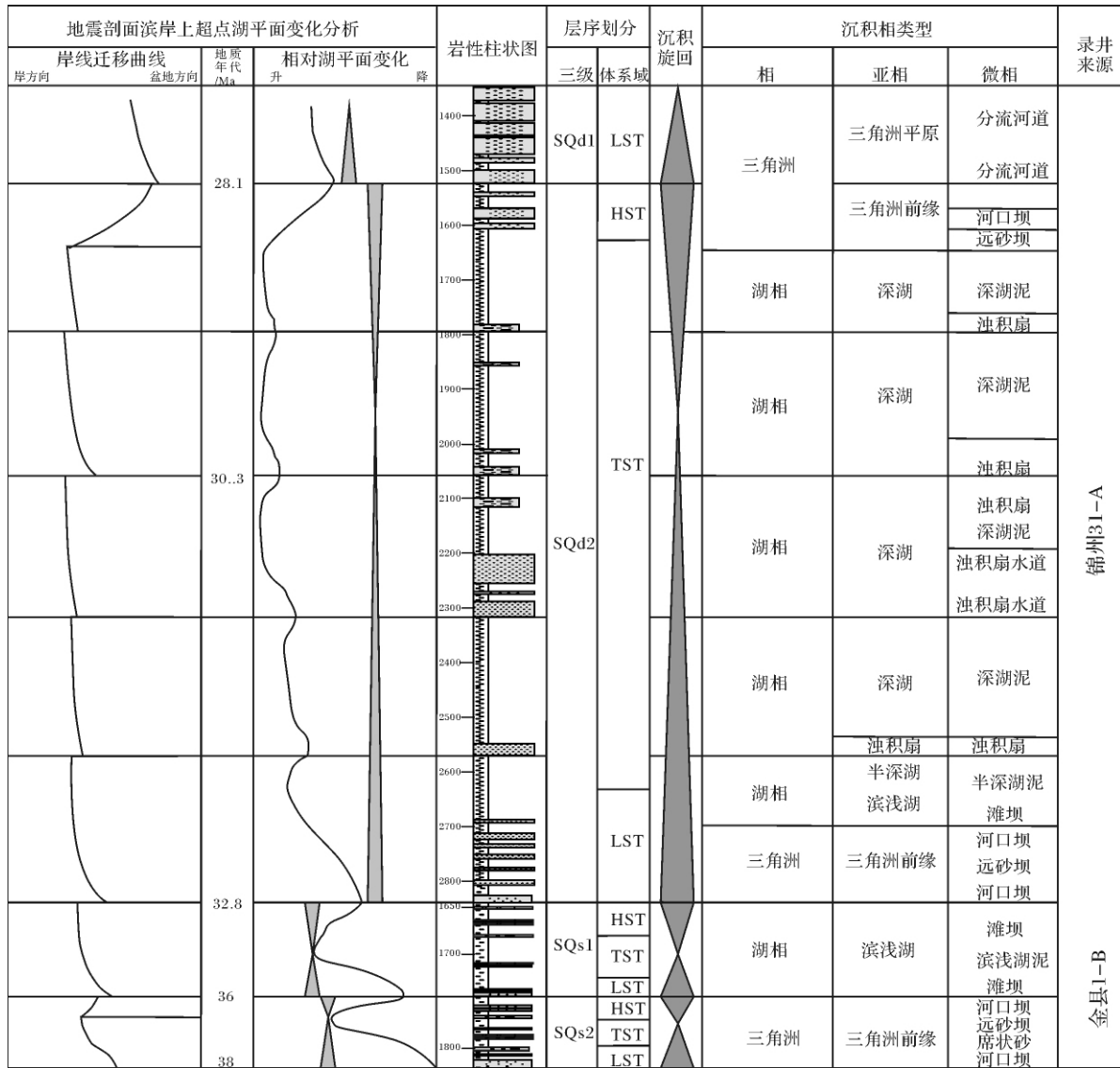


图 5 湖平面变化与沉积相变化对比柱状图

Fig. 5 Comparison histogram of lake level change and sedimentary facies

第三个湖平面升降旋回(32.8~28.1 Ma)在钻孔中对应了三级层序SQd2的沉积。沉积物底部表现为一套低位发育的大型三角洲沉积,前缘砂体含量很高,而且这套低位三角洲在 seismic 剖面上的前积、盆底下超现象特别明显;沉积物中部以深湖—半深湖泥岩为主,泥岩中常夹厚度不等砂体,主要为浊积扇沉积;沉积物顶部为另一套三角洲前缘沉积,砂体以远沙坝、河口坝微相为主。沉积物的纵向变化代表了沉积物的进积—退积—加积—进积特征,与相对湖平面变化曲线的总体特征低位—水进—高位、下降基本一致。另外,沉积物中的浊积扇沉积与湖平面变化中的次级波动对应很好,整个湖平面升降旋回中次级下降—低位期分别对应一套规模不等的浊积扇沉积,进一步反映了湖平面变化曲线的可信度较高。

第四个湖平面升降旋回(28.1~25 Ma)在曲线上表现为湖平面整体上处于低水平状态,在钻孔中对应的SQd1层序沉积物也主要为三角洲平原的河道沉积和三角洲前缘的水下分流河道沉积为主,三角洲沉积物向湖盆推进也从侧面反映了湖平面整体低的特征。

综上所述,通过对比重建的湖平面变化曲线和钻井钻遇沉积物的纵向变化,认为曲线真实地反映了辽中凹陷渐新世的湖平面变化特征,同时证明利用滨岸上超点反演湖平面变化的方法在陆相湖盆研究中是可行的。

3 结论

陆相盆地中,在 seismic 数据精度较高的情况下,利用 seismic 剖面上超点迁移方法重建相对湖平面变化是行之有效的方法,探讨和实例研究得出以下结论:

(1) 上超点类型分为5种,即LST上超点、TST上超点、早期HST上超点、晚期HST上超点和FSST上超点,通过记录这些上超点上下迁移情况,可以绘制出湖盆岸线和湖平面升降幅度历史;

(2) 通过对渤海湾盆地辽中凹陷渐新统地层上超点统计,绘制了渐新世相对湖平面变化曲线,并将湖平面变化分为4个升降旋回,这些旋回与钻遇沉积物纵向变化特征一致,可信度较高。同时4个湖平面升降旋回分别对应了渐新统4个三级层序,与前人层序划分方案不同。

对相对湖平面变化分析过程中也发现了一些问题的存在:剥蚀作用造成滨岸上超点缺失,构造运动和压实作用严重改造上超点信息,造成湖平面变化幅

度过大、高频湖平面变化难以体现等问题。因此在进一步研究中应充分考虑剥蚀上超点恢复、构造沉降和下部地层的去压实作用。

参考文献(References)

- 1 Sloss L L, Krumbein W C, Dapples E C. Integrated facies analysis [C] // Longwell C R. ed. Sedimentary Facies in Geologic History. Memoir. Geological Society of America, 1949, 39: 91-124
- 2 Vail P R, Mitchum R M Jr, Thompson S. III, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4, Global cycles of relative changes of sea level [C] // Payton C E. ed. Seismic stratigraphy; applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 83-97
- 3 Mitchum R M Jr, Vail P R., Thompson S. III, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2, The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis [C] // Payton C E. ed. Seismic stratigraphy; applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 53-62
- 4 Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II—Sequence and systems tract models [C] // Wilgus C K, et al., eds. Sea-level changes: An integrated approach: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1988, 42: 47-69
- 5 Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: Concepts, examples, and exploration significance [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 1687-1709
- 6 Embry A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin [J]. Canadian Arctic Archipelago: Canadian Journal of Earth Sciences, 1993, 30: 301-320
- 7 Plint A G, Nummedal D. The falling stage systems tract: Recognition and importance in sequence stratigraphic analysis [C] // Hunt D, Gawthorpe R L, eds. Sedimentary response to forced regression. Geological Society of London Special Publication, 2000, 172: 1-17
- 8 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya JP, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92: 1-33
- 9 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present) [J]. Science, 1987, 235: 1156-1166
- 10 Bilal U Haq, Stephen R Schutter. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. Science, 2009, 322: 64-68
- 11 Yuval Bartov, Yehouda Enzel, Maomi Porat, et al. Evolution of the Late Pleistocene-Holocene dead sea basin from sequence stratigraphy of fan deltas and lake-level reconstruction [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77: 680-692
- 12 贾爱林, 何东博, 郭建林, 等. 扇三角洲露头层序演化特征及其对砂岩储集层的控制作用 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊): 103-105 [Jia Ailin, He Dongbo, Guo Jianlin, et al. Sequence evolution of fan-delta outcrops and its controlling on the sandstone reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(suppl.): 103-105]
- 13 王跃, 戴春秋, 杨红霞, 等. 年代地层和海(湖)平面相对升降变

- 化的映射联动解释分析[J]. 石油物探, 2000, 39(3): 92-99 [Wang Yue, Dai Chunqiu, Yang Hongxia, *et al.* Linkage interpretation between chronostratigraphy and relative change of sea (lake) level[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2000, 39(3): 92-99]
- 14 吴伟, 林畅松, 董伟, 等. 辽中凹陷古近系东营组高精度层序地层及沉积体系分析[J]. 地质科技情报, 2011, 31(1): 63-70 [Wu Wei, Lin Changsong, Dong Wei, *et al.* High-resolution sequence stratigraphy and depositional system analysis of Dongying Group, Paleogene, in Liaozhong Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 31(1): 63-70]
- 15 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊): 1-10 [Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Yang Junsheng, *et al.* Paleogene sequence stratigraphic framework and distribution of depositional systems in Liaodong Bay[J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2008, 38(Suppl.): 1-10]

Reconstruction of Oligocene Lake Level Change through Onlap Points: A case from Liaozhong Depression, Bohai Bay Basin

WU Wei¹ LIN Chang-song² LIU Jing-yan² LAI Wei-cheng³ LI Quan² LÜ Jia-kang¹

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083;

3. Tianjin Branch of CNOOC. Tianjin 300452)

Abstract Standard sequence involve HST, TST, FSST and LST. Through analyzing the features of onlap points in the systems of standard third-order sequences, the onlap points of a standard sequence can be divided into five kinds, which are onlap points of LST, onlap points of TST, onlap points of early HST, onlap points of late HST and onlap points of FSST; and bring forward the way of inverting lake level change history by counting onlap points in the sequence. Use this method, which can be used in conjunction with the features of stratigraphic section in Liaozhong depression, the Bohai Bay Basin; on the basis of dividing third-order sequences, count the onlap points and plot a coastal process curve and a lake level eustasy extent curve, and divide Oligocene into four lake level eustasy cycle, then, through contrasting the vertical variation of drilling sediment, we find that the lake level is highly confident curve, it also proves that the way of inverting lake level change by counting onlap points is practicable in the study of continental paleolimnology.

Key words onlap points; lake level change; Oligocene; Liaozhong Depression