

断陷盆地缓坡带物源转换与沉积响应 ——以渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系源-汇系统为例

陈贺贺^{1,2}, 朱筱敏³, 施瑞生⁴, 张自力⁵, 李琪⁶, 朱珍君¹, 阎泽昊¹

[1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)海洋与极地研究中心, 北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中海油田服务股份有限公司 油田生产事业部, 天津 300459; 5. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 6. 中国石油华北油田分公司采油一厂地质所, 河北 任丘 062552]

摘要:寻求盆外物源通量变化与盆内沉积体系的定量耦合响应仍然是源-汇系统研究的薄弱环节,也是断陷湖盆源-汇系统研究框架下的一个重要命题。基于渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡全覆盖的3D地震资料和岩心、测井数据,结合碎屑锆石U-Pb定年技术,对研究区古近系沙(沙河街组)二段与沙一段开展物源体系定量化表征,并通过定量沉积构造解释和定量地震地貌测量,建立了浅水三角洲的定量化表征方法。研究显示,沙一段-沙二段沉积时期,古永定河分支被古大清河袭夺,造成蠡县斜坡A区特征锆石含量由37%下降至26%,对应的A区浅水三角洲面积由144 km²减小至38 km²,平均水下分流河道宽度由104 m减小至47 m;古唐河水系特征锆石含量由31%上升至39%,对应的B区浅水三角洲面积由71 km²增加至94 km²,平均水下分流河道宽度由77 m增加至88 m;古大沙河体系沉积物通量未观察到明显变化,对应的C区浅水三角洲面积由206 km²降低至185 km²,平均水下分流河道宽度由120 m减小至81 m。构造作用、气候变化及湖平面升降等异旋回作用影响范围较大,将会造成沉积体系的同步响应;而物源通量变化将影响特定沉积体系,是研究区浅水三角洲沉积响应的主要驱动机制。

关键词:地震地貌学;沉积构造;碎屑锆石定年;源-汇系统;浅水三角洲;蠡县斜坡;饶阳凹陷;渤海湾盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Provenance transformation and sedimentary response of ramp facies in downfaulted basins: A case study on the Paleogene source-to-sink system in Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

CHEN Hehe^{1,2}, ZHU Xiaomin³, SHI Ruisheng⁴, ZHANG Zili⁵, LI Qi⁶, ZHU Zhenjun¹, YAN Zehao¹

[1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Ocean and Polar Research Center, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Oilfield Production Division of China Oilfield Services Ltd. (COSL), Tianjin 300459, China; 5. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 6. Geological Institute of No. 3 Oil Production Plant, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China]

Abstract: The quantified coupled response of intra-basin sedimentary system to extra-basin sediment flux variation is still a weak link in source-to-sink system research, and also an important topic in the framework of source-to-sink system research in downfaulted basins. Based on the 3D seismic and log data, as well as core observation of the Lixian slope in the Raoyang Sag, combined with detrital zircon U-Pb dating, the study carries out quantitative characterization of the provenance system during the deposition of the second and first members of the Paleogene Shahejie Formation (that is, Sha 2 and Sha 1 members), and establishes a quantitative characterization method for shallow-water delta by means of quantitative sedimentary structure interpretation and quantitative seismic geomorphic measurements. The results show that the sediment flux of the paleo-Yongding River branch was seized by the paleo-

收稿日期:2022-12-23;修订日期:2023-02-03。

第一作者简介:陈贺贺(1989—),男,讲师,构造-沉积学和源-汇系统。E-mail:hehechen@cugb.edu.cn。

基金项目:中央高校基本科研业务专项(2-9-2021-006);高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B20011);国家科技重大专项(2017ZX05001-002-02)。

Daqing River, resulting in the sediment flux decrease from 37 % to 26 % in zone A of Lixian slope during the sedimentation of Sha 1 to Sha 2 members, the corresponding area of the delta in zone A declining from 144 km² to 38 km² and a reduction of the average subaqueous distributary channel width from 104 m to 47 m. While the sediment flux of the paleo-Tang River increased from 31 % to 39 %, corresponding to an increase in the area of delta in zone B from 71 km² to 94 km² and an increase in the average subaqueous distributary channel width from 77 m to 88 m. No significant changes are observed in the sediment flux of the paleo-Dasha River, and the corresponding area of the delta in zone C decreased from 206 km² to 185 km², and the average subaqueous distributary channel width decreased from 120 m to 81 m. Allogenic forces such as tectonic evolution, climate change, and lake-level fluctuation tend to generate larger scope of influence, causing the synchronous response of sedimentary systems. In contrast, changes in sediment flux will affect specific sedimentary systems and are the primary driving mechanism for the sedimentary response of shallow-water deltas in the study area.

Key words: seismic geomorphology, sedimentary structure, detrital zircon dating, source-to-sink system, shallow-water delta, Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:陈贺贺,朱筱敏,施瑞生,等.断陷盆地缓坡带物源转换与沉积响应——以渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系源-汇系统为例[J].石油与天然气地质,2023,44(3):689-706. DOI:10.11743/ogg20230313.

CHEN Hehe, ZHU Xiaomin, SHI Ruisheng, et al. Provenance transformation and sedimentary response of ramp facies in downfaulted basins: A case study on the Paleogene source-to-sink system in Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 689-706. DOI:10.11743/ogg20230313.

据统计,断陷盆地沉积体系相关的油气产量占据了已探明巨型油气田产量的1/3,油气当量约 5×10^8 bbl,广泛分布于世界各地^[1-2]。与世界范围内大部分地区以海相盆地油气勘探为主不同,中国是陆相盆地产油大国,其断陷盆地油气勘探多集中于浅部陆相断陷湖盆^[3-6]。

断陷湖盆缓坡带沉积体系常具有分布范围广、平面连续性好的特征,但由于缓坡带沉积体系通常厚度较薄、沉积物粒度相对较细,且粒径分异不明显,导致缓坡带油气勘探面临巨大的挑战^[7-11]。此外,缓坡带的沉积碎屑主要来源于盆外水系,其沉积物搬运的通道多为先前河流体系^[7-8]。不同于盆内物源体系供源强度多受控于构造活动速率,盆外物源体系受构造活动速率的控制程度相对较低,断陷演化不同阶段缓坡带沉积体系的源-汇系统各要素差异并不大,其中,缓坡带汇水盆地内水系的变化是造成缓坡带沉积体系演化的重要异旋回作用^[8]。然而,如何关联盆外物源通量变化与沉积充填响应仍然是断陷湖盆源-汇系统研究的薄弱环节。

基于源-汇系统理论的框架和科学内涵,通过对比物源区基岩年龄与陆架、深海盆地等沉积区地层记录中碎屑锆石的年龄,可示踪沉积碎屑的物源区并揭示沉积物路径演化关键事件^[12-17]。陆相盆地普遍具有较高的钻井及取心覆盖率,能够为陆相湖盆的研究提供坚实而丰富的研究基础。然而,现今对岩心资料

的应用,普遍局限于描述性沉积学研究,即通过岩心观察描述,确定沉积相类型及其分布范围,却较少涉及沉积学量化研究。国内外学者对野外露头开展了众多量化研究,基于露头小尺度沉积构造三维几何参数的特征,对其所在的沉积要素整体几何参数特征进行恢复,且此方法已逐步应用于岩心资料,极大地推进了深-时沉积体系量化表征的相关研究^[18-21]。在更大尺度层面,定量地震地貌学极大地推动了对沉积体系三维几何形态、内部结构及沉积过程的研究^[22]。如何寻求物源体系与沉积体系间的量化耦合响应,成为断陷湖盆源-汇系统研究框架下的又一重要命题。

饶阳凹陷蠡县斜坡处于渤海湾盆地冀中坳陷的东翼,为一个西抬东倾、NNE-SSW走向的古近系-新近系宽缓型沉积斜坡带^[23-24]。研究区古近系的油气勘探始于1975年,但此后鲜有突破,究其原因在于对缓坡带古近系盆外物源体系演化及盆地沉积充填响应认识不清^[7-8]。在上述背景下,综合利用饶阳凹陷丰富的岩心及地震资料,在源-汇系统研究框架下,厘定物源体系的演化,并对蠡县斜坡古近系沙河街组开展多尺度沉积体系量化表征研究。研究成果可以丰富陆相湖盆源-汇系统的量化研究,为相同构造背景的盆地提供借鉴,同时可为研究区沙河街组的油气勘探提供有力的理论和技术支持。

1 区域地质概况

渤海湾盆地冀中坳陷东临沧县隆起,西至太行山区,南至邢横隆起,北抵燕山褶皱带^[23-29](图1a)。饶阳凹陷蠡县斜坡位于冀中坳陷中南部,其东西宽20~30 km,南北长约80 km,面积约1 000 km²。斜坡西部以高阳断层为界,东部以任西断裂带为界,北部与霸县凹陷相邻,南部以献县凸起为界,是渤海湾盆地大型富油气斜坡之一^[23-24]。蠡县斜坡为高阳古隆起上发育的古近系继承性沉积斜坡,地层产状宽缓,原始坡降极小,一般在1~3 m/km,即地形坡度介于1°~2°,现今呈西抬东倾、NE走向的构造特征^[23-24,28,30]。研究区位于蠡县斜坡中北段,面积约950 km²(图1b)。

饶阳凹陷前古近系为中-新元古界及下古生界海相碳酸盐岩组成的大型古隆起,在其上发育古近系断陷盆地,形成了北北东走向、东断西超的箕状断陷构造格局^[23](图2a,b)。饶阳凹陷古近系控凹边界断层为

献县断层,断层主体倾向北西向,走向北北东向,与蠡县斜坡走向基本一致^[23-24,30]。研究区断裂体系主体活跃于孔店组—沙河街组三段沉积时期,并明显控制断层下降盘的发育厚度。沙(沙河街组)二段和沙一段发育时期,研究区构造活动很弱,断层基本停止活动。研究区内次级断裂体系走向大致平行于高阳断层,倾向北西或南东,呈现多组地堑或半地堑组合的特征^[23-24,30](图2a,b)。

在上述构造背景下,饶阳凹陷自下而上发育古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)以及第四系平原组(Qp)^[23-24,26,30-31]。蠡县斜坡古近系发育不完整,缺少下始新统孔店组(Ek),自下而上发育:①沙四段,发育于断陷早期,盆地充填粗粒的冲积扇沉积;②沙三段,发育于断陷扩张期,其早期充填辫状河三角洲沉积,晚期充填湖泊沉积;③沙二段,发育于断陷晚期,整体以浅水辫状河三角洲沉积为特征,内部发育大量水下分流河道砂体^[19-20];④沙一段,早期发育于断-拗扩展期,湖盆稳定沉降造成快速湖侵,由三角洲沉积向上过渡为滨浅湖滩坝沉积,随后研究区进入断-拗消亡期,盆地大面积充填了浅水辫状河三角洲沉积,以水下分流河道砂体为主^[19-20];⑤东营组,发育于断-拗回返消亡晚期,由早期辫状河三角洲向上过渡为滨浅湖亚相,顶部发育河流沉积体系^[23-24,30-32](图2)。本研究的重点层位是沙二段和沙一段。

2 研究数据

本研究所应用的数据包含了岩心、测井和三维地震数据,具体为:2009年采集的饶阳凹陷大连片三维地震资料,覆盖面积约950 km²,地震数据主频约23 Hz(图3);平面上分布相对均匀的30口重点井岩心,累计长度约1 066 m;这些重点井的测井曲线,包括自然电位、自然伽马、声波时差和电阻率等。

根据沙河街组声波数据测算研究区目的层平均速度约2 000 m/s,结合地震数据的主频,可知地震数据的垂向分辨率在20~25 m。利用岩心和测井曲线进行了井-震标定及均方根振幅(RMS)属性地层切片的标定。此外,在岩心观察的同时进行了密集的取样工作,并基于12块样品进行了碎屑锆石U-Pb定年测试,每块样品定年45~50个点,共计U-Pb年龄数量543个,其中锆石年龄谐和度大于90%的年龄为数量519个。取样井位大致平行于蠡县斜坡走向,其组成的样品剖面能够更多地捕捉到来自西北方向缓坡带盆外物源水

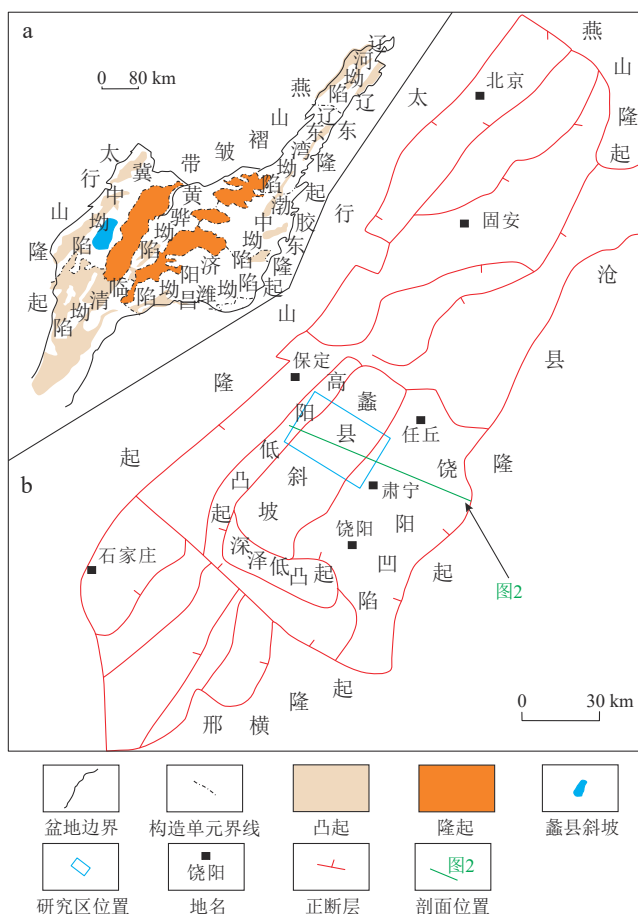


图1 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡构造区划

Fig. 1 Tectonic division of the Lixian slope in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

a. 渤海湾盆地次级构造单元及冀中坳陷方位;b. 冀中坳陷构造区划分

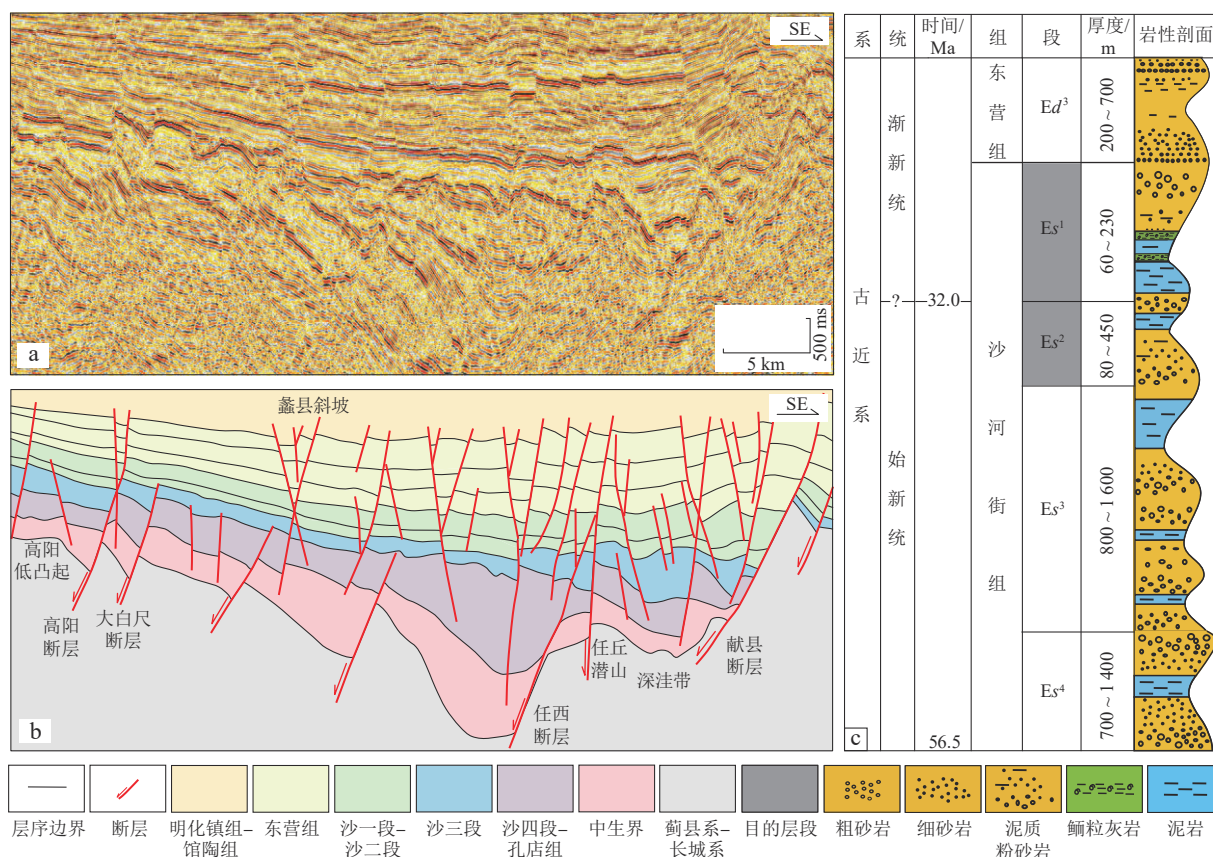


图2 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡构造剖面 and 地层综合柱状图(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Structural profile and composite stratigraphic column of the Lixian slope in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin (see Fig. 1b for the profile location)

a. 沿斜坡倾向地震反射剖面; b. 沿斜坡倾向地震解释剖面; c. 饶阳凹陷古近系沉积充填特征

系带来的沉积信号(图3)。

3 古近系盆外物源水系特征

水系作为沉积物搬运的主要通道,直接决定了沉积物搬运的路径及沉积碎屑的通量,因此,在深-时盆地研究中,恢复古水系对重建源-汇系统具有重要意义。吴忱等^[33-34]在华北克拉通山地进行了大量的野外工作,通过古河道砾岩相分布及河流阶地特征恢复了古近系华北古水系分布,为古汇水盆地的恢复提供了较好的基础。同时,古近纪以来华北克拉通整体构造平稳,在山区水系继承性下切作用下,其河道侧向摆动相对较少,在无强烈造山运动造成水系反转或闭合的情况下,汇水盆地的古地貌、古水系特征与现今特征具有一定的相似性^[34-35]。结合现今华北克拉通北缘数字高程图(DEM)及中国五级河网资料进行了现今汇水盆地分析,划分了不同水系的流域范围,对古汇水盆地具有一定的指示意义(图4a)。

饶阳凹陷古近系沉积时期的古水系包括起源于太

行山区的古滹沱河、古大沙河、古唐河及古大清河等4条主水系,河流上游受限太行山间地形,整体向东南方向延伸,进入山前平原地区后,沿高阳低凸起南段构造转换带进入冀中拗陷,流向转向北东方向,与蠡县斜坡走向保持一致(图4b)。饶阳凹陷现今水系特征指示滹沱河、磁河、大沙河、唐河和大清河等5条主干水系自太行山东麓向东南方向进入蠡县斜坡范围内(图4a)。对比古今华北水系可知,古白洋淀范围远大于现今白洋淀范围;古永定河水系与现今永定河水系特征相似,在北京房山地区发育临近古大清河水系的河道转向(图4)。

4 古近系沙一段-沙二段物源体系量化表征

前期地震前积反射及轻、重矿物综合物源分析指示蠡县斜坡发育3个不同方向的物源体系,即西北向、西向及西南向物源体系^[19-20, 31]。根据锆石U-Pb定年取样层位,本研究中11个锆石样品分别归位至沙二段

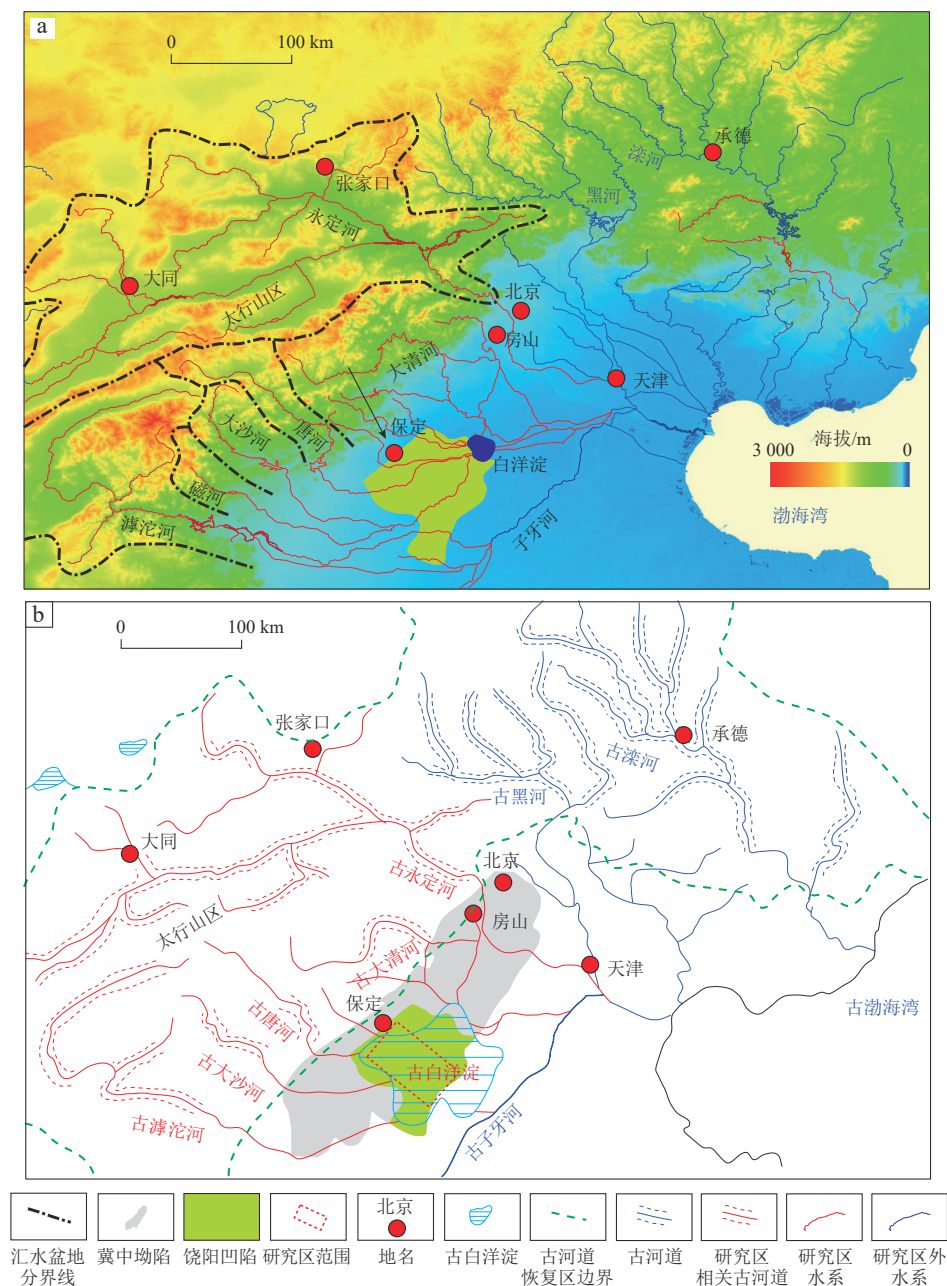


图4 华北克拉通现今水系与古近纪古水系分布(据文献[19]修改)

Fig. 4 Distribution maps of the present-day drainage systems and the Tertiary paleo-drainage systems in North China Craton (modified after reference [19])

a. 华北克拉通现今地貌与四级水系分布; b. 华北克拉通古近纪古水系分布

的岩性对于地震反射的响应强度相似,难以通过地震振幅属性精准刻画地貌边界,尤其是相对细粒的岩性过渡边界,例如三角洲前缘泥质粉砂岩沉积与前三角洲粉砂质泥岩、泥岩的沉积边界。因此,地震属性边界并非准确的沉积相边界,其识别与追踪的准确度,取决于刻画目标体的尺度与地震反射最大分辨率的差异,但通常地震属性边界被认为是真实沉积相边界的最小范围^[58, 62]。

针对不同的沉积体系,其定量地震地貌学分析中

关注的沉积要素特征并不相同,例如曲流河沉积体系中,量化地震地貌学主要对河道宽度、曲流带宽度、曲流半径等参数进行量化测量^[58, 62]。在地震分辨率允许的情况下,需在纵向上测量多组地貌参数,以其平均值为定量地震地貌解释的结果。目前尚未有针对浅水三角洲沉积体系提出过定量地震地貌学参数,本研究针对浅水三角洲的沉积特征,结合蠡县斜坡古近系的地震资料分辨率,提出了以下切实可操作的量化表征参数。

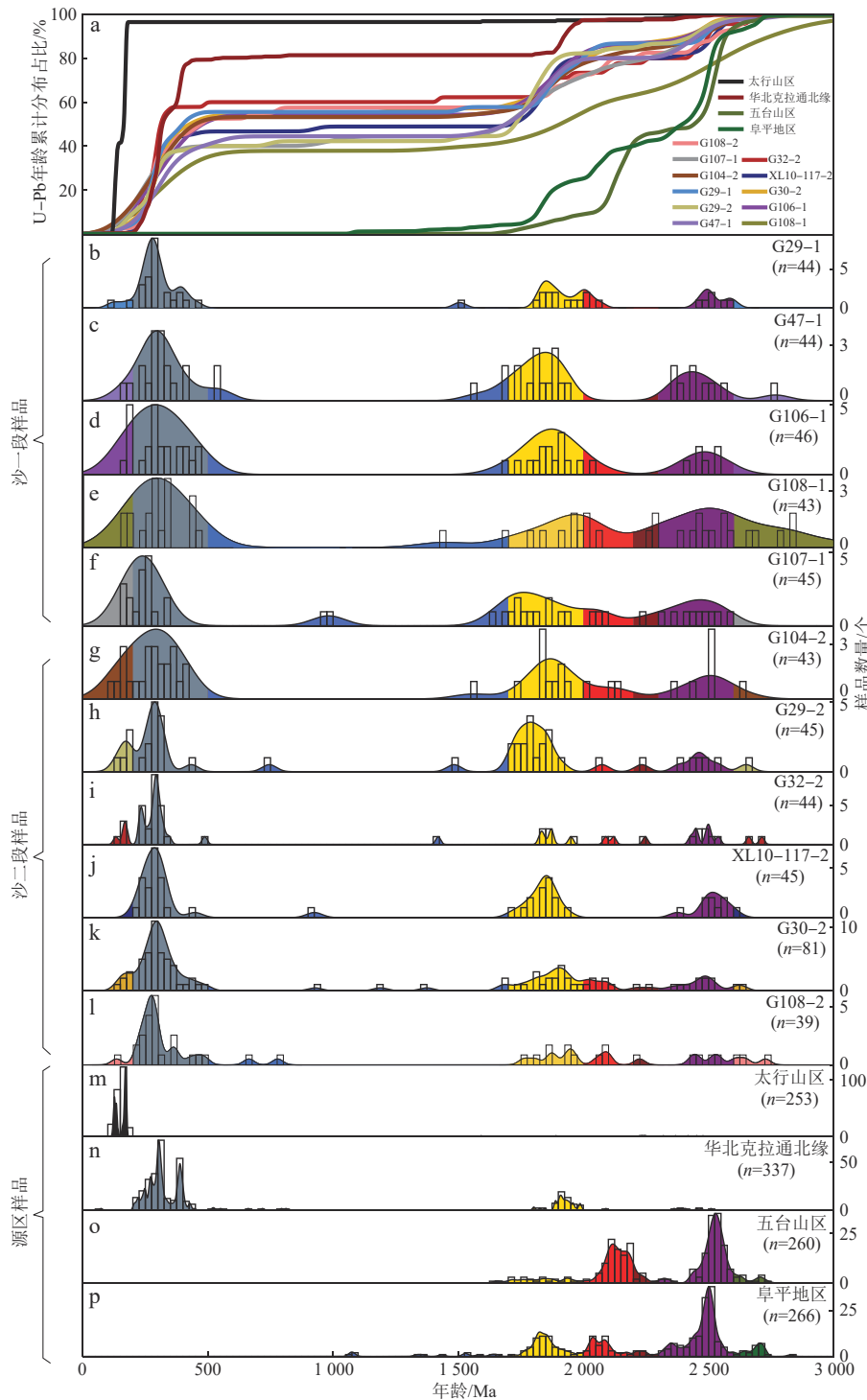


图5 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙二段-沙一段及周缘源区^[44-57]锆石U-Pb年龄分布及累计曲线特征

Fig. 5 Distribution and cumulative curve characteristics of zircon U-Pb ages for the samples from Paleogene Sha 2 and Sha 1 members, and those from the surrounding provenances^[44-57] of the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

a. 周缘源区及研究区钻井锆石U-Pb年龄累计曲线; b-f. 沙一段锆石U-Pb年龄分布; g-l. 沙二段锆石U-Pb年龄分布; m-p. 周缘源区锆石U-Pb年龄分布
(图中G108-2等均为样品编号。)

1) 三角洲面积

浅水三角洲沉积体系在地震地貌上最为明显的是其近三角形的席状地貌特征,即由三角洲平原河道分

叉开始至三角洲前缘砂体边界,在RMS属性上多显示为相对较强的属性特征。由于浅水三角洲砂体具有相对较薄且分布广泛的特征^[63-64],相邻浅水三角洲沉积

体系间砂体有部分重叠,可通过调整均方根振幅属性地层切片色标,增强浅水三角洲末端泥质反射特征,以便于区分相邻的浅水三角洲沉积体系。因此,本研究中浅水三角洲的地震地貌面积参数,实际表征的范围仅包括三角洲平原和前缘,而不包括前三角洲,故地震地貌上的三角洲面积小于真实三角洲的面积。

2) 平均河道带宽度

RMS属性地层切片上,浅水三角洲扇形反射范围内可识别出近似平行于三角洲推进方向的暖色条带状地震地貌特征,并标定指示上述暖色条带状特征为富砂条带,因此将其解释为分流河道侧向迁移、叠置的范围,其左、右边界的直线距离为分流河道带的宽度。分流河道边缘与支流间湾微相岩性近似,故地震地貌响应上分流河道带宽度的定量刻画被认为小于真实分流河道带宽度。

3) 平均河道带长度

针对上述分流河道带,取分流河道带左、右边界的中线分别作为可识别的分流河道带地震地貌特征的顶端和底端,中线的长度为分流河道带的长度。同理,此分流河道带长度被认为小于真实分流河道带的长度。

4) 三角洲主流向

浅水三角洲主流向的参数测量有两种方法,分别对应可识别前积反射特征的三角洲与不可识别前积反射特征的三角洲。对于可识别前积反射的三角洲,沿三角洲推进方向,在任意线上测量前积反射延伸的长度,取前积反射延伸最长的方向为三角洲的主流向。由于浅水三角洲厚度相对较小,对于不可识别前积反射的三角洲体系,以三角洲地貌扇形长轴方向作为浅水三角洲推进方向。

5.1.2 浅水三角洲地震地貌参数表征

基于浅水三角洲量化表征参数的选取,在沙二段和沙一段提取地层切片,切片时窗2 ms,在获得的RMS属性地层切片上进行定量地震地貌解释。在此以S91(沙二段)和S46(沙一段)切片为例展示量化过程(图6)。由岩性与阻抗关系可知^[19-20],RMS属性地层切片上砂质相带多呈现暖色(红—黄)的反射特征,泥质相带多呈现冷色(蓝)的反射特征,砂泥间互相带多呈现过渡色(绿)的反射特征(图6)。结合单井及连井岩性标定,在井位控制校验可靠度大于80%的前提下,确保地层切片的地质解释合理且准确。此外,研究区地震垂向分辨率在20~25 m,浅水三角洲分流河道带的规模大于1 000 m,因此该地震垂向分辨率能够支撑浅水三角洲分流河道带的刻画与参数提取。

1) 沙二段

RMS属性地层切片S91显示,研究区内A区及部分B区间隔发育了向东南延伸的黄绿色、蓝绿色条带状振幅,分别代表砂质相带与泥质相带呈条带状间互发育的特征(图6a)。连井剖面岩性标定指示,高106、高103和高43井位于砂质相带,钻井显示相应深度段为水下分流河道沉积;高35井位于砂质相带之间的泥质相带区,钻井显示相应深度段为支流间湾沉积(图6b)。因此,将上述黄绿色条带状地震地貌解释为水下分流河道带。在研究区C区,砂质相带向东北方向过渡为泥质相带,仅能区分不同岩性相带的RMS属性界线,不能进一步识别出类似A区条带状展布的地震属性,指示了C区砂质相带与砂、泥间互相带较A区和B区发育更明显(图6a—c)。

定量地震地貌学测量显示,A区浅水三角洲面积约144 km²,其水下分流河道带宽度约1.3 km,平均长度约3.8 km;B区浅水三角洲面积约71 km²,其水下分流河道带宽度约1.0 km,平均长度约3.6 km;C区浅水三角洲发育面积约206 km²,三角洲延伸方向与断陷盆地长轴方向夹角平均约48°,未能识别并获取C区水下分流河道带地貌参数。

2) 沙一段

RMS属性地层切片S46指示,砂质相带分布于斜坡上部A、B和C区,而泥质相带主体分布于斜坡中部和下部,泥质相带的分布范围相对沙二段范围扩大(图6d)。定量地震地貌学测量显示,A区浅水三角洲面积约为38 km²,三角洲范围相对较小,未能识别并获取水下分流河道带地貌参数;B区浅水三角洲面积约为94 km²,同样未能识别并获取水下分流河道带地貌参数;C区浅水三角洲发育面积约为185 km²,三角洲延伸方向与断陷盆地长轴方向夹角平均约42°,未能识别并获取水下分流河道带地貌参数。

5.2 基于沉积构造解释的沉积参数表征

5.2.1 定量沉积构造解释方法

牵引流沉积构造的厚度(尤其是楔状交错层理的厚度)体现了沉积水动力条件,间接指示了沉积期河道的水体深度及河道宽度,进而能够指示河道的三维几何参数^[49-52]。基于大量第四系河流相露头的野外实测,Bhattacharya等^[35, 65-69]建立了河流相沉积构造量化解释方法,且此方法逐渐被证实可有效应用于岩心资料的研究,并同样适用于曲流河和辫状河三角洲等沉积^[35, 65, 69]。

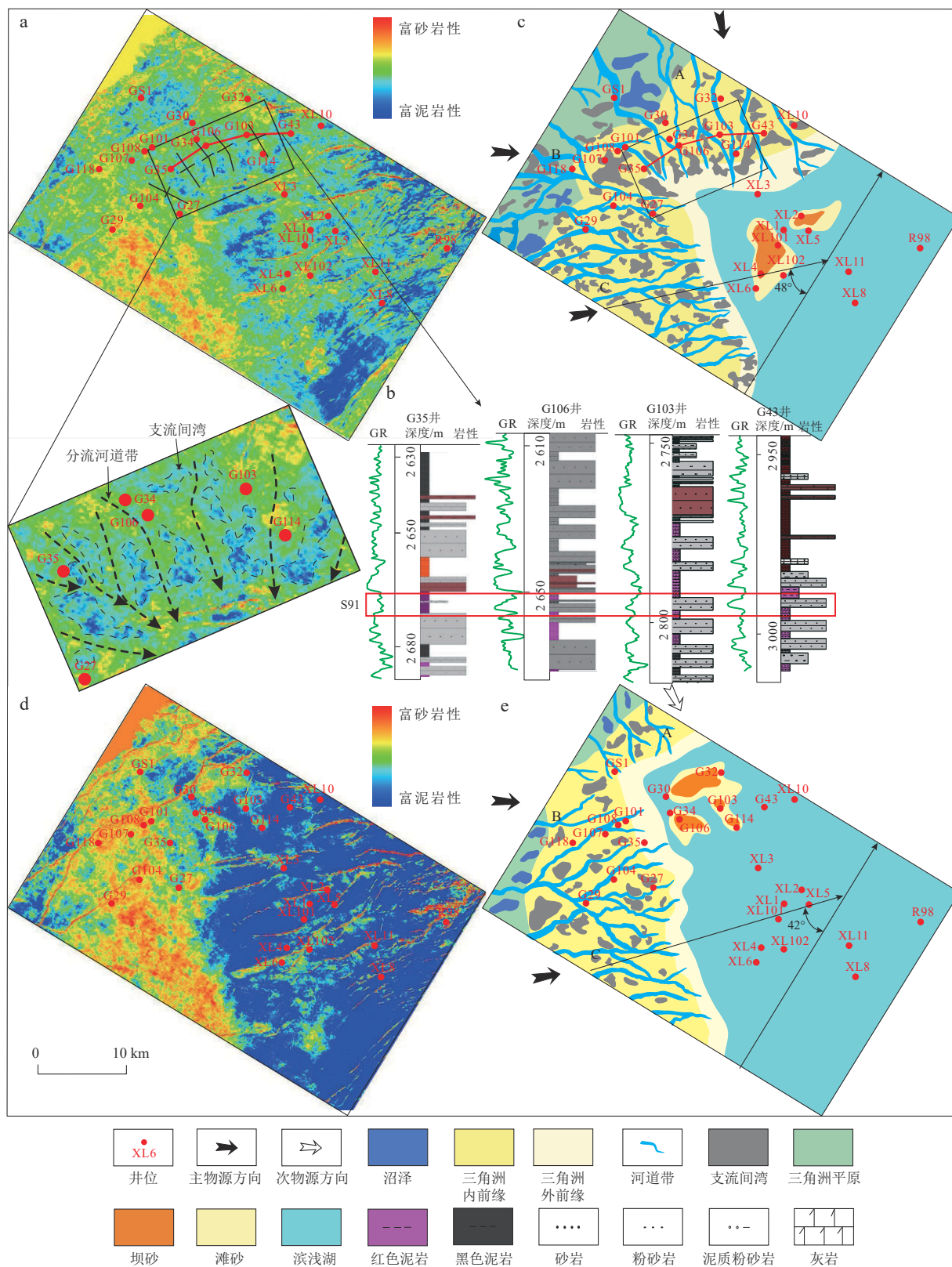


图6 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段地层切片定量地震地貌学解释^[19]

Fig. 6 Quantitative seismic geomorphological interpretation of the Paleogene Sha 2 and Sha 1 members on seismic slices in the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin^[19]

a. 沙二段RMS属性地层切片S91; b. 沙二段地层切片S91 钻、测井标定; c. 沙二段地层切片S91 地质解释; d. 沙一段RMS属性地层切片S46; e. 沙二段地层切片S46 地质解释

Bridge 等^[65, 67, 69]总结并提出了河道沙坝中沙丘内部楔状交错层理平均厚度(S_m , cm)与平均沙丘高度(B_m , cm)之间的关系。其中,交错层理厚度(S , cm)为岩心上单个正韵律层段冲刷面至楔状交错层理顶部的厚度,其关系式如下:

$$\beta \approx S_m / 1.8 \quad (1)$$

$$B_m = 5.3\beta + 0.001\beta^2 \quad (2)$$

式中: β 为沙丘顶部被冲刷未保存部分的厚度,cm。

平均沙丘高度(B_m , cm)与河道深度(D , m)之间存在正相关关系,即平均沙丘高度通常随着河道深度的增加而增加,但其相关性却整体较低^[70-71],通常 $3 < D/B_m < 20$ 。其相关性较低的原因存在于两个方面:①当沙床地形处于某个水动力区间时,在该水动力区间的下边界(更低阶沙床底形边界条件)和上边界(更高阶沙床底形边界条件) D/B_m 比值近乎为零,而在水动力区间中部达到最大值;②当在河流沉积中进行沙丘高度和河道深度的测量时,并不能确定该沙丘高度对应于该河流发育时期平均流动深度下的沙丘高度。Bridge 和 Tye^[65]收集了多种河道沙丘几何参数,认为 D/B_m 的平均值多介于6~10,且总结得出最大河道满岸深度(D_{max} , m)约为平均沙丘高度的10倍,即下述关系式:

$$6 < D/B_m < 10 \quad (3)$$

$$D_{max} \approx 10B_m \quad (4)$$

Bridge 与 Mackey^[70-71]提出平均河道深度(D_m , m)约是最大河道满岸深度的0.57倍,即下述关系:

$$D_m \approx 0.57D_{max} \quad (5)$$

Bridge 与 Tye^[65]提出了平均河道宽度(W_e , m)与平均河道深度的关系,以及平均河道带宽度(W_{cb} , m)的取值范围,关系式如下:

$$W_e = 8.88D_m^{1.82} \quad (6)$$

$$59.86D_m^{1.8} < W_{cb} < 192.01D_m^{1.37} \quad (7)$$

定量恢复地下河道或河道带宽度需要准确的最大河道满岸深度,而最大满岸深度的估算需依托未削截的、去压实校正的河道沙坝厚度^[65]。显然,通过保存完整的河道沙坝恢复河道带宽度的方法并不可行。因此,通过残存河道沙坝内部沙丘高度进行最大河道满岸深度的计算,成为唯一相对准确且可行的方法^[65-68]。沙丘高度与沙丘内部交错层理厚度密切相关,且交错层理厚度需选自不同剖面或取心井以增加数据的稳定性^[65-69]。

5.2.2 定量岩心交错层理沉积参数的获取

根据定量地震地貌学的平面刻画,按照研究区内A、B和C区划分岩心平面归属,以此开展蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段浅水三角洲定量沉积构造解释。

基于精细的岩心描述,识别水下分流河道成因的交错层理正韵律,并统计其厚度分布,以此为依据进行沉积动力学相关参数的计算,获得浅水三角洲水下分流河道的参数。

1) 沙二段

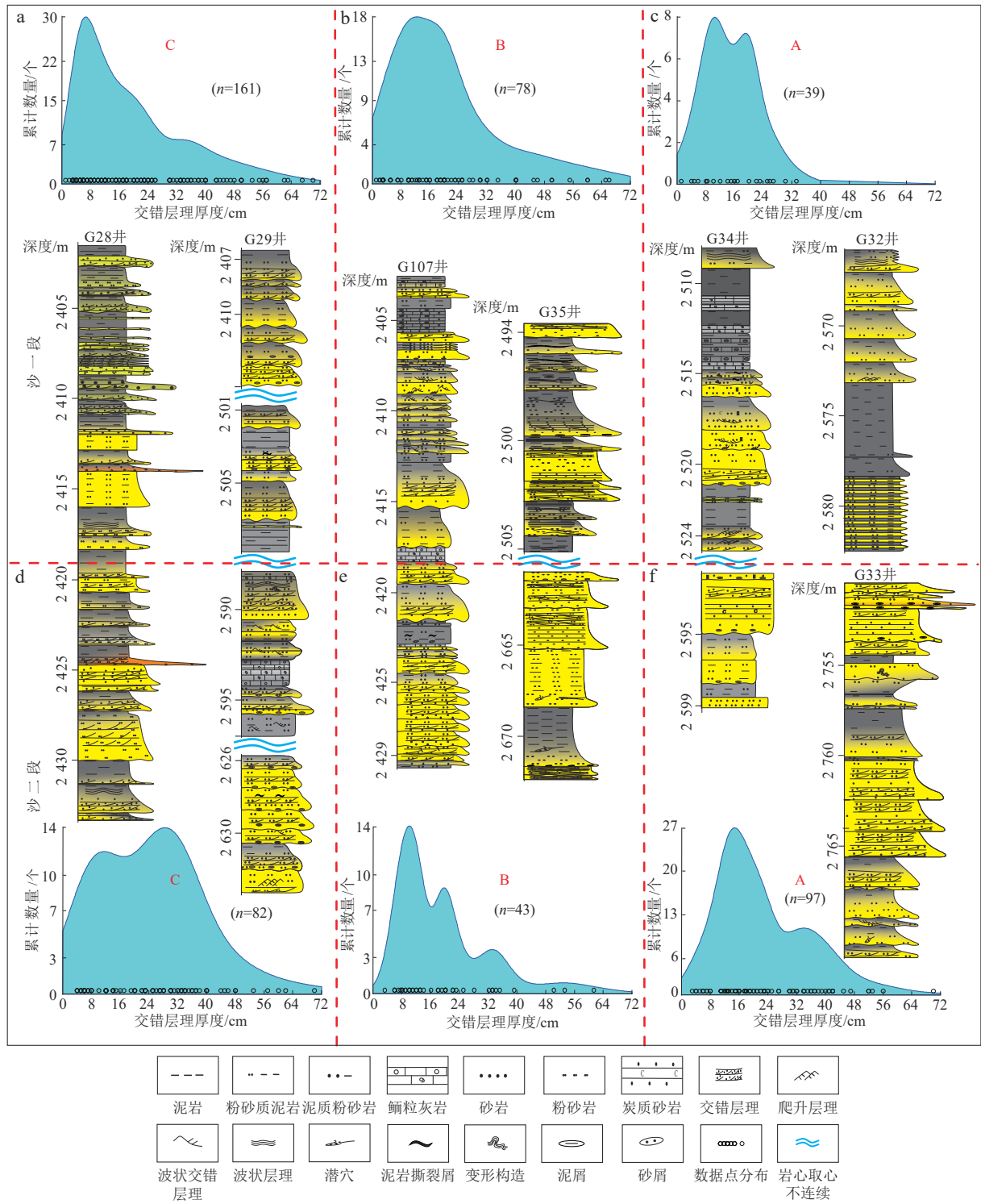
蠡县斜坡A区取心井在沙二段共计识别出交错层理97个(图7)。交错层理厚度分布累计曲线呈现双峰分布的形态,其中左峰值特征相对突出,最高频数对应的交错层理厚度约14 cm($n=28$),右峰值最高频数对应的楔状交错层理平均厚度约34 cm($n=11$)(图7);两峰值所对应交错层理厚度差异相对较大,差值约20 cm,指示发育两种尺度的水下分流河道。由上述公式可知,A区平均沙丘高度约68 cm,河道深度约5.5~7.0 m,最大河道满岸深度约7.0 m,平均河道深度约3.9 m,平均河道宽度约104 m,平均河道带宽度介于680~1 220 m(表1)。

蠡县斜坡B区取心井沙二段识别出交错层理共计43个(图7)。交错层理厚度分布累计曲线指示三峰分布形态,但每个峰值对应的累计数量相对较小,左峰值对应的交错层理厚度约9 cm($n=14$),中间峰值对应的交错层理厚度约19 cm($n=8$),右侧峰值对应的交错层理厚度约33 cm($n=4$)。虽然累计曲线呈三峰形态特征,但由于右侧峰值对应数量小于总体样本的10%,笔者认为不具有统计学意义,因此将累计曲线近似看做双峰形态,仅参考左侧峰值和中间峰值特征参数(图7)。由上述公式可知,B区平均沙丘高度约57 cm,河道深度约5.0~6.0 m,最大河道满岸深度约6.0 m,平均河道深度约3.3 m,平均河道宽度约77 m,平均河道带宽度介于500~970 m(表1)。

蠡县斜坡C区取心井沙二段识别出的交错层理共计82个(图7)。数量累计曲线特征显示为平滑的双峰分布形态,左峰值对应的交错层理厚度约11 cm($n=12$),右峰值对应的交错层理厚度约29 cm($n=14$)。由上述公式可知,C区平均沙丘高度约73 cm,河道深度约6.0~7.0 m,最大河道满岸深度约7.0 m,平均河道深度约4.2 m,平均河道宽度约120 m,平均河道带宽度介于780~1 360 m(表1)。

2) 沙一段

蠡县斜坡A区取心井沙一段共计识别出交错层理39个(图7)。数量累计曲线呈微弱的双峰分布形态,左峰值对应的交错层理厚度约11 cm($n=8$),右峰值对应的交错层理厚度约21 cm($n=7$)(图7)。整体上,交错层理厚度主体分布于0~29 cm区间,且楔状交错层理平均厚度约15 cm。由上述公式可知,A区平均沙丘

图7 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段交错层理厚度分区统计^[19]Fig. 7 Zonal statistical diagram of cross bedding thickness of the Paleogene Sha 2 and Sha 1 members in the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin^[19]

a—c. 沙一段C区、B区和A区;d—f. 沙二段C区、B区和A区

高度约44 cm,河道深度约3.5~4.5 m,最大河道满岸深度约4.5 m,平均河道深度约2.5 m,平均河道宽度约47 m,平均河道带宽度介于310~670 m(表1)。

蠡县斜坡B区取心井沙一段识别出交错层理78个

(图7)。数量累计曲线特征显示为规则的、光滑的单峰分布形态,峰值最高频数对应的交错层理厚度约13 cm(n=18)。由上述公式可知,B区平均沙丘高度约62 cm,河道深度约5.0~6.0 m,最大河道满岸深度约

表1 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段岩心分流河道地貌学参数

Table 1 Core-based geomorphic parameter statistics for the distributary channels in the Sha 2 and Sha 1 members in the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

层位	区域	交错层理平均厚度/cm	沙丘平均高度/cm	水深/m	平均河道深度/m	平均河道宽度/m	河道带宽度/m
沙一段	A区三角洲	15	44	3.5~4.5	2.5	47	310~670
	B区三角洲	21	62	5.0~6.0	3.5	88	570~1 070
	C区三角洲	20	59	5.0~6.0	3.4	81	530~1 010
沙二段	A区三角洲	23	68	5.5~7.0	3.9	104	680~1 220
	B区三角洲	20	57	5.0~6.0	3.3	77	500~970
	C区三角洲	25	73	6.0~7.0	4.2	120	780~1 360

6.0 m,平均河道深度约3.5 m,平均河道宽度约88 m,平均河道带宽度介于570~1 080 m(表1)。

蠡县斜坡C区取心井沙一段识别出的交错层理数量最多($n=161$)(图7)。数量累计曲线显示规则的单峰分布形态,但累计曲线不光滑,指示交错层理厚度变化不均匀,峰值对应的交错层理厚度约7 cm($n=30$)(图3)。由上述公式可知,C区平均沙丘高度约59 cm,河道深度约5.0~6.0 m,最大河道满岸深度约6.0 m,平均河道深度约3.4 m,平均河道宽度约81 m,平均河道带宽度介于530~1 010 m(表1)。

综合不同尺度资料进行定量化研究的关键在于不同尺度的定量化结果能否相互印证。沙二段A区与B区浅水三角洲定量地震地貌测量显示其平均水下分流河道带宽度分别约1.3 km与1.0 km,其定量沉积构造统计指示水下分流河道带宽度范围分别为680~1 220 m与500~970 m,即定量沉积构造解释的水下分流河道带最大宽度与定量地震地貌表征的水下分流河道带宽度非常近似。综上所述,笔者认为定量沉积构造解释与定量地震地貌测量均可为浅水三角洲提供相对准确且可相互印证的表征方法(图8),其中,前者主要获取垂向地貌

参数,后者主要获取平面地貌参数,两种定量化方法的纽带为平均河道带宽度(图8)。

6 讨论

6.1 碎屑锆石特征年龄指示物源转换

不同层段碎屑锆石的年龄分布可反映来自不同年龄段基岩的相对贡献^[13, 15]。由碎屑锆石年龄频谱可知,与沙二段相比,沙一段的古生代锆石含量明显减少,由平均37%减至平均26%(图5),指示两个层段发育时期物源水系发生了潜在的变化^[38, 72-73]。古生代锆石主要分布于古永定河-古大清河流域内,因此,沙一段古生代锆石含量明显减少与古永定河-古大清河水系向饶阳凹陷供源减弱有关(表2)。由古水系与基岩叠合图可知(图9a),由北向南延伸的永定河在房山附近与大清河距离较近,且永定河河道在此处发生明显转向,向南东方向延伸,同时大清河则由向东流动突然转向南流动(图9a)。Bishop^[74](1995)和Mather^[75](2000)讨论了流域扩张引起沉积物通量的突然增加,以及河流被袭夺造成原水系沉积物通量的突然减小。无论是流域扩张还是河流袭夺,沉积物通量的突变直接影响相

表2 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组不同水系内特征锆石年龄分布

Table 2 Relative content of featured detrital zircons of different ages in different drainages of the Paleogene Shahejie Formation on the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

层位	不同流域特征锆石地质年龄(占比/%)		
	古大清河(A区)	古唐河(B区)	古大沙河(C区)
沙一段	Pz (26)	Mz (16)	
		Pt ₂₊₃ (15)	Pt ₁ (35)
		Ar ₂₊₃ (8)	
沙二段	Pz (37)	Mz (13)	
		Pt ₂₊₃ (8)	Pt ₁ (32)
		Ar ₂₊₃ (10)	

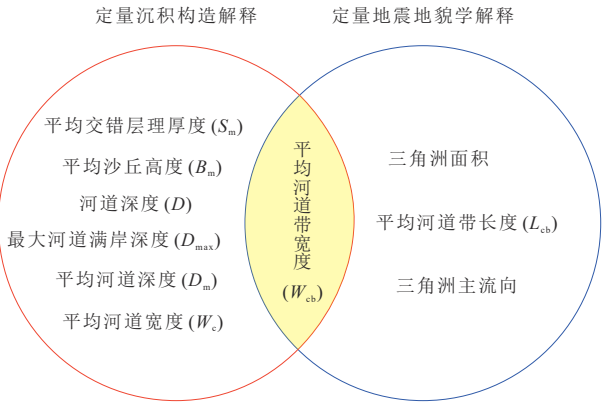


图8 定量沉积构造解释与定量地震地貌解释参数关系

Fig. 8 Parameter relationships between the quantitative sedimentary structural interpretation and quantitative seismic geomorphological interpretation

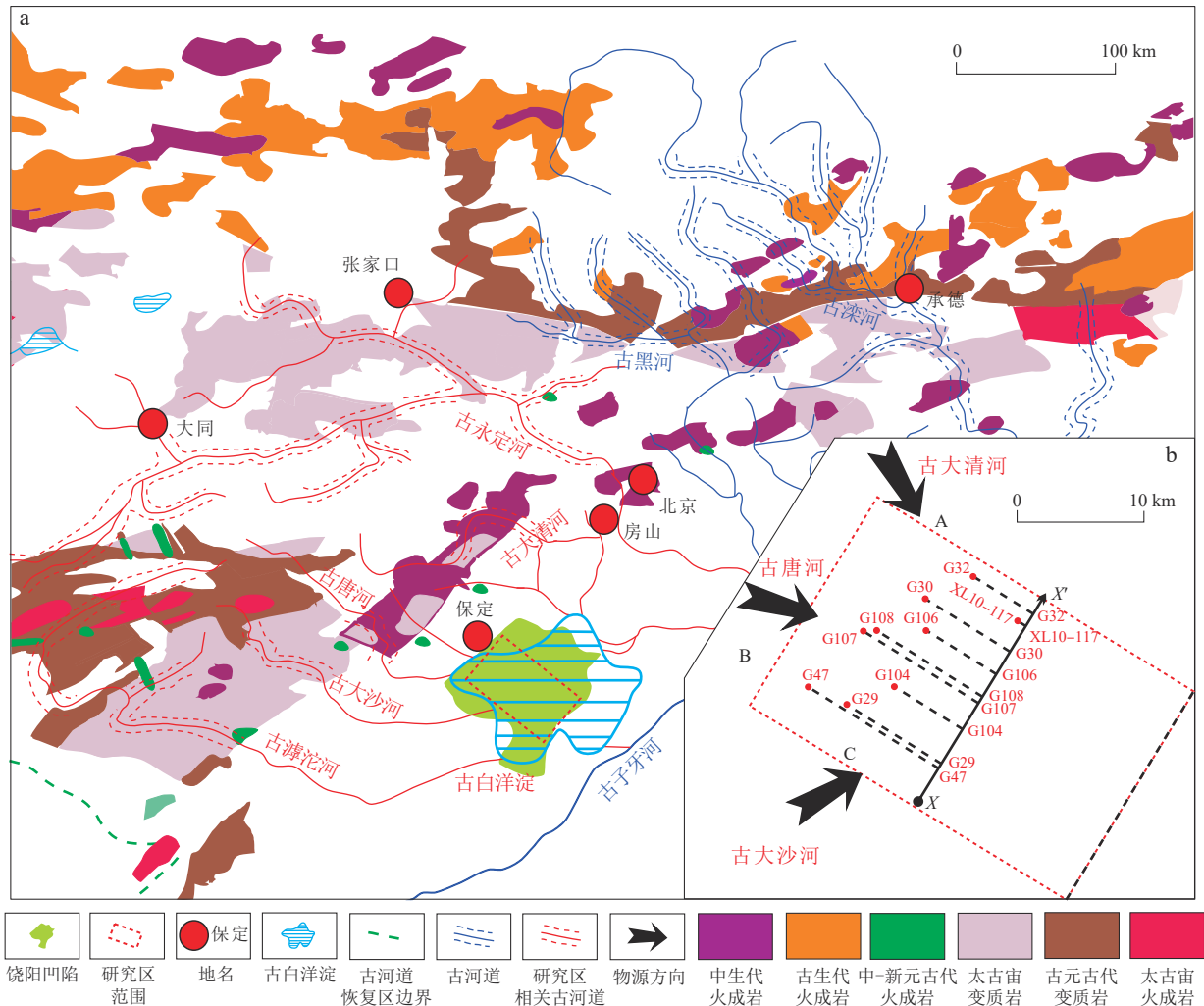


图9 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系碎屑锆石U-Pb年龄分布特征

Fig. 9 Characteristics of detrital zircon U-Pb ages in the Paleogene Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

a. 华北克拉通基岩分布与水系关系; b. 蠡县斜坡古近系碎屑锆石样品分布

应沉积体系(表2)。因此,笔者推断古永定河部分南向延伸水系被古大清河袭夺,古永定河为饶阳凹陷提供的沉积物通量降低,造成了晚古生代锆石含量的明显降低(图9b)。

河流袭夺造成沉积物通量变化,最直接的影响体现在被袭夺河流的基岩年龄在沉积盆地中降低,河流袭夺不会造成非流域基岩年龄在沉积盆地中的降低。Lamminen 等^[76](2015)认为锆石年龄组别的变化都是相互关联的,一个年龄组别的任何减少/增加都会导致其他年龄组别的相应增加/减少。由于某一年龄锆石含量显著下降,会造成其余年龄锆石相对含量上升,但此“假象”特征不代表其余年龄锆石对应水系对盆地供源量增加,而应归于锆石含量的“稀释”效应。研究区内,古大沙河流域所携带的中生代与古元古代特征锆石的相对丰度,从沙二段到沙一段均呈现略有增加的

特征,其中,中生代锆石含量从13%增加到16%,古元古代锆石含量从32%增加到35%(图5)。古大沙河在其汇水盆地中侵蚀了古元古代基岩的露头,随着时间的推移,从沙二段到沙一段古元古代锆石含量的稳定性表明,该河流在演化中持续同等速率侵蚀古元古代基岩(图5,图9a)。因此,笔者将中生代和古元古代锆石从沙二段到沙一段的少量增加归因于古生代锆石从沙二段到沙一段的急剧减少。

与中生代和古太古代锆石含量在不同层段发生1%~3%的变化不同,中-新元古代锆石含量从8%增加到15%(图5;表2)。随着古唐河汇水盆地逐渐成熟,汇水面积逐渐增加,下伏中元古代基岩出露面积增加,相应年龄的锆石含量将增加,由于古唐河向饶阳凹陷提供Mz, Pt₂₊₃和Ar₂₊₃等3个年龄特征的锆石组合(图9),笔者认为这一倍数增加的特征表明古唐河的

沉积物通量增加(表2)。

古元古代年龄基岩主体出露于古大沙河流域范围内,但由于锆石含量的“稀释”效应,古大沙河流域古生代锆石含量的显著降低,可能造成古大沙河流域所携带的古元古代锆石含量“假性”升高。因此,无法确定古大沙河向蠡县斜坡的相对供源量变化,笔者倾向于基本维持不变(表2)。

6.2 物源转换下浅水三角洲的沉积响应

由物源体系研究及沉积相研究可知,研究区内发育3个物源体系,分别对应A区、B区和C区3个浅水三角洲,且由沙二段至沙一段沉积时期,蠡县斜坡西北向古大清河供给的碎屑沉积物通量明显减少,与之相伴的是蠡县斜坡3个浅水三角洲的地震地貌特征和沉积构造特征发生了不同程度的改变。

研究显示,饶阳凹陷沙二段与沙一段沉积时期处于断陷萎缩期和断-拗扩展期,蠡县斜坡构造背景稳定,呈现为宽缓的、东南倾的斜坡,且研究区内的断层多为控藏断层,并未产生明显的控沉积作用^[19-20,31]。在此背景下,湖平面的波动在斜坡不同位置产生的湖岸线进退尺度相似,对斜坡上3个不同浅水三角洲的相带岩性变化、三角洲面积等参数具有协同变化的影响。因此,构造作用和湖平面变化并未对蠡县斜坡沙二段与沙一段沉积特征产生重大影响。此外,冀中拗陷古近系沙二段至沙一段沉积时期,气候整体由半干旱转向湿润气候^[77-78]。气候和源区基岩特征是影响盆地碎屑沉积物通量的重要因素^[79-80],但由于气候作用影响范围相对广阔,若物源水系沉积通量受气候控制,则蠡县斜坡3个物源体系将呈现同步的沉积物通量增加或减少的特征,显然与研究区不同浅水三角洲沉积物通量变化特征不符。相比于构造作用、湖平面和气候变化,物源体系的转化具有影响特定沉积体系的特征。Bishop^[74](1995)和Mather^[75](2000)认为,汇水盆地面积的扩大或河流袭夺、河流分叉等作用,均会直接体现在

汇水盆地相关的沉积体系上,而不会影响其他相邻源-汇系统内的沉积体系,更接近蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段3个浅水三角洲沉积体系所产生各异的沉积响应。因此,蠡县斜坡古近系沙二段与沙一段为断陷后期受缓坡带盆外物源水系沉积物供给通量主控的浅水三角洲沉积体系。

沙二段-沙一段沉积期间,由于古永定河分支被古大清河袭夺,造成供给蠡县斜坡A区的特征锆石含量显著减少,特征锆石含量大约由37%下降至26%(图9a;表3),与定量沉积构造解释与定量地震地貌测量指示A区浅水三角洲覆盖面积由144 km²减小至38 km²及平均水下分流河道宽度由104 m减小至47 m的沉积响应相符。研究区中部古唐河水系沉积物通量的小幅度增加导致沉积物特征锆石含量大约由31%上升至39%(图9;表3),对应于B区浅水三角洲覆盖面积由71 km²增加至94 km²及平均水下分流河道宽度由77 m增加至88 m的沉积响应。研究区西南部古大沙河水系沉积物通量未观察到变化(图9;表3),但其对应的C区浅水三角洲覆盖面积由206 km²降低至185 km²,平均水下分流河道宽度由120 m减小至81 m,该沉积响应则可归于湖平面上升造成的小幅度沉积响应。相似的湖平面变化影响也应当发生在A区和B区浅水三角洲中,但由于受沉积物通量变化主控,并不能剥离出特定响应特征。

7 结论

1) 源-汇系统“特征锆石”相对含量变化可指示相对沉积物通量演化的过程。自沙二段至沙一段沉积时期:古大清河、古永定河携带Pz火成岩向A区供源,锆石相对含量变化指示该水系沉积物通量由37%降低至26%;古唐河携带Mz火成岩、Pt₂₊₃侵入岩、Ar₂₊₃变质岩向B区供源,其特征锆石含量变化指示该水系沉积物通量由31%增加至39%;古大沙河携带Pt₁变质岩

表3 渤海湾盆地饶阳凹陷蠡县斜坡古近系定量物源转换与浅水三角洲地貌参数沉积响应

Table 3 Quantitative sediment provenance changes and sedimentary response of geomorphic parameters of the shallow-water delta in the Lixian slope, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

层位	物源体系	特征锆石含量/%	三角洲	水深/m	平均河道深度/m	平均河道宽度/m	河道带宽度/m	三角洲面积/km ²
沙一段	古大清河	26	A	3.5~4.5	2.5	47	312~674	38
	古唐河	39	B	5.0~6.0	3.5	88	578~1 079	94
	古大沙河	35	C	5.0~6.0	3.4	81	529~1 009	185
沙二段	古大清河	37	A	5.5~7.0	3.9	104	681~1 222	144
	古唐河	31	B	5.0~6.0	3.3	77	506~975	71
	古大沙河	32	C	6.0~7.0	4.2	120	785~1 362	206

及中-基性火成岩、 Ar_{2+3} 变质岩向C区供源,其特征锆石组合含量变化指示该水系沉积物通量由32%增加至35%。

2) 陆相断陷盆地具有丰富的岩心和3D地震资料,适合开展定量岩心沉积构造与定量地震地貌表征,且两种量化方法可通过平均河道带宽度相互印证。自沙二段至沙一段,定量岩心沉积构造表征指示A区浅水三角洲平均河道带宽度由681~1 222 m减小至312~674 m;B区浅水三角洲平均河道带宽度由506~975 m增加至578~1 089 m;C区浅水三角洲平均河道带宽度由785~1 362 m减小至529~1 009 m。定量地震地貌表征指示A区浅水三角洲面积由144 km²减小至38 km²;B区浅水三角洲面积71 km²增加至94 km²;C区浅水三角洲面积206 km²减小至185 km²。

3) 由断陷湖盆缓坡带浅水三角洲沉积响应的驱动机制对比可知,构造作用、气候变化及湖平面升降等异旋回作用下缓坡带浅水三角洲体系的沉积响应多数趋同。然而,盆外物源水系演化直接影响对应的三角洲沉积体系,此异旋回作用控制下盆地内浅水三角洲的沉积充填呈现非趋同的响应机制。

致谢:感谢美国科罗拉多矿业学院 Lesli Wood 教授在构建本研究中给予的指导与帮助;感谢刘常妮、李雨彤、张维、秦祎、葛德发及杨殊凡等同学在岩心观察中给予的帮助;感谢3位匿名审稿人的详尽修改意见;感谢中石油华北油田采油一厂在研究进行中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] MANN P, GAHAGAN L, GORDON M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[M]//HALBOUTY M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990-1999. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2003: 15-105.
- [2] MANN P, HORN M K, CROSS I M. Emerging trends from 69 giant oil and gas fields discovered from 2000-2006 [C]//2007 AAPG Annual Convention. Long Beach: AAPG, 2007: 90063.
- [3] 施和生,高阳东,刘军,等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791.
SHI Hesheng, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Characteristics of hydrocarbon source-migration-accumulation in Huizhou 26 Sag and implications of the major Huizhou 26-6 discovery in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 777-791.
- [4] 李忠诚,鲍志东,魏兆胜,等. 箕状断陷湖盆初始裂陷期层序地层与沉积充填特征——以松辽盆地梨南洼槽下白垩统火石岭组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 670-681.
LI Zhongcheng, BAO Zhidong, WEI Zhaosheng, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling characteristics of a half-graben rift lake basin during the initial rifting period: A case study of the 2nd member of Lower Cretaceous Huoshiling Formation, Linan Sag, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 670-681.
- [5] 刘伟,唐大卿,陈明月,等. 松辽盆地南部孤店断陷断裂构造特征及演化[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 816-823.
LIU Wei, TANG Daqing, CHEN Mingyue, et al. Fault structure characteristics and evolution in the Gudian fault depression, southern Songliao Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 816-823.
- [6] 赵仁文,肖佃师,卢双舫,等. 高一过成熟陆相断陷盆地页岩与海相页岩储层特征对比——以徐家围子断陷沙河子组和四川盆地龙马溪组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 52-63, 99.
ZHAO Renwen, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, et al. Comparison of reservoir characteristics between continental shale from faulted basin and marine shale under high-over mature stage: Taking Shahezi Formation in Xujiaweizi faulted basin and Longmaxi Formation in Sichuan Basin as an example [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 52-63, 99.
- [7] GAWTHORPE R L, LEEDER M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. Basin Research, 2000, 12(3/4): 195-218.
- [8] MEADE R H. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States[J]. The Journal of Geology, 1982, 90(3): 235-252.
- [9] 化祖献,刘小平,孙彪,等. 断陷盆地斜坡带油气富集差异性及其主控因素——以苏北盆地金湖凹陷三河次凹为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 950-958.
HUA Zuxian, LIU Xiaoping, SUN Biao, et al. Differences in oil and gas enrichment in slope belts of rift basins and main controlling factors for hydrocarbon accumulation: A case study of Sanhe Sub-sag in Jinhu Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(6): 950-958.
- [10] 刘峻桥,吕延防,付广,等. 斜坡区断层圈闭发育部位及其形成时期识别方法及应用——以冀中坳陷文安斜坡为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 355-366.
LIU Junqiao, LYU Yanfang, FU Guang, et al. Recognition method and application of fault trap position and formation period in slope area: A case study in Wen'an slope, Jizhong Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 355-366.
- [11] 肖敦清,卢异,付立新,等. 断陷湖盆斜坡构造类型及特征——以歧口凹陷为例[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(1): 1-6.
XIAO Dunqing, LU Yi, FU Lixin, et al. Slope structure feature and category in faulted basin——A case study on Qikou Sag Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(1): 1-6.
- [12] ZHENG Hongbo, CLIFT P D, WANG Ping, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(19): 7556-7561.
- [13] BLUM M, PECHA M. Mid-Cretaceous to Paleocene North American drainage reorganization from detrital zircons [J]. Geology, 2014, 42(7): 607-610.
- [14] CARACCILO L. Sediment generation and sediment routing

- systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 209: 103226.
- [15] SHARMAN G R, SHARMAN J P, SYLVESTER Z. detritalPy: A Python-based toolset for visualizing and analysing detrital geochronologic data [J]. *The Depositional Record*, 2018, 4 (2): 202–215.
- [16] CHEN Hehe, WOOD L J, GAWTHORPE R L. Sediment dispersal and redistributive processes in axial and transverse deep-time source-to-sink systems of marine rift basins: Dampier Sub-basin, Northwest Shelf, Australia [J]. *Basin Research*, 2021, 33 (1): 227–249.
- [17] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性 & 差异性 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43 (4): 763–776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43 (4): 763–776.
- [18] XU Changgui, DU Xiaofeng, ZHU Hongtao, et al. Source-to-sink system and its sedimentary records in the continental rift basins: An example from the Paleogene in the Bohai Sea area, China [J]. *Interpretation*, 2017, 5 (4): ST35–ST51.
- [19] CHEN Hehe, ZHU Xiaomin, WOOD L J, et al. Evolution of drainage, sediment-flux and fluvio-deltaic sedimentary systems response in hanging wall depocentres in evolving non-marine rift basins: Paleogene of Raoyang Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Basin Research*, 2020, 32 (1): 116–145.
- [20] ROMANS B W, CASTELLTORT S, COVAULT J A, et al. Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 7–29.
- [21] 张自力, 朱筱敏, 廖凤英, 等. 断陷盆地缓坡带河流沉积砂体定量表征及控制因素分析: 以霸县凹陷文安斜坡东营组三段为例 [J]. *地学前缘*, 2021, 28 (1): 141–154.
- ZHANG Zili, ZHU Xiaomin, LIAO Fengying, et al. Features and control factors of gentle-sloped fluvial sandbodies in rift basins: An example from the Wen'an Slope, Baxian Sag [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28 (1): 141–154.
- [22] WOOD L J. Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial systems in the Northern Gulf of Mexico, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77 (9): 713–730.
- [23] 张锐锋. 饶阳凹陷古近系层序地层学及隐蔽油气藏勘探研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2005.
- ZHANG Ruifeng. Paleogene sequence stratigraphy and hidden oil and gas reservoir exploration in Raoyang Depression [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2005.
- [24] 赵贤正, 卢学军, 崔周旗, 等. 断陷盆地斜坡带精细层序地层研究与勘探成效 [J]. *地学前缘*, 2012, 19 (1): 10–19.
- ZHAO Xianzheng, LU Xuejun, CUI Zhouqi, et al. Detailed research of fine sequence stratigraphy and exploration results in the slope zone of faulted basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19 (1): 10–19.
- [25] 郝婧, 张厚和, 李春荣, 等. 渤海海域油气勘探历程与启示 [J]. *新疆石油地质*, 2021, 42 (3): 328–336.
- HAO Jing, ZHANG Houhe, LI Chunrong, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Bohai Sea [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42 (3): 328–336.
- [26] 杜威, 纪友亮, 季梦瑶, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44 (4): 142–151.
- DU Wei, JI Youliang, JI Mengyao, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44 (4): 142–151.
- [27] 吕传炳, 庞雄奇, 国芳馨, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷肃宁-大王庄地区中深层沉积特征及有利储层评价 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41 (5): 1–8.
- LYU Chuanbing, PANG Xiongqi, GUO Fangxin, et al. Sedimentary characteristics and favorable reservoir evaluation of medium-deep formation in Suning-Dawangzhuang area of Raoyang Sag in Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41 (5): 1–8.
- [28] 单帅强, 何登发, 方成名, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷高阳低凸起构造特征及成因机制 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44 (6): 989–996, 1007.
- SHAN Shuaiqiang, HE Dengfa, FANG Chengming, et al. Structural characteristics and genetic mechanism of Gaoyang low uplift in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44 (6): 989–996, 1007.
- [29] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4 (1): 42–50.
- [30] 崔周旗, 李文厚, 李莉, 等. 冀中饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组沙二段及沙一段下亚段沉积相与隐蔽油藏 [J]. *古地理学报*, 2005, 7 (3): 373–381.
- CUI Zhouqi, LI Wenhui, LI Li, et al. Sedimentary facies and subtle petroleum reservoir of the Member 2 and lower submember of Member 1 of Shahejie Formation of Paleogene on Lixian Slope of Raoyang Sag, Central Hebei Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7 (3): 373–381.
- [31] 刘金龙, 李胜利, 梁星如, 等. 冀中坳陷蠡县斜坡古近系沙一下亚段沉积物源分析 [J]. *古地理学报*, 2016, 18 (5): 809–817.
- LIU Jinlong, LI Shengli, LIANG Xingru, et al. Provenance analysis of the lower part of Member 1 of Paleogene Shahejie Formation in Lixian Slope, Central Hebei Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18 (5): 809–817.
- [32] 杜金虎, 邹伟宏, 易士威, 等. 华北油田隐蔽油藏的勘探 [J]. *中国石油勘探*, 2002, 7 (3): 7–15.
- DU Jinhui, ZOU Weihong, YI Shiwei, et al. Exploration of subtle oil reservoir in Huabei oil field [J]. *China Petroleum Exploration*, 2002, 7 (3): 7–15.
- [33] 吴忱, 马永红, 张秀清. 华北山地的古河道与古水系 [J]. *地理研究*, 1996, 15 (3): 33–41.
- WU Chen, MA Yonghong, ZHANG Xiuqing. Palaeochannel and palaeodrainage patterns in the North China mountains [J]. *Geographical Research*, 1996, 15 (3): 33–41.
- [34] 吴忱. 华北山地的水系变迁与新构造运动 [J]. *华北地震科学*, 2001, 19 (4): 1–6.

- WU Chen. Study on the combining inversion for dynamic parameters of seismogenic region with multidisciplinary precursory field[J]. *North China Earthquake Sciences*, 2001, 19(4): 1-6.
- [35] BHATTACHARYA J P, COPELAND P, LAWTON T F, et al. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 77-110.
- [36] 曹正琦, 翟文建, 蒋幸福, 等. 华北克拉通南缘约 2.5 Ga 构造变质事件及意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 570-585.
- CAO Zhengqi, ZHAI Wenjian, JIANG Xingfu, et al. About 2.5 Ga tectono-metamorphic event in southern margin of North China craton and its significance [J]. *Earth Science*, 2016, 41(4): 570-585.
- [37] ANDERSEN T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. *Chemical Geology*, 2005, 216(3/4): 249-270.
- [38] GEHRELS G. Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities [M]//BUSBY C, AZOR A. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Chichester: Blackwell Publishing Ltd., 2012: 45-62.
- [39] 马芳芳, 孙丰月, 李碧乐, 等. 黑龙江东安金矿床锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质与资源*, 2012, 21(3): 277-280.
- MA Fangfang, SUN Fengyue, LI Bile, et al. Zircon U-Pb ages of Dongan gold deposit in Heilongjiang Province: Geological implication[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(3): 277-280.
- [40] 徐学纯, 李雪菲, 赵庆英, 等. 内蒙古哈马尔乌拉花花岗斑岩的锆石 U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. *地质与资源*, 2011, 20(3): 161-166.
- XU Xuechun, LI Xuefei, ZHAO Qingying, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Hamaerwula pluton in Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2011, 20(3): 161-166.
- [41] WILDE S A, 吴福元, 张兴洲. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义[J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 35-50.
- WILDE S A, WU Fuyuan, ZHANG Xingzhou. The Mashan complex: SHRIMP U-Pb zircon evidence for a Late Pan-African metamorphic event in NE China and its implication for global continental reconstructions[J]. *Geochimica*, 2001, 30(1): 35-50.
- [42] 王海然, 赵红格, 乔建新, 等. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用[J]. *地质与资源*, 2013, 22(3): 229-232, 242.
- WANG Hairan, ZHAO Hongge, QIAO Jianxin, et al. Theory and application of zircon U-Pb isotope dating technique[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(3): 229-232, 242.
- [43] YUN Xiaorui, ZHANG Ying, LIANG Dingyong, et al. Granite thermal reservoirs in Lingshui area of Hainan Island and their significance to geothermal resources, China [J/OL]. *Energy Geoscience*: 100166 [2022-12-01]. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2023.100166>. DOI: 10.1016/j.engeos.2023.100166.
- [44] CHEN B, TIAN W, JAHN B M, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: Evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components [J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 118-137.
- [45] 陈贺贺, 朱筱敏, 黄捍东, 等. 基于碎屑锆石定年的饶阳凹陷蠡县斜坡沙河街组物源分析[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1955-1971.
- CHEN Hehe, ZHU Xiaomin, HUANG Handong, et al. Sediment provenance of Shahejie Formation in Lixian Slope of Raoyang Depression based on the detrital zircon dating analysis [J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1955-1971.
- [46] DU Linin, YANG Chonghui, GUO Jinghui, et al. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(17): 1782-1789.
- [47] FAN Wenbo, JIANG Neng, XU Xiyang, et al. Petrogenesis of the Middle Jurassic appinite and coeval granitoids in the Eastern Hebei area of North China Craton [J]. *Lithos*, 2017, 278/281: 331-346.
- [48] GUAN Hong, SUN Min, WILDE S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2002, 113(1/2): 1-18.
- [49] KRÖNER A, WILDE S A, LI J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(5): 577-595.
- [50] NIU Xiaolu, CHEN Bin, MA Xu. Petrogenesis of the Dengzhazi A-type pluton from the Taihang-Yanshan Mesozoic orogenic belts, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(2): 133-146.
- [51] 孙敏, 关鸿. 阜平杂岩年龄及其地质意义: 兼论前寒武高级变质地体的定年问题[J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 145-156.
- SUN Min, GUAN Hong. Zircon U-Pb ages of the Fuping Complex and their implications: Some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 145-156.
- [52] WANG Yuejun, FAN Weiming, ZHANG Hongfu, et al. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang mountains: Implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton [J]. *Lithos*, 2006, 86(3/4): 281-302.
- [53] WANG Yu, LI Huimin. Initial formation and Mesozoic tectonic exhumation of an intracontinental tectonic belt of the northern part of the Taihang Mountain belt, eastern Asia [J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(2): 155-172.
- [54] WILDE S A, ZHOU Xinhua, NEMCHIN A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia [J]. *Geology*, 2003, 31(9): 817-820.
- [55] WILDE S A, ZHAO Guochun, WANG Kaiyi, et al. First SHRIMP zircon U-Pb ages for Hutuo Group in Wutaishan: Further evidence for Palaeoproterozoic amalgamation of North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 83-90.
- [56] 许博, 刘阳. 太行神仙山髻髻山组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(3): 257-260.
- XU Bo, LIU Yang. SHRIMP U-Pb dating and its geological

- implications for zircon in the Tiaojishan group volcanic rocks of the Shenxian Mountain in the Taihang area [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(3): 257-260.
- [57] ZHAO Guochun, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 2002, 302(3): 191-226.
- [58] POSAMENTIER H W, KOLLA V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [59] WOOD L J, MIZE-SPANSKY K L. Quantitative seismic geomorphology of a Quaternary leveed-channel system, offshore eastern Trinidad and Tobago, northeastern South America [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(1): 101-125.
- [60] DUNLAP D B, WOOD L J, WEISENBERGER C, et al. Seismic geomorphology of offshore Morocco's east margin, Safi Haute Mer area [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(5): 615-642.
- [61] HUBBARD S M, SMITH D G, NIELSEN H, et al. Seismic geomorphology and sedimentology of a tidally influenced river deposit, Lower Cretaceous Athabasca oil sands, Alberta, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(7): 1123-1145.
- [62] Wood L J, Mize-Spansky K L. Quantitative seismic geomorphology of a Quaternary leveed-channel system, offshore eastern Trinidad and Tobago, northeastern South America [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(1): 101-125.
- [63] 关旭同, 李胜利, 马水平, 等. 湖盆小型细粒浅水三角洲沉积模式 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 77-85.
- GUAN Xutong, LI Shengli, MA Shuiping, et al. Sedimentary model of lacustrine small fine-grained shallow water delta [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 77-85.
- [64] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 7-14.
- ZHU Xiaomin, PAN Rong, ZHAO Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 7-14.
- [65] BRIDGE J S, TYE R S. Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(8): 1205-1228.
- [66] BLUM M D, TÖRNQVIST T E. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(S1): 2-48.
- [67] LECLAIR S F, BRIDGE J S. Quantitative interpretation of sedimentary structures formed by river dunes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(5): 713-716.
- [68] BRIDGE J S. Rivers and floodplains [J]. *Australian Geographical Studies*, 2003, 48: 386-387.
- [69] BHATTACHARYA J P, TYE R S. Searching for modern Ferron analogs and application to subsurface interpretation [M]// CHIDSEY T C, Jr, ADAMS R D, MORRIS T H. *Regional to Wellbore Analog for Fluvial-Deltaic Reservoir Modeling: The Ferron Sandstone of Utah*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004: 39-57.
- [70] BRIDGE J S, MACKEY S D. A revised alluvial stratigraphy model [M]// MARZO M, PUIGDEFÁBREGAS C. *Alluvial Sedimentation*. Gent: The International Association of Sedimentologists, 1993: 317-336.
- [71] BRIDGE J S, MACKEY S D. A theoretical study of fluvial sandstone body dimensions [M]// FLINT S S, BRYANT I D. *The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues*. Gent: The International Association of Sedimentologists, 1993: 213-236.
- [72] 孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 等. 渤海湾盆地冀中拗陷中区中新世复合伸展构造 [J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 484-491.
- SUN Dongsheng, LIU Chiyang, YANG Minghui, et al. Study on complex extensional structures in the middle Jizhong Depression in the Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 484-491.
- [73] SCHWARTZ T M, FOSDICK J C, GRAHAM S A. Using detrital zircon U-Pb ages to calculate Late Cretaceous sedimentation rates in the Magallanes-Austral Basin, Patagonia [J]. *Basin Research*, 2017, 29(6): 725-746.
- [74] BISHOP P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1995, 19(4): 449-473.
- [75] MATHER A E. Adjustment of a drainage network to capture induced base-level change: An example from the Sorbas Basin, SE Spain [J]. *Geomorphology*, 2000, 34(3/4): 271-289.
- [76] LAMMINEN J, ANDERSEN T, NYSTUEN J P. Provenance and rift basin architecture of the Neoproterozoic Hedmark Basin, South Norway inferred from U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of conglomerate clasts and detrital zircons [J]. *Geological Magazine*, 2015, 152(1): 80-105.
- [77] 袭著纲, 国景星, 赵晓颖. 冀中拗陷饶阳凹陷中北部古近纪沙河街组古生态分析 [J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(4): 358-363.
- XI Zhugang, GUO Jingxing, ZHAO Xiaoying. Palaeoecological analysis of Paleogene Shahejie Formation in north central Raoyang Sag of central Hebei Depression [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(4): 358-363.
- [78] 陶明华, 王开发, 郑国光, 等. 冀中拗陷早第三纪孢粉组合及地质时代讨论 [J]. *微体古生物学报*, 2001, 18(3): 274-292.
- TAO Minghua, WANG Kaifa, ZHENG Guoguang, et al. Early tertiary sporopollen assemblages from Jizhong Depression and their stratigraphic implication [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2001, 18(3): 274-292.
- [79] SMITH G A. Climatic influences on continental deposition during late-stage filling of an extensional basin, southeastern Arizona [J]. *GSA Bulletin*, 1994, 106(9): 1212-1228.
- [80] FORDHAM A M, NORTH C P, HARTLEY A J, et al. Dominance of lateral over axial sedimentary fill in dryland rift basins [J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(3): 299-304.

(编辑 张玉银)