

渤海湾盆地渤中凹陷埕岛东坡古近系东营组 二段下部源-汇系统

杨 棵^{1,2},董艳蕾^{1,2},朱筱敏^{1,2},潘 荣^{1,2},张梦瑜^{1,2},伍 炜^{1,2},王 珩^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:源汇系统是当今沉积学领域研究的热点。埕岛东坡位于渤海湾盆地,是埕北低凸起向沙南凹陷、渤中凹陷过渡的斜坡带,与埕北低凸起及其沉积区组成完整的源-汇系统。基于岩心、测井和三维地震等资料,明确物源区基岩类型、恢复东(东营组)二段古地貌格局、定量分析源-汇要素,精细刻画沉积区砂体的展布,建立研究区源-汇系统耦合模式。研究表明,研究区东二段下部主要发育的孤立洪水湖底扇沉积物均来自埕北低凸起,物源区基岩组成为碎屑岩和火山碎屑岩。砂体在沉积区的展布和规模主要受物源类型、垂向高差、汇水单元面积、搬运通道规模、坡折带、沉积区古地貌等因素影响。其中,沉积区沉积物总量与物源区垂向高差及汇水单元面积密切相关,即垂向高差大(平均垂向高差约1 280 m)、汇水单元面积大(平均汇水面积约7 km²),沉积区形成的扇体规模越大;反之,沉积扇体规模越小。此外,坡折带和沉积区古地貌也控制着扇体规模。文中划分出了地形坡折和断裂坡折两种坡折带类型,并定量统计坡折带坡角参数(最小为3.9°,最大为9.8°),数据反映坡折角度与扇体厚度和面积均呈正相关。同时,搬运通道的规模(宽深比和截面积)也影响着砂体展布。总体而言,研究区东二段沉积时期的源-汇系统配置关系较为稳定,并最终构建了多岩性源区(物源区)-古沟谷或断槽的物源通道-地形坡折/断裂坡折搬运通道(搬运区)-孤立洪水湖底扇(沉积区)-源沟坡多元耦合模式,将砂体规模与其来源形成了对应关系,为油气勘探中的砂体寻找提供了思路。

关键词:源-汇系统;东营组;埕岛东坡;济阳拗陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Analysis of the “Source-to-Sink” system in the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in the eastern slope of Chengdao in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

YangKe^{1,2}, DongYanlei^{1,2}, Zhu Xiaomin^{1,2}, Pan Rong^{1,2}, Zhang Mengyu^{1,2}, Wu Wei^{1,2}, Wang Heng^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: “Source-to-Sink” system is a hot topic in recent sedimentology research. The eastern slope of Chengdao, which constitutes a complete “Source-to-Sink” system together with Chengbei low salient and its surrounding depositional areas, is a transitional slope zone from Chengbei low salient to Shanan and Bozhong Sags, and located in Bohai Bay Basin. Based on the core, logging and 3D seismic data, we defined the basement rock types of provenance, reconstructed the palaeogeomorphology of the 2nd member of Dongying Formation (Dong 2 member), made a quantitative analysis of elements in the “Source-to-Sink” system, finely mapped the sand bodies within the depositional area, and established the coupling model of the “Source-to-Sink” system in the eastern slope of Chengdao. The results show that the isolated flood sublacustrine fan deposits, being predominant in the Dong 2 member, are all sourced from Chengbei low salient, and their basement rocks are composed mainly of clastic and pyroclastic rocks. The distribution patterns and scales of sand bodies in depositional areas are mainly controlled by source type, relief, area of catchment, size of transportation pathways, slope break zone, palaeogeomorphology of depositional area and so on. Among them, the total volume of sediments imputing into the

收稿日期:2018-06-13;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:杨棵(1993—),男,硕士研究生,层序地层学与地震沉积学。E-mail:1448019312@qq.com。

通讯作者简介:朱筱敏(1960—),男,教授、博士生导师,沉积学和层序地层学。E-mail:xmzhu@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202078)。

depositional area is closely related to the relief and the catchment area. The larger the relief(averaging at about 1 280 m) and catchment area(averaging at around 7 km²) are, the larger the scale of the fan system will be; on the contrary, the fan system contracts accordingly. In addition, the palaeogeomorphology in the depositional area and slope break zone also exert an important control on the size of fan system. Two types of slope break zones were recognized in this study, namely the topographic and fault slope break zones. The angles of the slope break zones range between 3.9° and 9.8°, and show a positive correlation with both the fan body thickness and area. Meanwhile, the size of transportation channels(width/depth ratio and cross-sectional area) also determines the distribution characteristics of sand bodies. In summary, the elements in the “Source-to-Sink” system in the study area are relatively stable during the deposition of the study interval. Finally, we proposed a multi-factor coupling model of source areas with multiple lithologies(provenances) -channels of paleo-ravines or fault troughs within provenance-transportation pathways of topographic/fault slope break zones(transportation area) - isolated flood sublacustrine fan(sinks). This model establishes the relationship between the size of sand bodies and their provenances, and provides potential implications for predicting favorable sand bodies in future oil and gas exploration.

Key words: “Source-to-Sink” system, Dongying Formation, eastern slope of Chengdao, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

地球自 46 亿年前诞生以来,经历了漫长的地质演化过程,形成了地表上丰富的地貌单元。根据地貌在成因上的差异,可将其分为造山带或隆起区的剥蚀地貌,以及盆地区的沉积地貌^[1-2]。造山带或隆起区在特定环境下遭受风化剥蚀,形成造山带侵蚀区,或其上的早期沉积物在山前堆积,形成物源。经过地球表层的动力作用,山前剥蚀带的沉积物经沉积路径系统被搬运至汇水盆地接受沉积,从而在盆地区形成不同的沉积体系,如三角洲、冲积扇、湖底扇等。可以说,正是由于剥蚀地貌和沉积地貌通过沉积路径彼此联系,才形成了源-汇系统^[1,3-5]。

近年来,沉积盆地的源-汇系统受到了越来越广泛的关注,但这一概念并非首次出现。1972 年,Meade 基于对美国西部晚全新世形成的滨岸边缘的研究,首次提出了源-汇概念,他指出了山坡、河流以及土壤对物源的贡献,并将接受物源供应的滨岸和陆架称为沉积汇水区^[6]。此后的 20 余年间,又有多位学者对这一问题展开了系统性研究。

进入 21 世纪以后,美国自然科学基金会公布了《洋陆边缘科学计划 2004》,将源-汇系统列为了重点研究领域之一,更加明确地提出了针对该领域的研究对象和研究方法,开始将源-汇系统与沉积学紧密结合起来^[5-8]。在 2010 年的美国 AAPG 年会上,源-汇系统再次受到了广泛关注。

源-汇系统作为一种新的研究思路,在许多研究中都有体现。例如,徐长贵在研究渤海海域时提出了陆相断陷盆地源-汇时空耦合的控砂思想与控砂模式,将有效物源体系、高效汇聚体系和基准面转换体系

归纳为源-汇时空耦合体系,大大提高了对研究区砂体和储层的预测能力^[5]; Sømme T O 等将源-汇思想应用于挪威上白垩统海相扇体的研究上,并综合运用了地震、测井、岩心等资料,对研究区的沉积背景、动力机制、扇体演化进行了全面分析^[9]; Bentley S S J 等将目光投向了美国密西西比河,通过对该区域的构造运动、气候变化、人类活动等因素的评估,明确了密西西比河在新近纪的演化过程和源-汇关系^[10]。

埕岛东坡从沙河街组一段(以下简称为沙一段)东营组主要发育了曲流河沉积、辫状河三角洲沉积、重力流沉积,以及生物滩、滨浅湖滩坝等沉积体,沉积类型可谓丰富多样。按照源-汇思想,沉积盆地多样的沉积类型势必来自于物源区丰富的物源供给,而物源区和沉积区的空间耦合关系决定了有利砂体的展布。因此,追踪研究区的物源及其搬运路径便显得尤为重要。

本文基于渤海湾盆地济阳拗陷埕岛东坡最新处理的三维地震资料、12 口岩心资料和 86 口钻、测井资料,以东二段下部 EdⅣ砂组为目的层,结合全区的区域构造背景和地震沉积学精细刻画,恢复了目的层的古地貌,综合分析了目的层沉积体的源-汇过程及其各要素之间的耦合关系。

1 研究区概况

本研究区(埕岛东坡)位于渤中凹陷交汇于济阳拗陷的边界地带,从埕北低凸起东南部开始,延伸至渤中凹陷,有利勘探面积近 300 km²(图 1)。

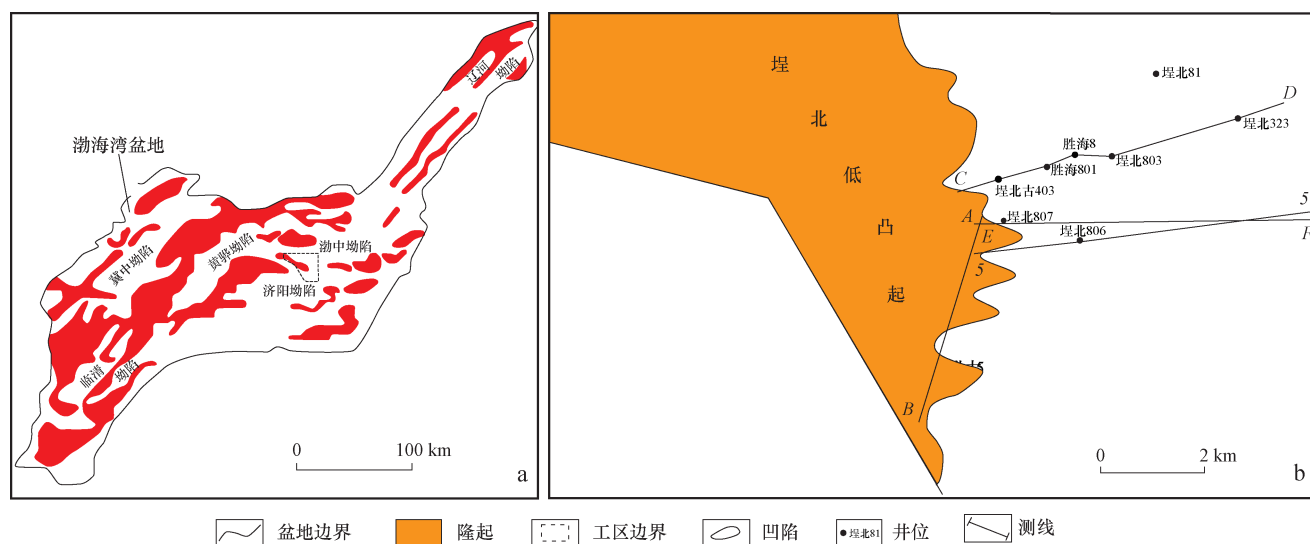


图1 济阳坳陷埕岛东坡位置

Fig. 1 Location of the eastern slope of Chengdao(a) and major well locations of the study area(b) in Jiyang Depression

a. 研究区位置; b. 研究区主要井位分布

研究区四周被凹陷所包围,向南以埕北断层为边界与埕北凹陷相邻,东南方向以断层为界紧邻桩东凹陷,而东北逐渐过渡为斜坡带并与渤中凹陷相邻。渤中凹陷是渤海海域面积最大的凹陷,为断陷型盆地,在古近系历经了沙河街组断陷期和东营组拗陷期两个构造演化阶段^[11],该区域为本文所述源-汇系统的主要汇区(沉积区)。

东营组沉积时期,渤中凹陷快速下沉,沉积厚度达约2 800 m,逐渐成为整个渤海湾盆地的主要沉积中心。埕岛东坡东营组地层按岩电性组合和沉积旋回可划分为东一段、东二段、东三段,共包括东营组Ed I、Ed II、Ed III、Ed IV、Ed V、Ed VI 6个亚段。本文主要针对位于东二段下部的Ed IV亚段展开探讨。沉积相方面,Ed IV亚段的沉积环境为半深湖沉积,发育洪水湖底扇(图2)。

根据精细化勘探的需要,并结合地震、测井、沉积学等方法 and 理论,本文将Ed IV亚段细分为Ed IV¹、Ed IV²和Ed IV³ 3个砂组。从沉积旋回的角度看,Ed IV亚段对应于1个三级层序(SQ4),相当于1个长期旋回,其内部又可划分为3个中期旋回(基本对应于Ed IV¹、Ed IV²和Ed IV³砂组)和6个短期旋回(Ed IV¹¹、Ed IV¹²、Ed IV²¹、Ed IV²²、Ed IV³¹和Ed IV³²亚砂组)。每个短期旋回基本对应于一根地震同相轴(图3)。

2 源-汇系统要素特征

埕北低凸起位于渤海海域西南部,夹持在埕北凹陷和沙南凹陷之间,呈北西走向,面积为660 km²,凸起

西段为地垒结构,东段为南断北超的单面山^[12]。古近系东营组沉积期,研究区的凸起带及其沉积区(斜坡带、洼陷带)组成了一套完整的源-汇系统。基于最新的钻井资料和三维地震资料,并结合源-汇系统理论,精细刻画了埕北低凸起前寒武系的基岩组成、汇水单元分布、搬运体系类型及规模、沉积体系时空展布特征,有利于探讨目的层段源-汇系统配置关系及差异性,指导沉积区有利储集砂体的预测。

2.1 物源体系

物源体系是源-汇系统的重要部分,也是沉积砂体存在的物质基础,物源区汇水单元及基岩性质研究可指导预测源-汇系统内物源区不同区带分化、剥蚀差异和沉积区沉积组分特征,作为沉积盆地演化与古环境恢复的重要依据^[9,13-14]。

2.1.1 基岩组成

根据埕岛-桩海地区中生界顶部岩相分布图(图4)可知,研究区沉积区中生代顶部岩石类型以碎屑岩为主,也发育火山碎屑岩,其中埕北低凸起源区及沉积区中生界缺失,主要出露上古生界海陆交互相碎屑岩。因此,研究区物源区可向沉积区提供碎屑岩、火山岩碎屑岩及火山岩等物源。

2.1.2 汇水单元刻画

基于对埕北低凸起基岩组成的分析得知,研究区基岩以碎屑岩、火山碎屑岩及片麻岩为主。凸起区的基岩经过风化剥蚀形成的陆源碎屑,可通过水流

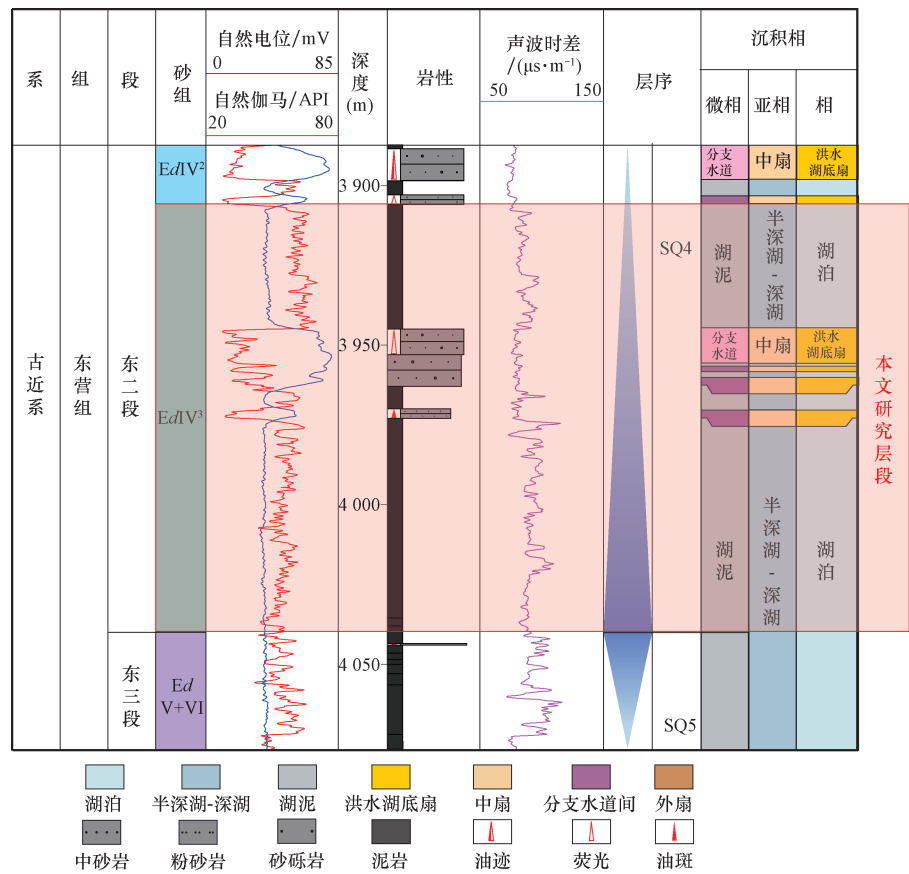


图 2 济阳坳陷埕岛东坡埕北 323 井综合柱状图

Fig. 2 Composit stratigraphic column of Chengbei Well 323 in the eastern slope of Chengdao in Jiyang Depression

搬运进入沉积盆地沉积。流水搬运沉积物的通道称为搬运通道。因此,沉积物通过搬运通道搬运至盆内腹地低势区沉积,湖盆内是碎屑岩沉积体的主要场所。

通常情况下,古地理格局(古地貌)能直观地反映凸起区的地貌特点,有利于汇水单元的刻画,同时,古地貌又制约着盆地的可容空间^[15],因此,恢复研究区的古地貌便显得尤为重要。目前,恢复古地貌的方法有很多,如地层对比法、残余厚度法、印模法、层序地层恢复法等^[16],本次研究采用“印模法”对目的层段的古地貌进行了恢复。这种方法利用了侵蚀面上覆地层与下伏地层存在镜像关系这一特点,即地势较低的区域对应的上覆地层较厚,地势较高的区域对应的上覆地层较薄^[17]。在恢复出的目的层古地理格局图上,根据埕北低凸起的古地貌展布,识别了 7 条搬运通道(V_1-V_7) (图 5),并以与凸起长轴方向平行的分水岭(最高点的连线)为界,从北向南依次划分了 7 个汇水单元(a—g),其中黑色虚线为汇水单元边界(图 5a)。在汇水单元内,结合地形坡度和沟谷分布,刻画出主水系和分支水系。通过定量刻画不同汇水单元的参数可以看出,水系在 f 区内延伸

最长,达 2.2 km,垂向高差为 0.121 km,汇水面积为 8.6 km²。此外,b 区、c 区和 d 区均有较长的水系长度(分布为 1.8、1.9 和 1.6 km),较大的垂向高差(分别为 0.121、0.133 和 0.144 km)和汇水面积(分别为 6.4、6.5 和 9.3 km²)。不同沟道的汇水面积大小、垂向高差等参数有较大差异。

2.2 搬运体系

2.2.1 搬运通道(输砂体系)类型

埕北低凸起的基岩在风化剥蚀作用下形成碎屑,沿搬运(输砂)通道向沉积区搬运,最终沉积并固结成岩。由于研究区经历了多次强烈构造运动,区内发育多条断层,并在沙河街组早期开始进入断陷阶段,因此,从凸起到沉积区的物源供给受到断层的影响。基于此,并根据输砂体系的分类方案,本次研究将搬运碎屑物质的通道按形成原因分为了古沟谷型和断槽型两种类型^[5] (图 5c)。前者则由基准面下降后的河流下切侵蚀形成,它不仅是凸起向盆地输送沉积物的通道,同时古沟谷本身也可形成良好的储集体;后者为断层两盘相互错动形成,垂向高差通常较大^[18]。

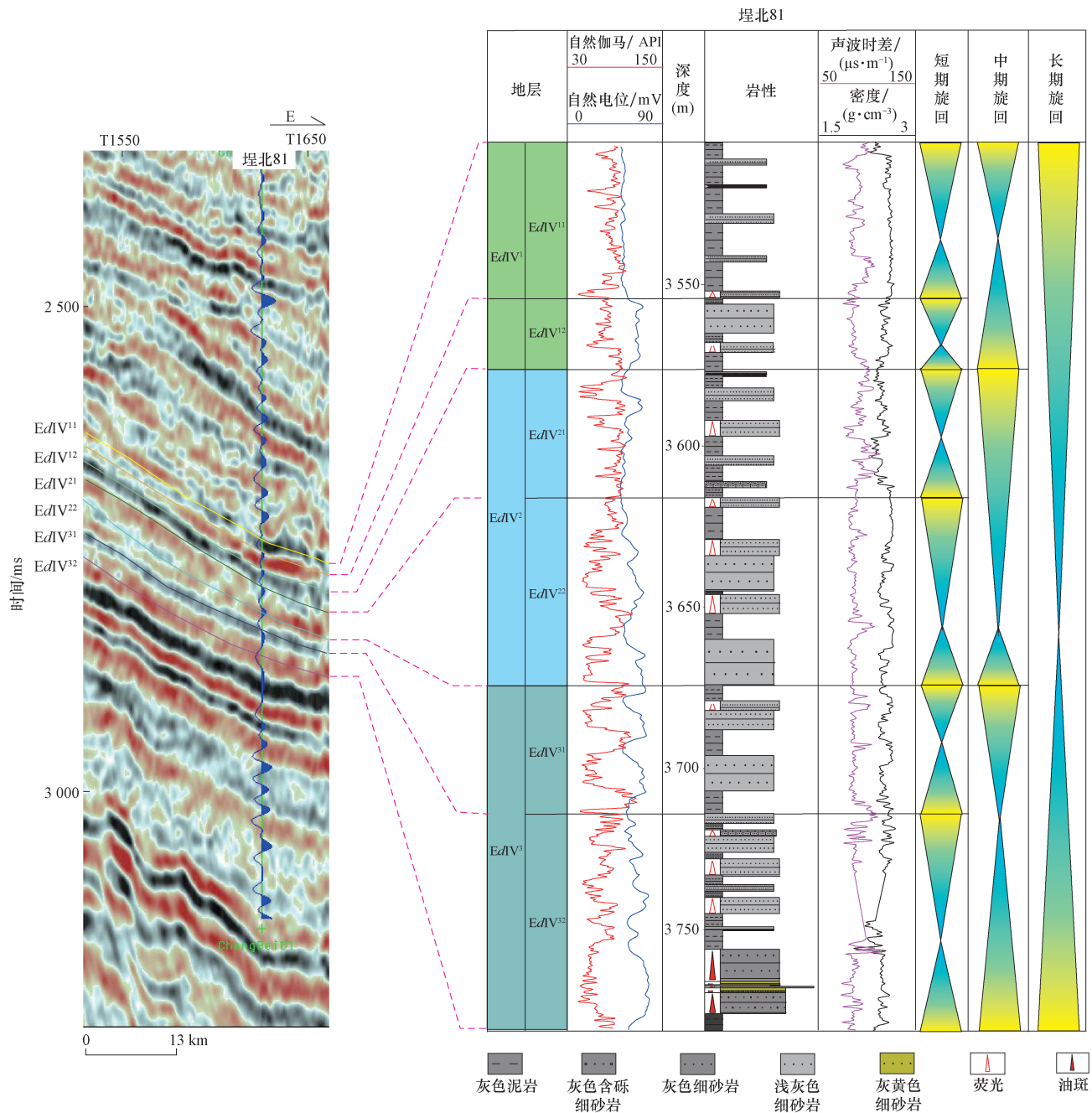


图3 济阳坳陷埕岛东坡埕北81井东营组高分辨层序地层划分及地震响应

Fig.3 High resolution stratigraphic sequence division and seismic responses of the Donying Formation in Well Chengbei - 81 in the eastern slope of Chengdao, Jiyang Depression

此外,古沟谷(亦可称为下切河谷)按其剖面形态又可划分为V型、U型和W型3种类型。V型沟谷主要由河流下切侵蚀形成,水动力往往较强,但搬运的沉积物磨圆较差,分选不均;U型沟谷则发育于壮年期的河流中,沉积物的充填样式有垂向或侧向叠置两种,水动力较V型沟谷弱,但其搬运的沉积物磨圆和分选均较好;W型沟谷则是河流晚期迁移、分叉形成,水动力最弱,携带的沉积物较细^[18]。从现代河流环境可以看出,河流上游高势区往往发育V型沟谷,流入低势区

后则依次发育U型沟谷和W型沟谷,因此,运用将今论古思想可以推断古代河流也应同样如此。古沟谷能控制沉积物的搬运方向,有利砂体往往位于古沟谷的前方^[16,19-20]。

基于上述的搬运通道分类方案,根据凸起区基岩组成、汇水单元刻画,再结合古地貌,选取了NW-SE方向的地震格架剖面,并在平面上对沿搬运通道分布的单井岩性进行了分析(如过V₁通道的胜海801井和过V₄通道的埕北817井,从中能看出明显的河流侵蚀

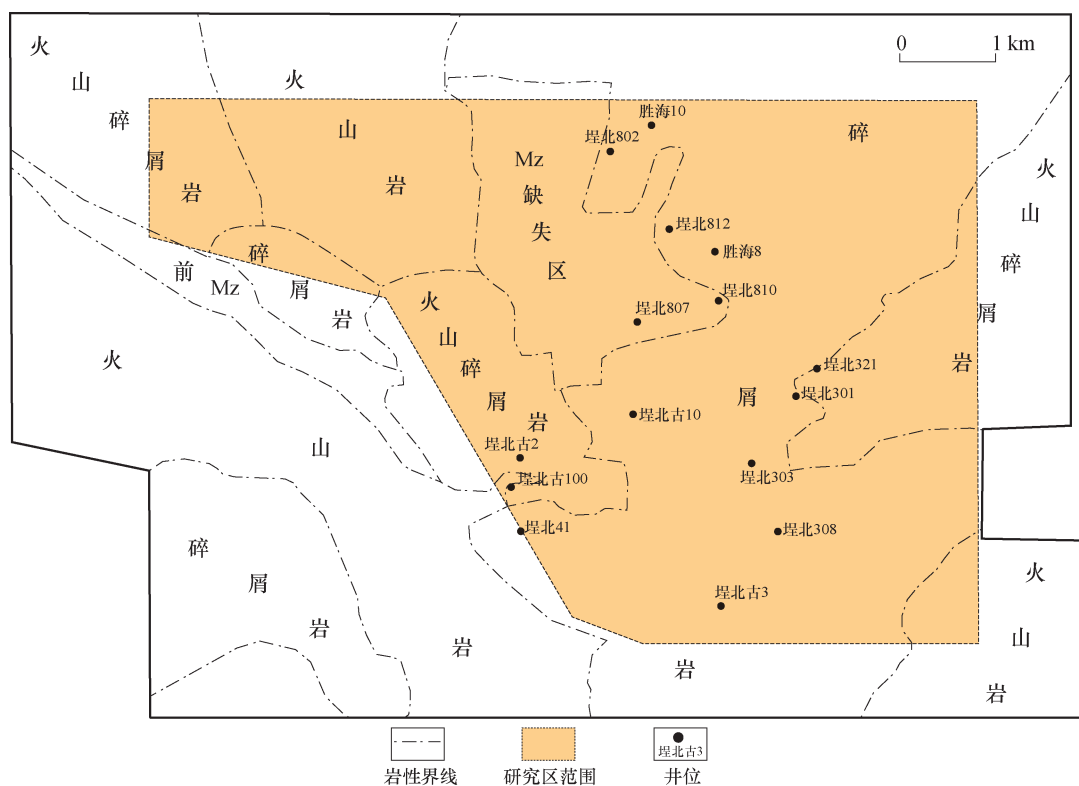


图4 济阳坳陷埕岛-桩海地区中生界顶部岩性分布

Fig. 4 Lithologic distribution of the top Mesozoic in Chengdao-Zhuanghai area in Jiyang Depression

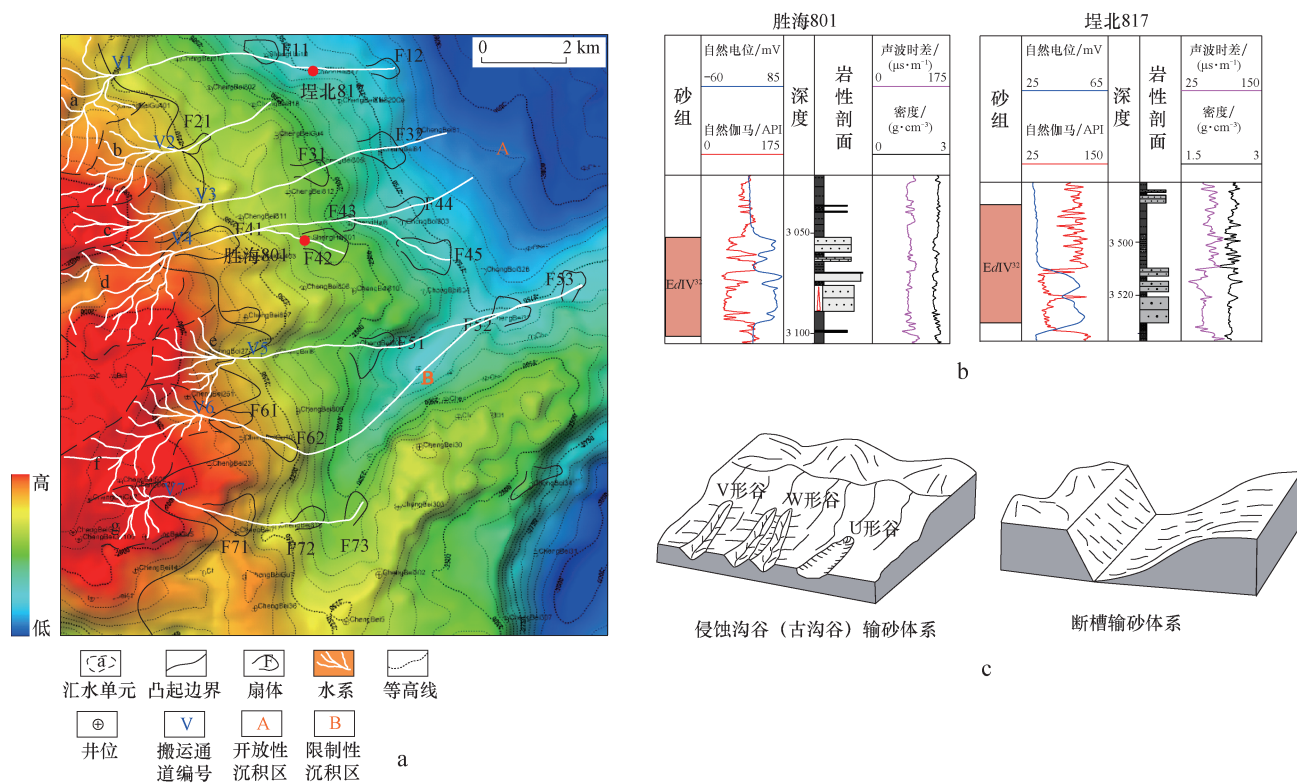


图5 埕北低凸起古地理格局与汇水单元划分

Fig. 5 Palaeogeomorphology and catchment unit division of Chengbei low salient

a. EdIV³²砂组地貌俯视图;b. V₁和V₄沟谷内岩性图;c. 陆相盆地输砂体系类型^[5]

形成的二元沉积结构)(图5b,图6),明确了东二段下部EdIV³²砂组的物源通道类型。埕北低凸起北侧缓坡带虽然主要受到的是侵蚀坡折带作用,地形坡度相对平缓^[20],但从地震格架剖面上显示也同时存在局部小型断层,同时,在断裂平面分布图上亦能明显看出通道V₂处有平行于通道延伸方向的断层(图7c)。因此,由断层控制的断槽(V₂和V₃)与由河流侵蚀产生的古沟谷(V₁,V₄,V₅,V₆和V₇)(研究区主要发育U型及V型古沟谷)在本区均有发育,凸起区的碎屑物质同时通过这两种类型的搬运通道向沉积区供源。

2.2.2 搬运通道定量刻画

通过定量统计不同搬运通道的宽度、深度、宽深比和截面积等参数(表1),可综合表征搬运沉积通量。在断槽V₂和V₃中,V₃的宽度、深度和宽深比大,依次为0.474 km,0.105 km和4.50,截面积为0.024 km²,表明沉积物其在断槽中的搬运通量最大;反之,V₂的搬运能力小于V₃。在古沟谷V₁,V₄,V₅,V₆和V₇中,V₆的宽度、深度和宽深比最大,依次为1.218 km,0.107 km和11.40,截面积为0.065 km²,反映其在古沟谷中的搬运通量最大,其余四条古沟谷的搬运通量从大到小依次为V₁>V₇>V₄>V₅。通过对断槽和古沟谷的参数统计可知,断槽V₂、V₃的平均宽深比为3.39,平均截面积为0.018 km²;古沟谷V₁,V₄,V₅,V₆和V₇的平均宽深比为7.874,平均截面积为0.044 km²。因此,综合对比断槽与古沟谷的参数可知,古沟谷的搬运沉积物总量大于断槽。

2.3 沉积体系

2.3.1 沉积相

在研究区东西向地震剖面中,靠近盆腹沉积区发育进积反射,且振幅相对较强(图7a)。沉积物向盆地的推进过程可以形成进积地震反射结构,其进积的方向可大致代表物源和水流方向,且在地震剖面上较容易识别。表明研究区沉积区物源主要受来自西部多物源供源的影响,东西向进积地震反射结构明显,推测其物源相对充足,发育洪水湖底扇,扇体规模偏小,但数量较多,物源为西部埕北低凸起。

对于沉积相的平面展布,本文采取了地层切片的方法。从地层切片可以看出,EdIV³沉积期,强波阻抗(红色)分布于整个沉积区(图7b)。自研究区西部埕北低凸起向东,物源区有约7条主沟道为盆内供源(图7c中白色实线),沉积区内也存在两条坡折带控制沉积砂体的展布(图7c中红色虚线段)。从地层切片可以看出,研究区内主要发育孤立的湖底扇。

2.3.2 沉积区坡折发育特征

沉积区(凹陷区)是接受从物源区(凸起区)搬运而来的碎屑物质的区域,它是沉积砂体的有利区域。从古地貌格局上可以明显看出,沉积区具有两种不同的地貌特点——以搬运通道V₅为界,沉积区南北沉积条件有较大差异,其中,北部沉积区地貌开阔平坦,可容纳砂体沉积的空间较为开阔;南部沉积区地貌局限,

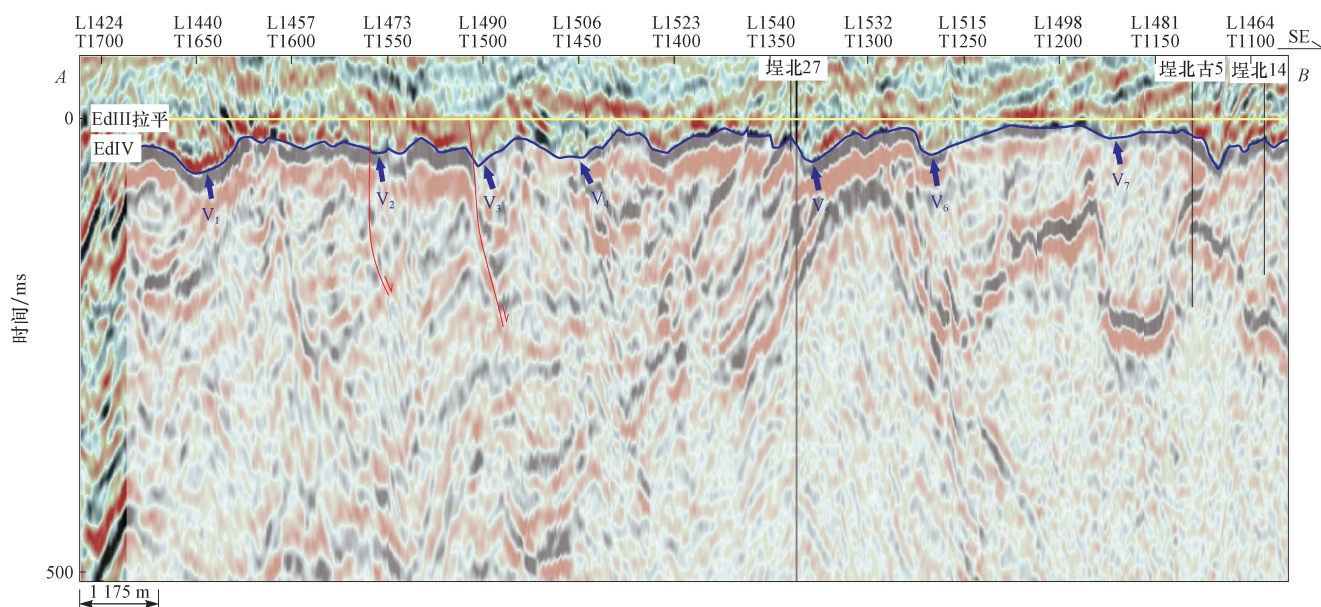


图6 埕北低凸起物源通道地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 Seismic section of source channels on Chengbei low salient (see Fig. 1 for the section location)

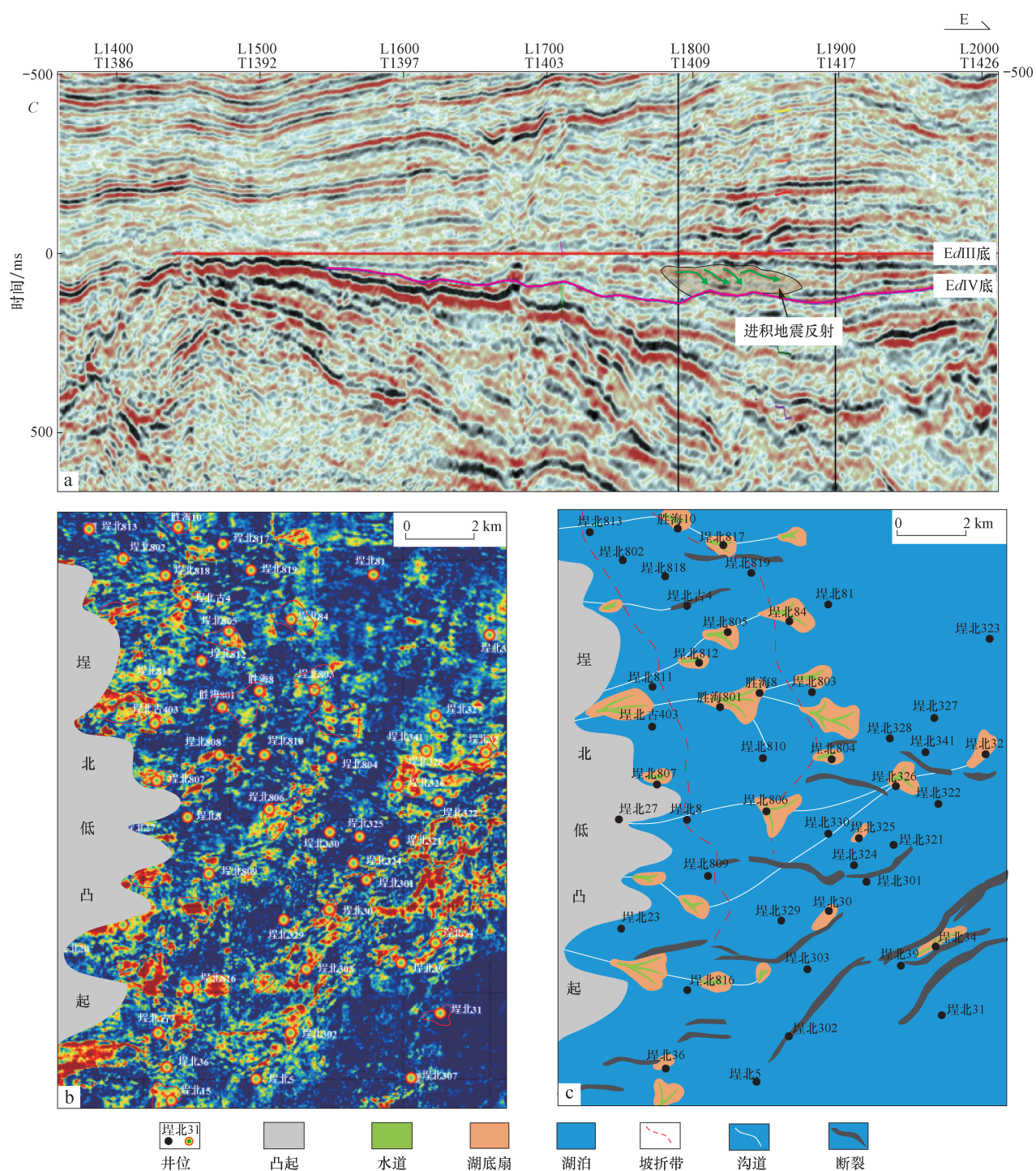


图 7 埕岛东坡 EdIV³²东西向地震剖面(a)(剖面位置见图 1);埕岛东坡 EdIV³²波阻抗属性图(b);
埕岛东坡 EdIV³²沉积相图(c)

Fig. 7 EW-trending seismic section(a) (see Fig. 1 for the section location), impedance attribute map(b),
sedimentary facies map(c) of the EdIV³² in the eastern slope of Chengdao

可容空间变小。根据可容空间大小将沉积区划分为两大沉积单元,这样划分既可以了解搬运通道在沉积区地貌控制下的延伸特点,也能明确不同地貌控制下砂体展布的特征。

此外,本沉积区的砂体展布除了受到沉积区古地

貌的控制,还受到沉积区坡折带变化的控制。坡折带是地貌坡度发生突变的地带,它对沉积体系的类型、展布和层序样式具有重要的控制作用^[20]。不同的坡折特征对砂体的分布样式有着不同的控制作用^[21-23]。从古地貌格局图上能定性识别出沉积区具有两个不

表 1 埕岛东坡东二段 EdIV³²砂组物源通道剖面
参数统计

Table 1 Parametric statistics of the source channels within
the Paleogene Dong 2 member (EdIV³²) in the eastern slope
of Chengdao

搬运通道及 类型编号	古沟谷					断槽	
	V ₁	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₂	V ₃
宽度/km	1.186	0.553	0.553	1.218	0.664	0.237	0.474
深度/km	0.107	0.106	0.106	0.107	0.104	0.104	0.105
宽深比	11.13	5.24	5.22	11.40	6.38	2.28	4.50
截面积/km ²	0.063	0.029	0.029	0.065	0.034	0.012	0.024

同的坡折带,自西向东依次发育地形坡折(第一坡折带)和断裂坡折(第二坡折带)(图 8a)。

同时,沿搬运通道从北向南依次拾取了 6 条过坡折带任意测线,并通过对地震格架剖面上坡折带的定量分析,统计出了两条坡折带的不同沟道处坡角参数(表 2)。从图 3 可知,V₄ 搬运通道的扇体沉积最为发育,其次是搬运通道 V₅。可见坡折角度太大或太小均

不利于砂体沉积发育。需要特别指出的是,搬运通道 V₂ 只经过了第一坡折,且其经过的坡角偏小,分别为 3°,因此从坡角参数可以推测,V₂ 的搬运距离远不及其他搬运通道,砂体的沉积规模也不及其他搬运通道所对应的砂体规模。

将两类坡折发育位置及角度、扇体分布边界及单井砂地比值(图 5a,图 8a,图 8b)对比分析,扇体分布主要集中于断裂坡折带下倾方向,而地形坡折带下倾方向分布相对较少;显然扇体发育可能与坡折类型相关,而与坡折角度大小相关性偏小(图 8c)。

2.3.3 沉积区沟道发育特征

通常来说,沉积物搬运通道内通道规模与沉积区砂体沉积规模有一定的相关性。本次研究表明,向盆地方向,沉积物搬运通道沟道截面积越来越大,宽深比也越来越大,且沟道的类型由 V 型向 U 型甚至碟型转化。特选取最大规模扇体所对应的搬运通道 V₄,在其上依次截取了 3 条地震剖面(V₄₁,V₄₂,V₄₃)(图 9),通

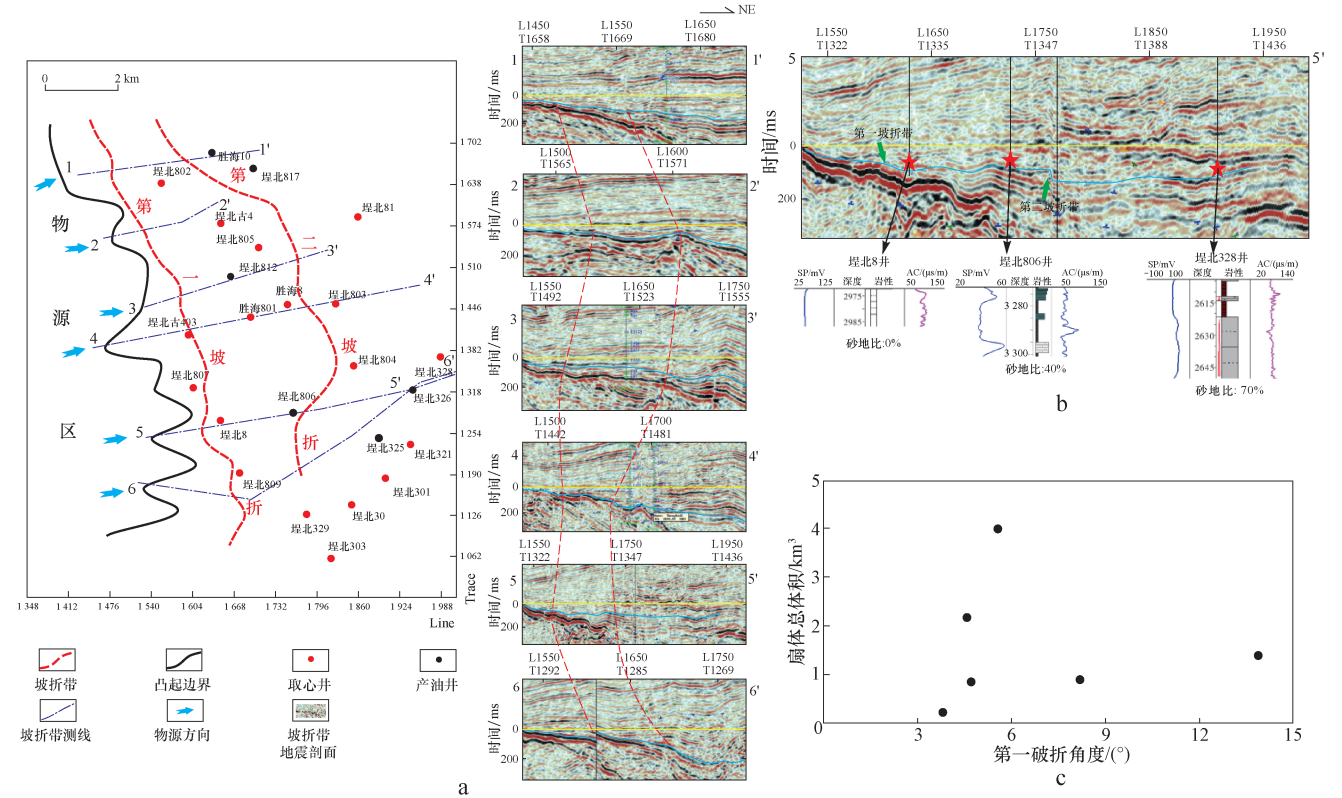


图 8 埕岛东坡东二段下部 EdIV³²砂组坡折带发育特征(a);埕岛东坡东二段下部 EdIV³²砂组坡折带发育
与砂体分布关系图(b)(地震剖面位置见图 6(a));埕岛东坡东二段下部 EdIV³²第一坡折角度与最
大扇体体积关系图(c)

Fig. 8 Characteristics(a), the relationship between the slope break zone and the sandbody distribution(b)(see Fig. 6(a) for
the profile location), and the relationship between the first slope break angle and the maximum fan volume(c), of the EdIV³²
in the eastern slope of Chengdao

表 2 埕岛东坡 EdIV³²砂组坡折带坡角参数
Table 2 Angles of the slope break zone in the EdIV³²
of the eastern slope of Chengdao

任意测线编号	对应搬运通道	第一坡折 坡角/(°)	第二坡折 坡角/(°)
11′	V ₁	7.0	3.9
22′	V ₂	3.0	无
33′	V ₃	7.2	9.8
44′	V ₄	7.0	8.6
55′	V ₅	7.7	4.6
66′	V ₆	4.8	8.8

注:搬运通道 V₇ 处无明显坡折变化;根据占地貌布局和扇体展布, 22′测线对应的 V₂ 沟谷未延伸至第二坡折,故该处未纳入统计。

过定量统计通道在沉积区的延伸过程中的规模变化,进而明确沉积区搬运通道与砂体规模的关系。研究表明,沉积区搬运通道(渠)的规模从源区水系到沉积区水系逐渐变小,表现在截面积和宽深比增大同时,沟道宽度越来越大,深度越来越小,水流的下切作用和搬运能力相对减弱,碎屑沉积物逐步卸载沉积。

2.4 源－汇系统耦合关系

2.4.1 源－汇要素相关性

源－汇系统是一个完整的整体,包含了从物源区到沉积区的所有地质要素。这些要素看似独立,实际

则相互联系。源－汇系统各要素的联系又决定了系统内各部分耦合关系的好坏。本研究区中,控制砂体沉积规模的要素主要为物源区岩石类型、汇水单元面积、搬运通道规模、研究区古地貌等。因此,统计源－汇系统的主要参数(表 3),充分考虑和分析各要素之间的相关性,从而能够确定控制研究区源－汇过程的主要因素,进而对该地区的砂体展布形成更完整、可靠的认识。

1) 物质组成及供给量

物源区岩石的物质组成决定了沉积区岩石的种类和分布。本次研究的物源区位于埕北低凸起,其机械风化形成的碎屑颗粒较粗,抗压实能力也较强。

在基岩组成、搬运通道类型和规模相近的条件下,分别对比物源区的垂向高差和扇体规模(扇体面积、厚度和体积)可知,垂向高差与扇体规模呈明显的正相关,反映出较大的垂向高差能为沉积物向前推进提供较大的动力。如果将物源区汇水单元面积考虑在内,则发现大规模扇体所对应的汇水面积也较大。因此,垂向高差越大,物源供给量越大,对应的扇体规模也越大;同时汇水面积越大,对应的扇体规模也越大。

2) 优势堆积方向及搬运通量

研究区的搬运区内发育古沟谷和断槽两种搬运通道。在同种类型的搬运通道中,通道的尺寸(宽深比及截面积)能反映出其搬运通量的大小,进而决定沉积体

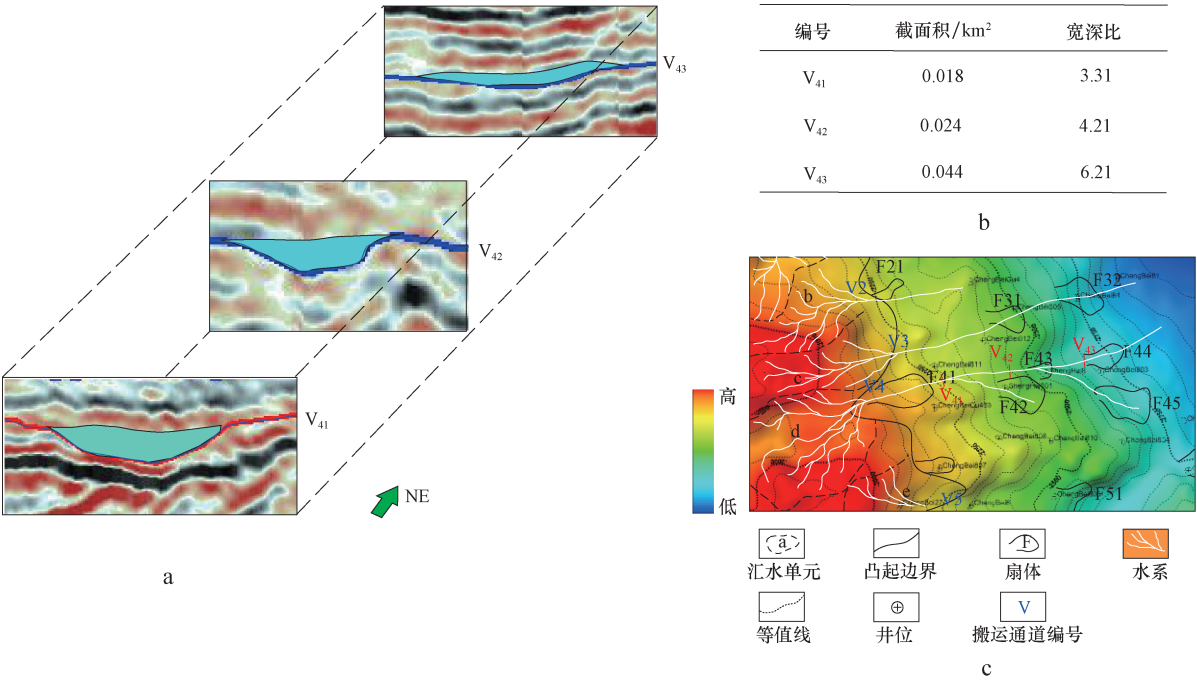


图 9 埕岛东坡 EdIV³²搬运通道(V₄)规模演变与定量统计
Fig. 9 Evolution of transport pathways(V₄) in scope and quantitative statistics of the EdIV³² in the eastern slope of Chengdao
a. V₄ 古沟谷的演变;b. V₄ 古沟谷的定量统计;c. V₄ 平面位置

表 3 埕岛东坡 EdIV³²砂组源-汇系统各要素定量表征
Table 3 Quantitative characterization of the elements in the “Source-to-Sink” system of the EdIV³² sandstone in the eastern slope of Chengdao

基岩组成	物源区					搬运区			沉积区				
	汇水单元	汇水面积/ km ²	垂向高差/km	水系长度/ km	通道类型	通道编号	宽深比	截面积/ km ²	沉积单元	沉积单元类型	最大扇体面积/km ²	最大扇体厚度/m	最大扇体体积/km ³
碎屑岩、火山碎屑岩及片麻岩	a	5.9	0.131	1.1	古沟谷	V ₁	11.13	0.063	A	开放性	0.52	7	0.003 6
	b	6.4	0.121	1.8	断槽	V ₂	2.28	0.012			0.2	1.2	0.000 2
	c	6.5	0.133	1.9	断槽	V ₃	4.5	0.024			0.85	39	0.033 2
	d	9.3	0.144	1.6	古沟谷	V ₄	5.24	0.029			1.17	29.7	0.034 7
	e	6.3	0.132	1.2	古沟谷	V ₅	5.22	0.029	B	限制性	0.82	11.6	0.009 5
	f	8.6	0.121	2.2	古沟谷	V ₆	11.39	0.065			0.45	14.4	0.006 5
	g	6.0	0.114	0.7	古沟谷	V ₇	6.38	0.034			1.08	—	—

的规模。分别对比北部沉积区的古沟谷 V₁ 和 V₄ 以及断槽 V₂ 和 V₃ 可以得出,较大的宽深比和通道截面积通常能对应较大规模的扇体;对比南部沉积区内的三条古沟谷及其对应的扇体可知,存在古地貌阻隔的区域,砂体的沉积会明显受到沉积区古地貌的限制,通道尺寸和扇体规模的相关性不及北部沉积区明显。因此,通道尺寸是扇体发育规模的必要不充分条件。

3) 沉积区可容空间

可容空间是可供沉积物沉积的空间,砂体在其中接受沉积,因此,沉积区的地貌特点势必会影响可容空间的变化,进而影响砂体的展布。如前文所述,此次研究的沉积区根据古地貌格局划分为南北两个区域。综合对比两个沉积区的源-汇要素可知,位于开放性区域的扇体一般只受到源区条件(物源供给量、汇水面积、垂向高差)、搬运通道尺寸等要素控制,并且彼此的相关性较为明显;位于限制性区域的扇体则受物源供给及可容空间的限制,若该区域存在隔档,沉积物则不能沿着搬运通道向前推进,在物源供给量一定、搬运区条件良好的情况下,也只能原地形成较小规模的扇体。

基于研究区源-汇系统各要素的探讨分析,结合多元统计分析拟合物源区垂向高差、汇水面积、搬运通道截面积及沉积区最大扇体体积间相关性函数关系如下:

$$V = 5.08 \times 10^{-3} H^2 - 9.77 A_c^2 - 124.79 A_v^2 - 7.11 \times 10^{-2} H + 2.56 A_c + 9.96 A_v$$
 (1)

$$R^2 = 0.95.$$
 (2)

式中:H 为物源区垂向高差,m;A_c 为汇水面积,km²;A_v 为搬运通道截面积,km²;V 为沉积区最大扇体体积,km³;R² 为相关系数。R² 是判定拟合度好坏的统计学指标。若 R² = 1,则与回归曲线完全拟合,相关性最

好;若 R² = 0,则与回归曲线没有拟合度,无相关性。

通过上述函数关系及数据相关性分析,研究区垂向高差(H)与沉积区最大扇体体积(V)相关性最高,表明物源区垂向高差决定了研究区沉积物的供给量,地形高差大常伴生规模偏大的湖底扇沉积;其次是汇水面积(A_c),其与沉积区最大扇体体积(V)相关性较高,表明物源区汇水面积可持续为沉积区提供充足物源供给,联合垂向高差共同决定沉积供给通量;再者是通道截面积(A_v),其与沉积区最大扇体体积(V)相关性偏低,表明通道截面积虽决定沉积物搬运通量,但并不直接地、单一地决定扇体沉积规模,需要综合考虑其他因素,方可寻找到有利的大规模砂体。在研究区目的层段内,沉积区沉积物总量与物源区垂向高差及汇水单元面积密切相关,即垂向高差大、汇水单元面积大,沉积区形成的扇体规模可能越大,反之,沉积扇体规模越小。总体而言,物源区条件(沉积物供给量、垂向高差、汇水面积)是扇体大规模发育的关键。

2.4.2 源-汇耦合模式

埕岛地区东二段下部(EdIV³²)沉积时期,西部埕北低凸起为其主要物源供给区,基岩以碎屑岩及火山碎屑岩为主,沉积中心位于研究区东北部,南部地形复杂,呈隆洼相间格局。研究区自西向东,发育两条坡折带,不同沟道内坡折角度有差异。埕北低凸起提供的物源,通过古沟谷或断槽向盆内优势可容空间搬运,越过坡折,在坡折下倾方向卸载沉积,沿搬运通道形成规模偏小、有水道发育、相变快且扇体孤立的洪水湖底扇,形成埕岛地区从物源区、搬运区至最后沉积区综合的沟谷-断裂-坡折多元型源汇系统。

沟谷-断裂-坡折多元型源汇系统以多岩性基底为“源”,物源区发育多个汇水单元,垂向高差大(平均垂向高差约 1 280 m),汇水面积小(平均汇水面积

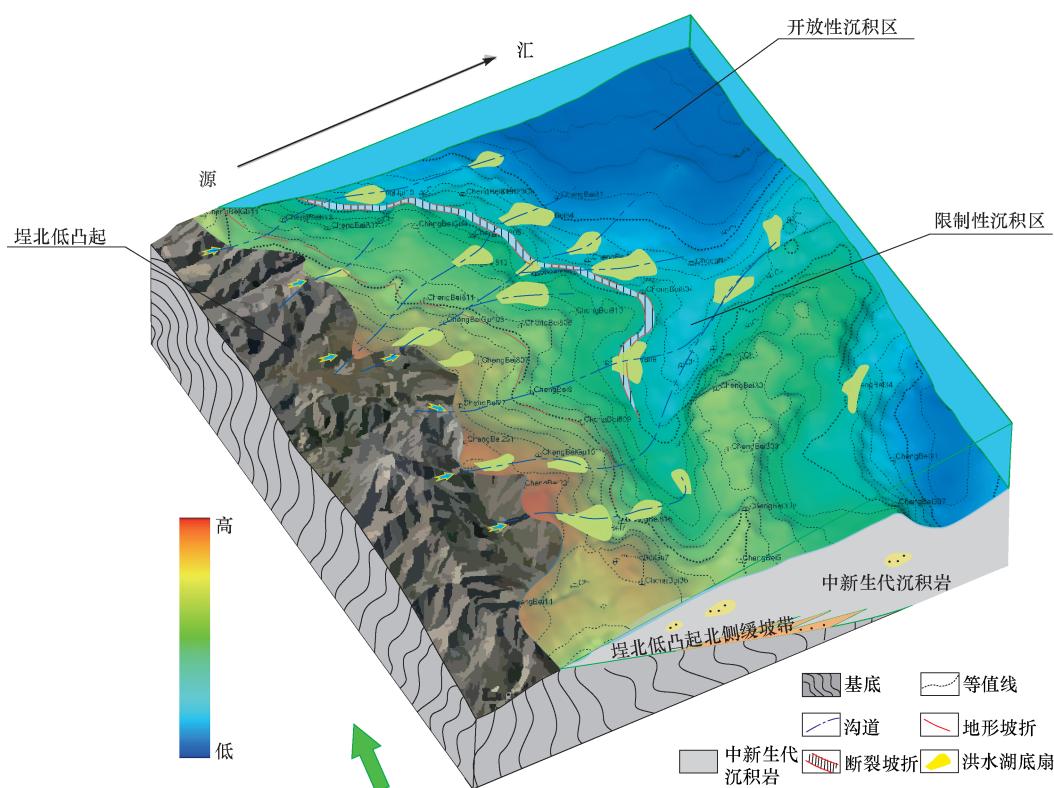


图 10 埕岛东坡 EdIV³² 砂组源汇配置关系及耦合模式

Fig. 10 Configuration and coupling model of the "Source-to-Sink" system in the EdIV³², eastern slope of Chengdao

约 7 km²) 且数目多,碎屑岩沉积物沿古沟谷或断槽等搬运通道搬运,在坡折处卸载、堆积,在不同期次洪水作用下,形成多个独立分布的洪水湖底扇。在东二段 EdIV³² 沉积时期,研究区源-汇系统配置关系较为稳定,发育多岩性源区(物源区)-古沟谷或断槽的物源通道-地形坡折/断裂坡折搬运通道(搬运区)-孤立洪水湖底扇(沉积区)-源沟坡源汇耦合模式(图 10)。

3 结论

济阳坳陷埕岛东坡东营组东二段 EdIV³² 砂组沉积主要受控于物源供给、古地貌等因素,西部埕北低凸起为其主要物源供给区,基岩以碎屑岩、火山碎屑岩及片麻岩为主,沉积物通过古沟谷或断槽向盆内优势可容空间搬运,越过坡折,在坡折下倾方向上卸载沉积,沿搬运通道形成规模偏小、有水道发育、相变快且扇体孤立的洪水湖底扇,形成埕岛地区从物源区、搬运区至最后沉积区综合的沟谷-断裂-坡折多元型源汇系统,建立了多岩性源区(物源区)-古沟谷或断槽的物源通道-地形坡折/断裂坡折搬运通道(搬运区)-孤立洪水湖底扇(两类沉积区)-源沟坡源汇耦合模式,该模式将源汇系统各要素有机联系了起来。根据对研究区目的层源-汇系统的综合分析,可以发现,规模较大

的砂体往往发育于开放性沉积区域,其所对应的物源供给较为充足,搬运通道规模也相对较大。因此,在油气地质勘探中寻找有利砂体时,有必要综合考虑源(物源供给)-渠(搬运通道)-汇(沉积区)的各项特征,从而为发现规模较大的有利砂体提供可靠依据。

致谢:感谢专家的指导、建议与帮助,同时感谢中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院对本文研究提供的资料支持。

参 考 文 献

- [1] 林畅松,夏庆龙,施和生,等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. 地学前缘,2015,22(1):9-20.
Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, Source-to-Sink process and analysis of basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 9-20.
- [2] 王星星,朱筱敏,宋爽,等. 渤海湾盆地车西洼陷陡坡带古近系沙河街组沙三下段源-汇系统[J]. 古地理学报,2016,18(1):65-79.
Wang Xingxing, Zhu Xiaomin, Song Shuang, et al. "Source-to-sink" system of the Lower Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in steep slope zone of Western Chexi sub-sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(1): 65-79.
- [3] Allen, P A, Hovius, N. Sediment supply from landslide-dominated catchments: implications for basin-margin fans[J]. Basin Research, 1998, 10: 19-35.
- [4] Allen, P A. From landscapes into geological history[J]. Nature,

- 2008, 451: 274–276.
- [5] 徐长贵, 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 1–11.
Xu Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 1–11.
- [6] William H, Sømme T O, Martinsen O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(9): 1008–1033.
- [7] 高抒. 美国《洋陆边缘科学计划 2004》述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 119–123.
Gao Shu. Comments on the “NSF margins program science plans 200” [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 119–123.
- [8] 汪品先. 深海沉积与地球系统[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 1–11, 29.
Wang Pinxian. Deep sea sediment and earth system[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(4): 1–11.
- [9] Sømme T O, Jackson A L. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Møre-Trøndelag area of southern Norway: Part 2-sediment dispersal and forcing mechanisms[J]. Basin Research, 2013, 25(5): 512–531.
- [10] Bentley Sr S J, Blum M D, Maloney J, et al. The mississippi river source-to-sink system: Perspectives on tectonic, climatic, and anthropogenic influences, Miocene to Anthropocene[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 153: 139–174.
- [11] 李建平, 杨波, 周心怀, 等. 渤中凹陷东营组层序地层及其沉积相分析[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(4): 1–9.
Li Jianping, Yang Bo, Zhou Xin Hua, et al. Analysis of sequence stratigraphy and sedimentary facies of Dongying formation in Bozhong sag [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(4): 1–9.
- [12] 代黎明, 李建平, 杨波, 等. 埕北低凸起陡坡带下降盘地层特征研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 11(26): 1–4.
Dai Liming, Li Jianping, Yang Bo, et al. Study on characteristics of falling disk formation in steep slope of Chengbei low[J]. Journal of Yangtze University (Science Edition), 2014, 11(26): 1–4.
- [13] Dickinson W R, Gehrels G E. Insights into North American paleogeography and paleotectonics from U-Pb ages of detrital zircons in Mesozoic strata of the Colorado Plateau, USA[J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, 99(6): 1247–1265.
- [14] Olivarius M, Rasmussen E S, Siersma V, et al. Provenance signal variations caused by facies and tectonics: Zircon age and heavy mineral evidence from Miocene sand in the north-eastern North Sea Basin [J]. Marine & Petroleum Geology, 2014, 49(1): 1–14.
- [15] 刘军愕, 简晓玲, 康波, 等. 东营凹陷东营三角洲沙三段中段亚段古地貌特征及其对沉积的控制[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 20–23.
Liu Jun'e, Jian Xiaoling, Kang Bo, et al. Paleogeomorphology of the middle part of 3rd member of Shahejie formation and their effects on depositional systems, Dongying delta, Dongying depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 20–23.
- [16] 陈辉, 郭海洋, 徐祥恺, 等. 四川盆地剑阁-九龙山地区长长期与飞仙关期古地貌演化特征及其对礁滩体的控制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 854–861.
Chen Hui, Guo Haiyang, Xu Xiangkai, et al. Evolution characteristics of palaeogeomorphology during Changxing and Feixianguan periods in Jiange-Jiulongshan area of Sichuan Basin and their control over reefs and beaches[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2016, 37(6): 854–861.
- [17] 桑琴, 未勇, 程超, 等. 蜀南地区二叠系茅口组古岩溶地区水系分布及岩溶地貌单元特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 393–402.
Sang Qin, Wei Yong, Cheng Chao, et al. Distribution of palaeokarst water system and palaeogeomorphic unit characteristics of the Permian Maokou Formation in southern Sichuan Province [J]. Sinica, 2012, 14(3): 393–402.
- [18] 黄胜兵, 叶加仁, 朱红涛, 等. 渤中西环古沟谷与坡折带特征及其对储层的控制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 119–124.
Huang Shengbing, Ye Jiaren, Zhu Hongtao, et al. Characteristics of valley-slope break zone in the western circle of the Bozhong depression and its control over reservoir distribution [J]. Marine Geology and Quaternary geology, 2011, 31(1): 119–124.
- [19] 姜华, 王华, 肖军, 等. 应用古地貌分析方法进行有利区带预测——以琼东南盆地②号断裂带为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 436–441.
Jiang Hua, Wang Hua, Xiao Jun, et al. Palaeogeomorphologic prediction of favorable zones: Take Fault ② of Qiongdongnan Basin as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 436–441.
- [20] 葛家旺, 朱敏敏, 黎明, 等. 陆丰凹陷东部缓坡带层序地层样式及控制因素[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 563–577.
Gejiawang, Zhu Xiaomin, Liming, et al. sequence stratigraphic style and controlling factors in Eastern Slope Zone of Lufeng Depression [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(3): 563–577.
- [21] 陈丽祥, 李慧勇, 代黎明, 等. 埕北低凸起沉积区古沟谷与古坡折带特征及其对沉积体系的控制作用[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(5): 15–19.
Chen Lixiang, Li Huiyong, Dai liming, et al. Characteristics of ancient gullies and slope break zones in the vicinity of Chengbei low uplift and their control over sedimentary systems [J]. Journal of Yangtze University (Science Edition), 2016, 13(5): 15–19.
- [22] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2000, 25(3): 260–53.
Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jianxin, et al. Structural slope break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 260–53.
- [23] 董福湘, 刘立, 唐黎明. 十屋断陷盆地古构造坡折带特征及其对沉积体系的控制[J]. 吉林大学学报(地), 2004, 34(2): 222–226.
Dong Fuxiang, Liu Li, Tang Liming. The characteristics of underformed structural slope-break zone and its influence on deposition system in Shiwu fault basin [J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(2): 222–226.