

下刚果盆地A区块中新统深水沉积体系特征

王琳霖^{1,2},王振奇¹,肖鹏^{1,2}

(1. 长江大学 地球科学学院,湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100)

摘要:下刚果盆地中新统主要的沉积类型为深水重力流沉积。通过对钻井与测井资料的分析,结合高分辨率三维地震特征的研究,揭示了下刚果盆地西南部地区中新统深水沉积体系与层序的发育特征。A区块中新统可识别出7个三级层序(SQ1—SQ7),层序格架下发育块体搬运沉积、水道、堤岸、朵体、废弃水道、决口扇及深海泥质沉积7类沉积单元。各层序格架下重力流发育特征和规模不尽相同,其中SQ1—SQ2和SQ4—SQ5沉积时期重力流沉积规模较小,发育小型高弯度重力流水道和堤岸沉积;SQ3和SQ6—SQ7沉积时期重力流沉积规模较大,发育大型复合重力流水道、朵体和堤岸沉积。综合研究区深水沉积单元的发育特征,建立了该区深水重力流沉积模式,即块体搬运沉积发育在近陆坡区域,向前依次发育近源端的水道—堤岸复合体和决口扇沉积,水道高弯度地区的废弃水道以及水道末端的朵体沉积。这个沉积模式为该地区下一步的深水油气勘探提供了理论依据。

关键词:重力流;深水沉积体系;层序地层;中新统;下刚果盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characterization of deep water sedimentary system in the Miocene of Block A in Lower Congo Basin

Wang Linlin^{1,2}, Wang Zhenqi¹, Xiao Peng^{1,2}

(1. College of Earth Science, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Sedimentary types in the Miocene of Lower Congo Basin is of dominantly deep water gravity flow. Analyses of drilling and logging data combined with study of high-resolution 3D seismic attributes reveal characteristics of the deep water sedimentary system and sequence of southwestern lower Congo Basin. About 7 third-order sequences can be recognized from the Miocene of Block A: massive transportation, water channels, levees, lobes, abandoned water channels, flood fans and deep sea mud under their respective sequence frameworks. Features and scales of gravity flow under these frameworks vary greatly: small-scale highly-bent gravity flow channels and levees were developed in the less intensive sedimentation of SQ1—SQ2 and SQ4—SQ5 and massive complex gravity flow channels, lobes and levees were developed during the large-scale deposition of SQ3 and SQ6—SQ7. An integrated development characterization of the units was performed to establish the sedimentary model in the area: the massive transportation occurring near continental slope, water channel-levee complexes and flood fans near provenance, and abundant water channels in highly-bent area and lobes at the end of water channels. The modal may provide guidance for further deep oil and gas exploration in the area.

Key words: gravity flow, deep water sedimentary system, stratigraphic sequence, Miocene, Lower Congo Basin

20世纪70年代以来,深海油气勘探逐渐成为油气勘探的热点领域。海上勘探的难点在于沉积体位于深水之下,无法对其搬运和沉积过程进行直接观测,利用现代露头剖面、岩心、测井、沉积模拟实验等方面的资料以及高分辨率三维地震数据,结合地震沉积学研究方法,使深水盆地沉积体系的研究成为可能。全球大部分深水油气勘探活动主要集中在墨西哥湾、西非

沿海以及巴西沿海^[1-4],下刚果盆地作为西非海岸盆地第二大含油气盆地,其深水油气勘探引起世界油气勘探领域的广泛关注。自1997年开始,下刚果盆地深水勘探进入热潮期,陆续发现多个深水油气田,其中世界级大油气田达到10个,说明该盆地具有较大的油气勘探潜力。

全球学者针对深水重力流沉积进行了较深入的研

收稿日期:2014-12-30;修订日期:2015-10-28。

第一作者简介:王琳霖(1986—),男,博士研究生,沉积学、石油地质学。E-mail:wanglinlin2003@sina.cn。

通讯作者简介:王振奇(1963—),男,教授、博士生导师,石油地质学、储层地质。E-mail:wzq@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-003-001);国家自然科学基金项目(41072086)。

究,Posamentier 和 Kolla 提出了深水水道沉积体系由低弯度水道充填、天然堤沉积、分流水道复合体、朵体、席状砂、决口扇等沉积单元所组成^[5]。Weimer 和 Slatt 识别出块体搬运沉积体系、滑块、水道、堤岸沉积、朵体、席状砂、薄层沉积以及凝缩层等沉积单元^[6]。李磊等将被动陆缘深水重力流沉积单元划分为块体搬运沉积体系、深水水道、朵体 3 个主要沉积单元^[7]。王振奇等在研究下刚果盆地深水水道结构的基础上,认为盆内大型侵蚀水道内主要发育粗粒滞留沉积、滑塌成因的滑块和碎屑流、叠置水道以及水道-天然堤复合沉积^[8]。前人关于深水重力流沉积单元的划分存在一定分歧。此外,针对下刚果盆地深水沉积的研究多集中于深水水道结构及其分布的刻画,缺乏对盆内沉积体系分析。为满足研究区更进一步的深水勘探,需要在三维空间里精细刻画沉积体的沉积特征,因此在等时地层格架内研究深水沉积体系的展布和沉积特征具有重要勘探意义。本文以层序地层学和地震沉积学为指导,在高分辨率三维地震资料以及钻测井资料分析基础上,对下刚果盆地西南部地区中新统深水区层序地层发育特点以及沉积体系演化展开深入研究,并建立了深水沉积模式,以期推动下刚果盆地的深水勘探。

1 区域地质背景

下刚果盆地位于非洲西海岸,是典型的被动大陆边缘盆地。盆地北以马永巴隆起为界,南抵安布里什隆起,向东倾覆于前寒武纪基底,西界为大陆边缘。盆

地形成于白垩世南大西洋开启时代,构造演化经历了前裂谷阶段、同裂谷阶段、过渡阶段及漂移阶段。前裂谷期在 Tristan 地幔的影响下,形成了 Walvis Ride 火山岩带;同裂谷期盆地沿西非边缘向北发展,形成了富含有机质的河湖相沉积;过渡阶段形成了局限环境的潟湖相沉积,沉积了一套重要的蒸发岩盐地层,标志着由陆相环境向海相环境转换;后裂谷阶段主要表现为海平面升降变化,非洲大陆抬升/掀斜,产生重力滑动,形成盐岩滑动构造样式,为陆架边缘的碳酸盐岩台地、深水水道侵蚀充填与浊流沉积^[9]。

研究区位于下刚果盆地西南部(图1),整体处于陆架坡折以下,为中下陆坡沉积,水深为 500 ~ 1 200 m,三维地震工区面积为 1 760 km²,地震频带宽度为 0 ~ 150 Hz,主频 45 Hz。本次研究的目的层段为中新统,主要发育碎屑流沉积。

2 方法

综合利用地震、测井以及录井等资料,以层序地层学和地震沉积学理论为指导,以精细地震解释与分析为关键技术,采用地质与地球物理充分结合方法,对 A 区块中新统深水沉积单元的构成、形态、充填特征和演化规律进行分析。①在层序划分的基础上建立重力流沉积单元的识别标志,首先建立岩心识别标志和测井相,总结浊积岩、碎屑流、滑塌滑动沉积岩的发育特征。其次根据钻井与地震特征的对应关系,对沉积单元的外部形态和内部充填结构以及发育规模进行刻画,建立重力流沉积单元地震反射特征识别标志。②应用地

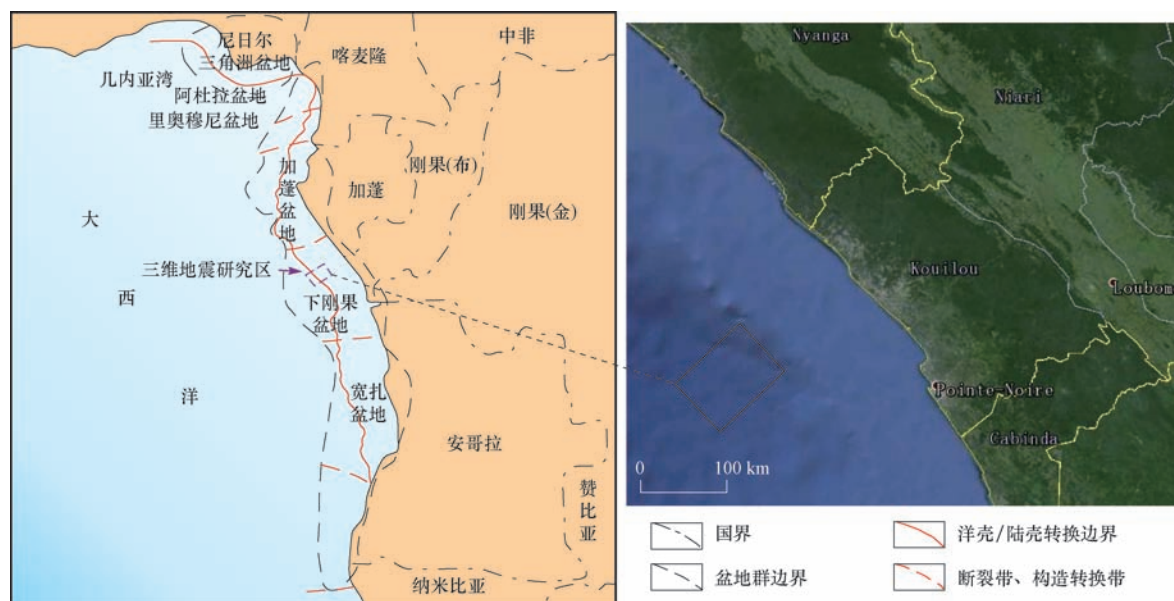


图1 下刚果盆地 A 区块地理位置

Fig. 1 Location map of Block A in the Lower Congo Basin

震沉积学对重力流平面展布特征进行刻画,在层序格架内对重力流进行地震属性分析。利用均方根振幅属性可以较好反映研究区岩性、岩相变化的特点,对A区块中新统重力流空间展布形态进行研究,并建立重力流发育模式。

3 研究区层序地层发育特征

3.1 层序界面识别

层序地层格架建立的基础是层序界面的识别,研究区位于中下陆坡,为深水沉积,地震上缺乏可以反映海平面升降变化的区域上超与削截等不整合面,与之对应的往往是整合面,因此仅依靠地震反射接触关系无法确定层序界面^[10],但可以利用层序界面上下地震相的差异进行层序界面识别^[11]。本次研究根据钻井、测井资料和地震相特征建立了研究区的层序界面识别标准:①地震反射特征表现为局部的水道侵蚀不整合;②大段高值“微齿状”GR曲线转变为低值“箱形”(图2a);③高频、连续的以及平行的地震相突然转变为低频的、杂乱的地震相(图2b)。根据上述标准,在研究区中新统共识别出8个三级层序界面,从下向上依次为SB1,SB2,SB3,SB4,SB5,SB6,SB7和SB8。

3.2 层序界面特征

在深水沉积环境中,层序界面下部一般为深海泥质沉积,界面之上一般发育深水重力流沉积,且上部重力流沉积对下部泥质沉积具有侵蚀作用(图3)。SB1界面表现为全区较连续的强反射特征,其主要为海平面上升到较高位置时形成一套稳定的深海泥质沉积与下伏地层形成的强反射界面。SB2界面在全区为中高

频、较连续地震反射特征,局部发育水道侵蚀不整合。SB3界面之上表现为低连续、强振幅地震反射特征,有明显的多期水道下切现象,界面之下自然伽马曲线表现为低幅齿形,界面之上呈箱型。SB4界面之上表现为高频、中弱振幅地震反射特征,局部见水道下切侵蚀特征。SB5界面之上发育半透明、低振幅、杂乱反射特征的地震相,为海平面快速下降造成陆坡失稳,陆坡沉积物向下滑动、滑塌沉积形成碎屑流沉积。SB6界面之下为高频、低振幅反射,之上为中低频、中高振幅反射特征,局部发育水道侵蚀不整合。SB7界面为典型的沉积转换面,界面之上表现为强振幅反射特征,可见多期水道侵蚀不整合和中高连续、中低频、强振幅反射的朵体沉积地震相。SB8界面之上为凝缩层,地震上表现为全区连续高振幅反射特征,是海平面处于长期上升时期沉积的一套深海泥质沉积物的顶界。

通过连井层序地层对比及层序界面典型地震剖面可以看出,三级层序由重力流发育的深水异地沉积和深海、半深海泥质发育的深水原地沉积组成,垂向上具有厚层砂岩夹泥质沉积交替出现的沉积旋回韵律性,基于深水沉积的二元结构特征,将三级层序划分为异地沉积体系域和原地沉积体系域。异地沉积体系域为低海平面时期发育的一套深水重力流沉积,原地沉积体系域为高海平面时期发育的一套深海、半深海泥质沉积。层序界面一般位于测井曲线由厚层的高值“微齿状”泥岩转变为低值“箱形”或“钟形”砂岩的转换面,即浊积水道底部,对应于最大海泛面(图4)。

4 深水重力流沉积体系特征

通过对研究区钻井(包含1口取心井-X1井)、测井以及高分辨率三维地震资料的综合分析(图5),在

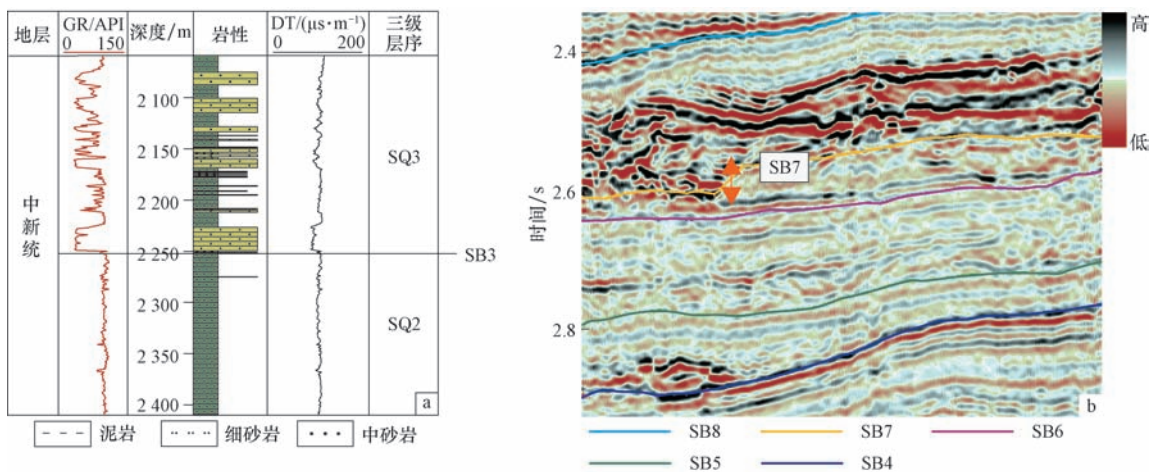


图2 下刚果盆地A区块中新统层序界面识别标志

Fig. 2 Recognition marks of sequence interfaces in the Miocene of Block A in the Lower Congo Basin

a. 岩性柱状图;b. 层序识别标志

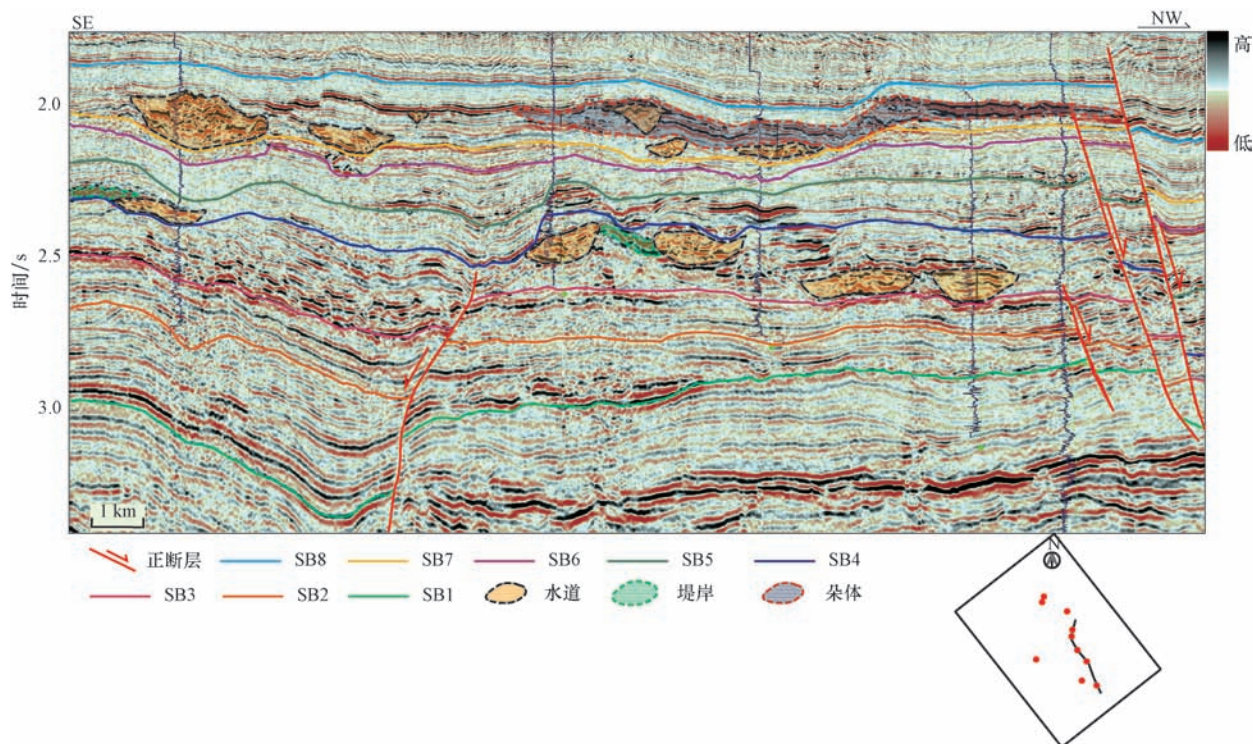


图3 下刚果盆地A区块中新统三级层序界面地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of the third-order sequence interfaces in the Miocene of Block A in the Lower Congo Basin

研究区中新统识别出7个三级层序,认为中新统以深水重力流沉积体系为主,共发育7类沉积单元,分别为块体搬运沉积、深水水道、堤岸、朵体、废弃水道、决口扇以及深海泥质沉积。

4.1 块体搬运沉积

块体搬运沉积 (mass transport deposits, 简称MTDs) 作为深水沉积体系的重要组成部分,在世界深盆地内广泛存在^[12-15]。MTDs是在一定的地质作用下,沉积物沿着大陆斜坡、峡谷、隆起翼部及水道侧壁产生的重力流,包括滑动、滑塌和碎屑流等重力流过程^[16-17]。综合大量三维地震数据解释结果,研究区处于中下陆坡,属于块体搬运沉积体系的末端,MTDs发育较少,仅在研究区东南部少量发育。已发现的MTDs在地震剖面上表现为半透明、低振幅、不连续以及斑点状的杂乱反射特征,顶底界面不平整,与下伏地层接触面未见有明显的侵蚀擦痕(图6),在垂向上,与上覆的深水水道沉积、深海泥质披覆沉积构成沉积旋回。研究区MTDs符合碎屑流具有塑性流变性质的流体,呈层流状态,对下伏地层的侵蚀能力相对较弱的特点,为碎屑流沉积^[18]。

4.2 深水水道

水道是深水沉积体系重要的沉积单元之一,既是重力流输送沉积物至深海的通道,也是重力流沉积卸载的主要场所。重力流形成早期,搬运能力较大,重力

流流体对下部地层侵蚀作用强,以沉积过路为主。在该阶段末期,流体的能量降低,部分富含泥质碎屑的滞留沉积物和重力流对水道壁长期侵蚀,导致水道壁发生滑塌形成的滑块沉积于切谷底部,形成底部滞留沉积和滑塌碎屑流沉积。重力流发育晚期,携带能量变弱,富砂沉积物在切谷内发生沉积充填,形成高砂泥比叠置水道段。随着流体能量的进一步降低,细粒沉积物逐渐沉积下来,形成低砂泥比水道段。Mayall等建立的深水水道垂向充填模式认为,一个完整的水道相序列从底部到顶部依次为:底部滞留沉积、滑塌-碎屑流沉积、高砂泥比叠置水道和低砂泥比水道4个部分,反映流体能量逐渐减小的沉积过程^[19]。但是,依据主水道发育的位置不同、流体的性质不同及受后期改造影响,水道的充填相序列也存在差异。

三维地震资料显示,研究区水道在平面上具有与曲流河相似的形态特征,在剖面上水道多呈“U”型或“V”型。水道下部为低振幅、差连续性以及杂乱充填的地震反射特征,在测井曲线上表现为指形或齿形。水道中部表现为强振幅、中-差连续性以及亚平行或杂乱充填的地震相,测井相具有箱形或齿化箱形特征。水道上部多表现为中-弱振幅、中-好连续性以及平行-亚平行的地震反射特征,测井曲线上具有齿形或齿化钟形特征(图7)。

4.3 堤岸

深水水道内浊流的动力学机制与河流的动力学机

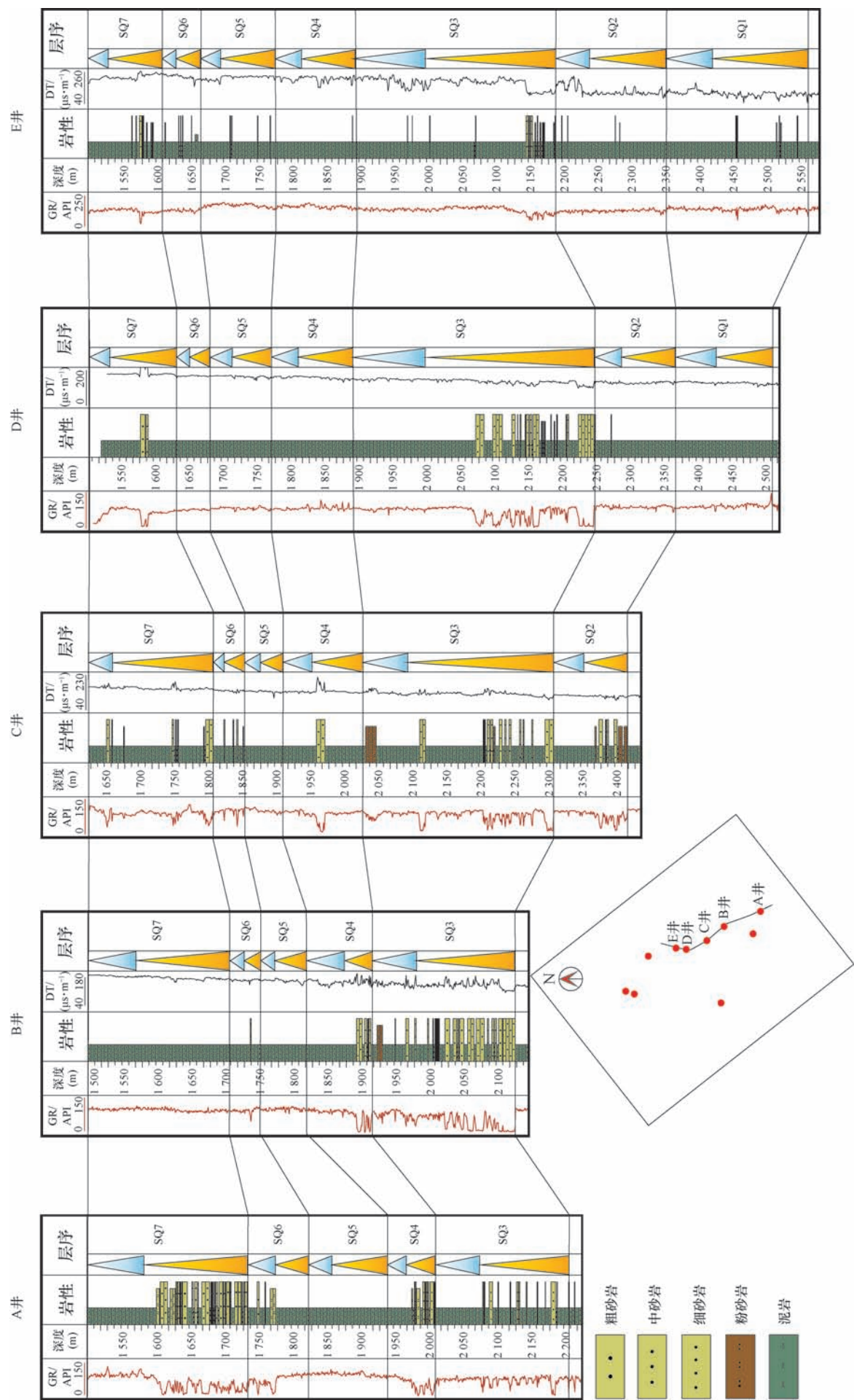


图4 下刚果盆地A区块连井层序划分对比
Fig.4 Cross-well sequence stratigraphic division of Block A in the Lower Congo Basin

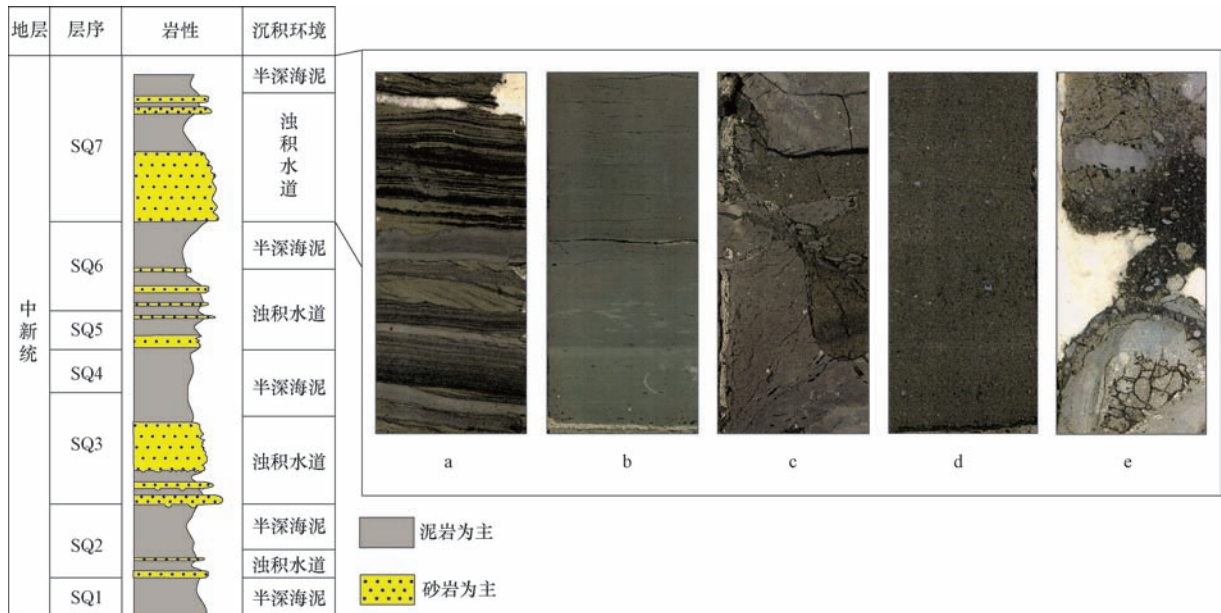


图 5 下刚果盆地 A 区块 X1 井中新统深水沉积特征

Fig. 5 Deep-water sedimentary characteristics in the Miocene of Well X1 in Block A of the Lower Congo Basin

a. 深灰色泥质粉砂岩与板状泥岩和细砂岩交替发育,顶部和底部发育平行层理,中部发育小型波状交错层理和流水沙纹,局部见透镜状细砂岩,埋深 1 630. 05 ~ 1 630. 24 m; b. 暗灰色泥岩为主,局部夹核状灰白色粉砂岩,半深海泥质沉积,埋深 1 654. 10 ~ 1 654. 34 m; c. 灰褐色粉砂质泥岩与灰色细砂岩混积,细砂岩中漂浮泥岩,埋深 1 662. 73 ~ 1 662. 92 m; d. 灰色块状砂岩,内部含不均匀粉砂质泥岩颗粒和圆形石英颗粒,可见少量卵石和结核,滑塌 - 碎屑流沉积段,埋深 1 671. 00 ~ 1 671. 40 m; e. 砂砾岩、泥岩以及斑块状白云质粘土岩混合沉积,见斑块状构造,滞留沉积段,埋深 1 745. 61 ~ 1 745. 80 m

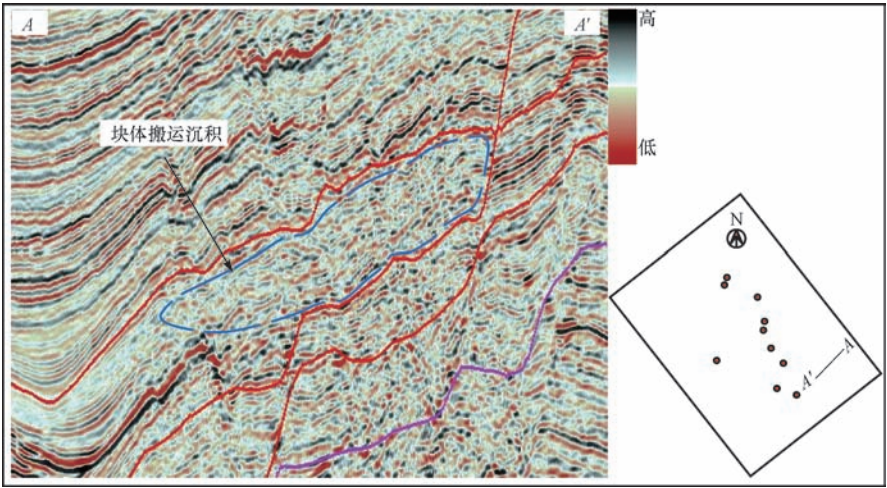


图 6 下刚果盆地 A 区块块体搬运沉积地震反射特征

Fig. 6 Seismic reflection characteristics of mass-transport deposits in Block A of the Lower Congo Basin

制有很大不同,浊流与海水的密度差比河流与空气的密度差要小,浊流易越过水道边缘形成溢流,在水道两侧形成堤岸沉积,并与水道一起构成水道 - 堤岸复合体^[20-21]。堤岸沉积由水道边缘往两侧,流体能量随搬运距离的增加而降低,沉积物的粒度逐渐变细、厚度逐渐减薄。横切水道 - 堤岸复合体方向,地震相主要表现为中 - 强振幅,并沿水道边缘向两侧振幅逐渐减弱,地震反射同相轴由水道边缘向两侧呈逐渐收敛的楔状外形,并与水道沉积一起构成典型的“海鸥翼状”地震

反射特征(图 8)。高精度三维地震资料显示,研究区高弯曲度水道较发育,在水道弯曲部位,两侧的堤岸沉积呈现出不对称的特征,堤岸在凸岸方向比凹岸方向更发育。此外,复合叠置水道的堤岸在沉积规模上比孤立水道的堤岸大(图 8)。

4.4 朵体

朵体一般是指发育于水道末端的席状沉积体, Galloway 将其进一步细分为近端朵体和远端朵体。由

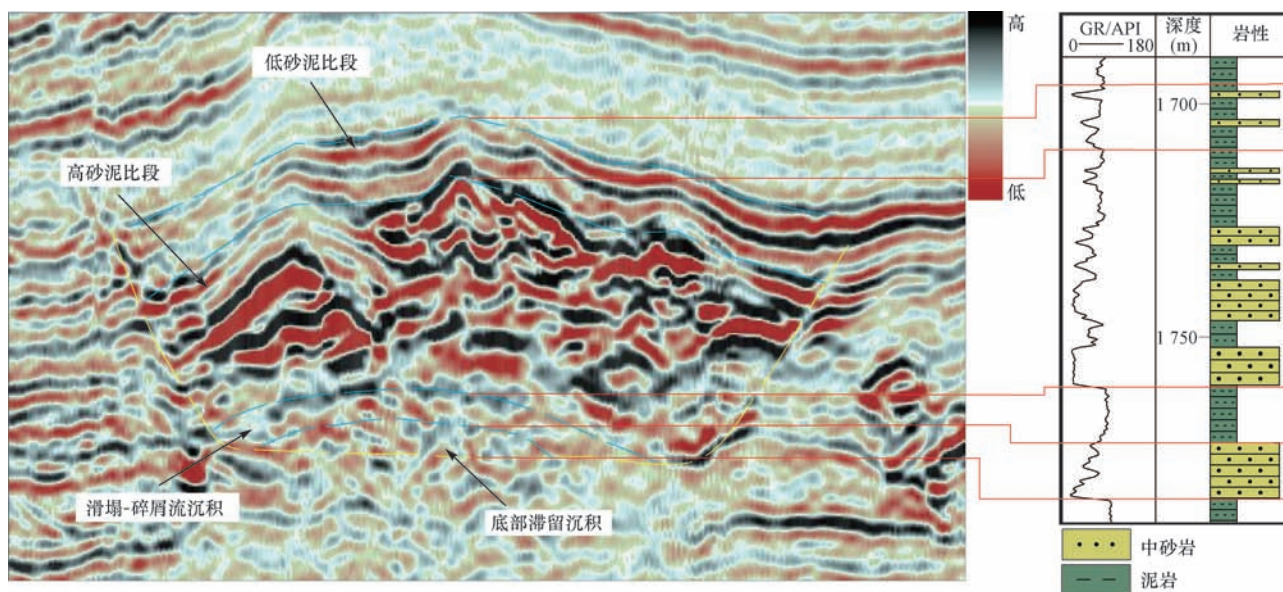


图7 下刚果盆地A区块水道沉积地震反射与测井响应特征

Fig. 7 Seismic reflection and logging response features of channel deposits in Block A of the Lower Congo Basin

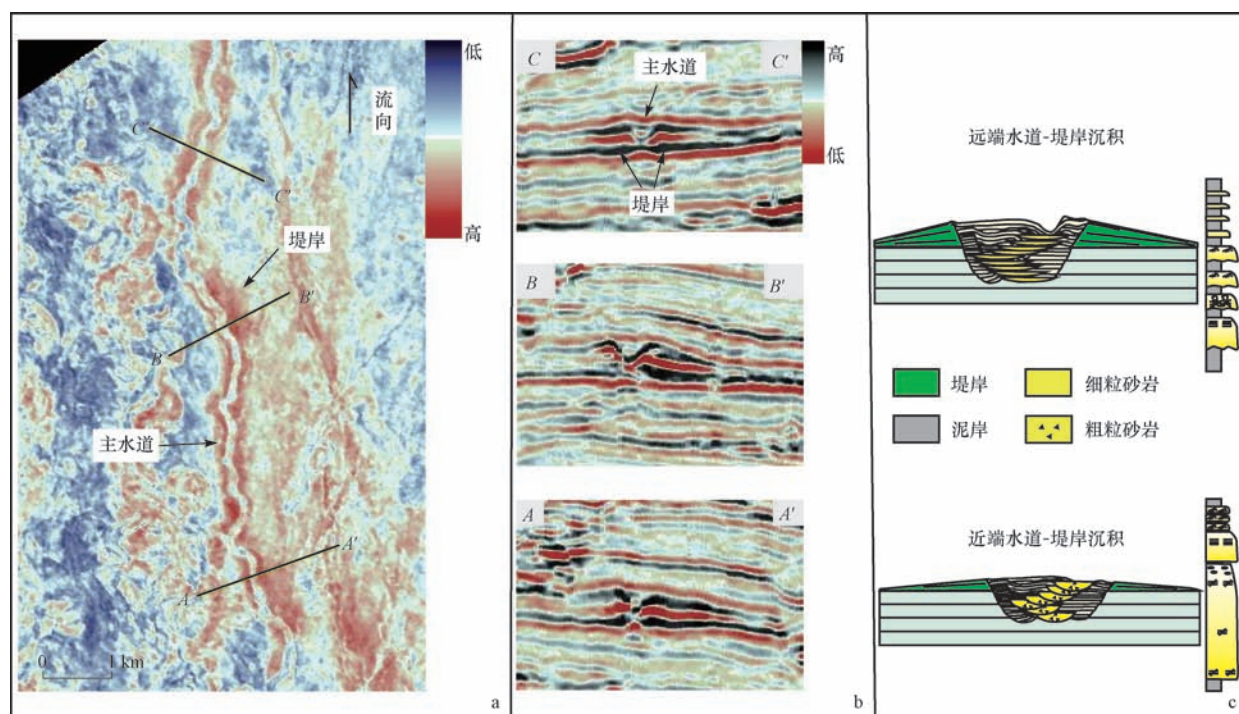


图8 下刚果盆地A区块孤立水道堤岸复合体均方根振幅属性(a)、地震剖面(b)与充填样式(c)

Fig. 8 RMS attribute(a), seismic profiles(b) and filling patterns(c) of channel-levee complex in Block A of the Lower Congo Basin

于在水道末端限制性环境的减弱或消失,导致大量的沉积物卸载于水道口从而形成朵体。近端朵体内部主要由一系列分支水道和席状砂组成,而远端朵体则是由薄层席状细砂岩和泥岩互层。图9a为研究区北部发育的朵体,平面上呈朵叶状,顺重力流流动方向的地震剖面D—D'(图9b)显示从朵体根部到朵体前端,砂体的厚度逐渐减薄。在横切朵体的剖面中,A—A'剖面(图9c)见明显的重力流分支水道,且规模较大,对下伏地层形成较强侵蚀,随着朵体向前推进,B—B'剖面

(图9d)在薄层的席状砂中可见多条小规模分支水道,对下伏地层侵蚀较弱,再推进到朵体末端的C—C'(图9e)剖面,未见重力流分支水道,朵体厚度减小,属于薄层状席状砂沉积。从朵体的推进过程可以看出,在A—A'剖面位置,朵体属于近端朵体,到了B—B'剖面位置,分支水道规模已经很小,可以认为是近端朵体向远端朵体的转换带,而C—C'剖面位置则完全演化为远端朵体。朵体在地震剖面上整体呈现强振幅、好连续性、亚平行反射反射特征,局部也有低角度叠瓦反射。

4.5 废弃水道

废弃水道多发育于深水水道的高弯曲部位,主要是由水道的侧向迁移使水道达到一定的弯曲度,严重阻碍重力流的前进,从而发生重力流的“截弯取直”现象,形成废弃水道^[21]。研究区废弃水道与深水水道具有类似的地震反射特征和外部形态,呈现中-强振幅的地震反射特征,水道的“截弯取直”现象在高弯曲度水

道的近源端多于远源端(图10)。分析认为,废弃水道的形成除与水道的弯曲程度密切相关外,还与重力流的流体能量有关。水道近源端,流体的能量强,更易发生重力流的“截弯取直”,形成废弃水道。废弃水道岩性由废弃前和废弃后两段组成,废弃前其沉积特征与水道一致,沉积物为深水水道砂岩,废弃后,缺乏重力流物源,多以垂向加积为主,主要是泥质沉积,整体形成下粗上细的沉积序列。

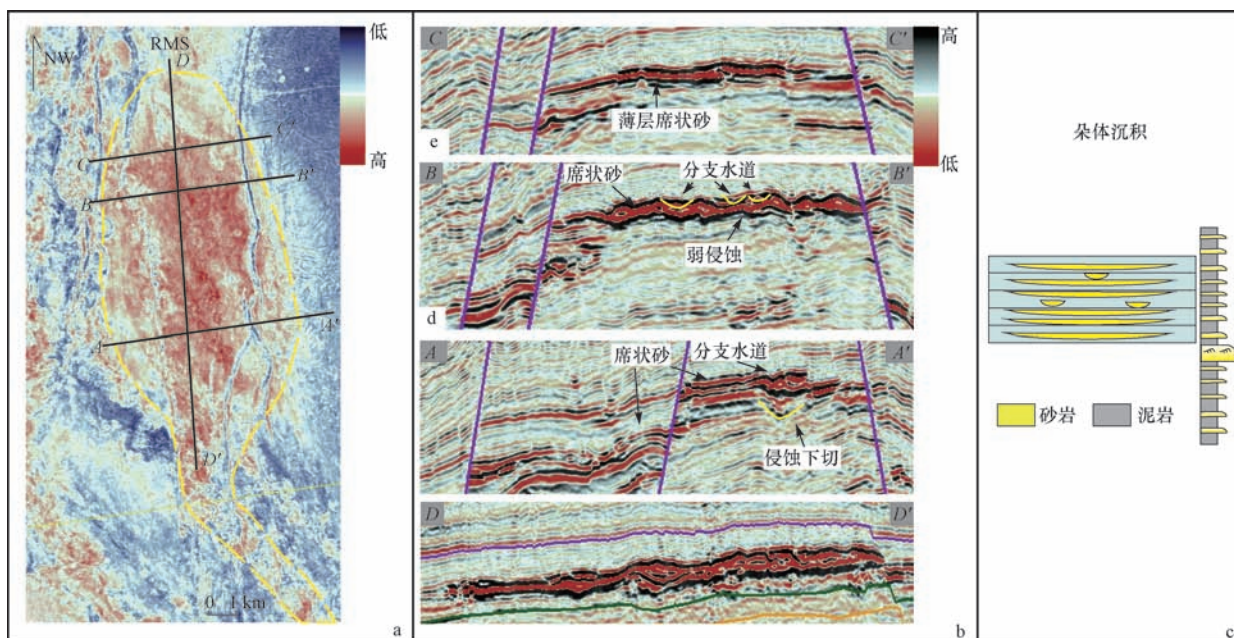


图9 下刚果盆地A区块朵体均方根振幅属性(a)、地震剖面(b)与充填样式(c)

Fig. 9 RMS attributes(a), seismic profiles(b) and filling patterns(c) of lobes in Block A of the Lower Congo Basin

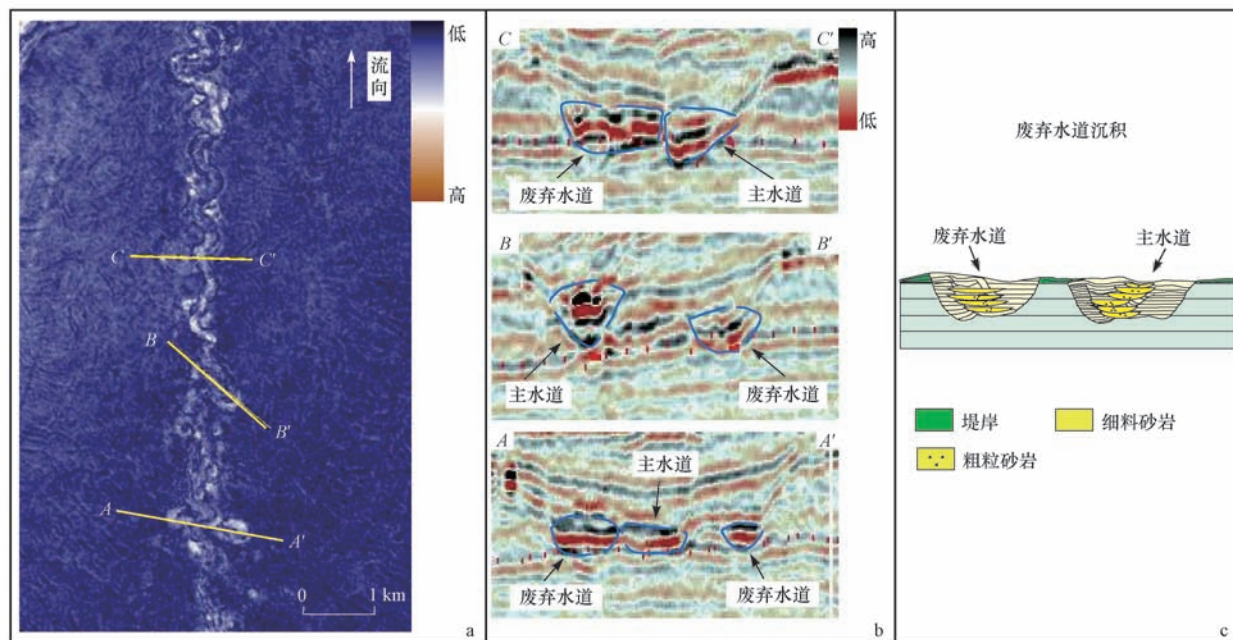


图10 下刚果盆地A区块废弃水道均方根振幅属性(a)、地震剖面(b)与充填样式(c)

Fig. 10 RMS attributes(a), seismic profiles(b) and filling patterns(c) of abandoned channels in Block A the Lower Congo Basin

4.6 决口扇

洪水期高能量重力流流体冲出水道堤岸,并于水道旁侧堆积形成决口扇沉积。研究区决口扇发育较少,一般在水道弯曲处,流体的侵蚀作用较强,易形成决口扇(图11a)。决口扇岩性主要为砂泥岩互层,多为向上变粗的反粒序。与深水水道沉积相比,决口扇沉积厚度较薄,粒度较细,地震反射特征上振幅相对较弱(图11c),其地震剖面反射特征为中-弱振幅、中等连续性以及丘状或不明显斜层反射(图11b,c)。

4.7 深海泥质沉积

深海泥质沉积大量发育在上述沉积单元周围,地震相为弱振幅、连续性好以及平行-亚平行反射特征,在测井曲线上表现为高幅微齿形,是海平面上升到高位时沉积的原地泥质沉积,为深海凝缩段沉积。

5 沉积体系发育模式与演化特征

5.1 沉积体系发育模式

根据研究区层序地层格架下的沉积体系分析认为,在相对海平面较低时期,物源供给充足,层序下部发育以重力流沉积为主的异地沉积体系域,该体系域内砂体十分发育(图12a)。在相对海平面较高时期,物源供给不足,层序上部发育以深海、半深海泥质沉积为主的原地沉积体系域(图12b),以此特点建立了研究区沉积模式。垂向上,低海平面时期的重力流砂质沉积与高海平面时期的深海泥质沉积交替发育,形成砂泥岩交互出现的沉积旋回特点。平面上,由陆地向盆地方向,随着重力流流体性质由滑动-滑塌向碎屑流以及碎屑流向浊流的转换,依次发育块体搬运沉积、

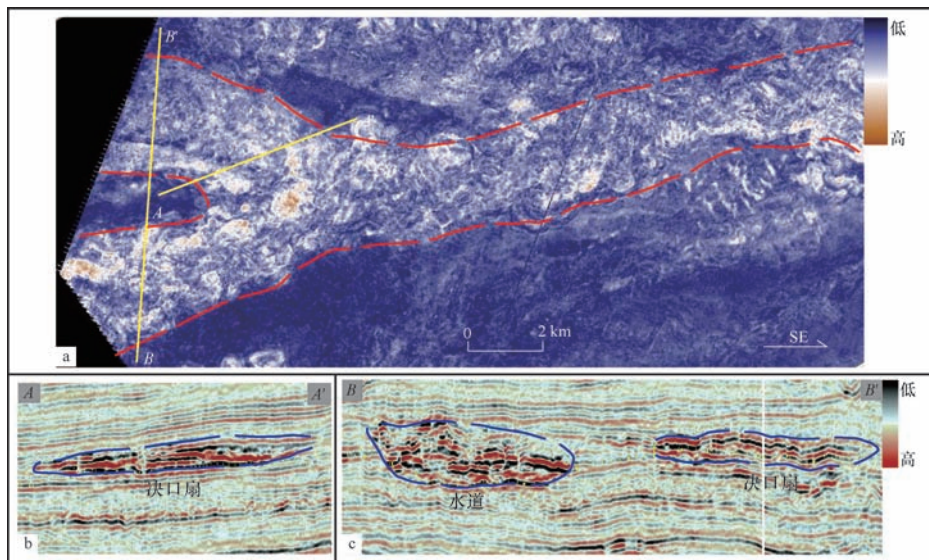


图11 下刚果盆地A区块决口扇均方根振幅属性(a)与地震反射特征(b,c)

Fig. 11 RMS attributes(a) and seismic reflection characteristics(b,c) of flood fan in Block A of the Lower Congo Basin

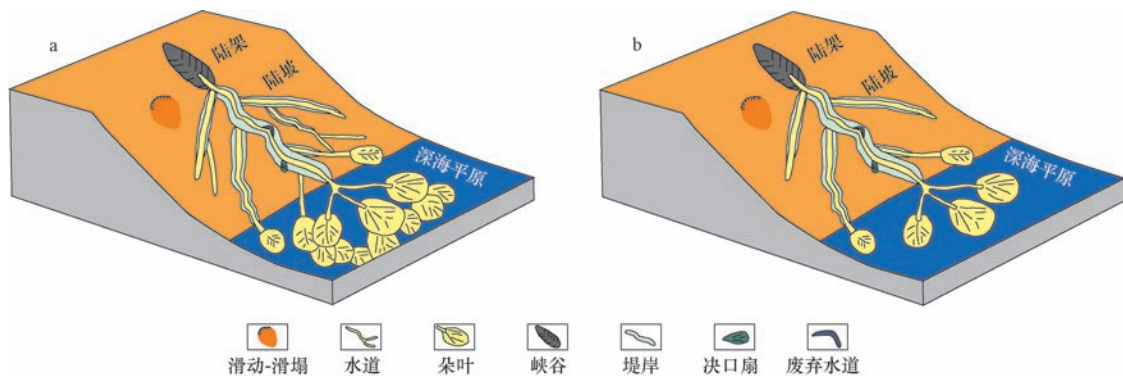


图12 下刚果盆地A区块中新统深水沉积模式

Fig. 12 Deep-water sedimentary models of the Miocene in Block A of the Lower Congo Basin

水道-堤岸复合体沉积和朵体沉积。研究区中新统沉积时期,块体搬运沉积仅在东南部少量发育,重力流携带大量砂、泥、砾石从中下陆坡直抵深水区,并强烈冲刷下伏地层,形成大量的水道-堤岸复合沉积体,水道形态和水道类型丰富,这一点均与研究区所处的中下陆坡环境吻合。另外,研究区决口扇沉积多见于水道的近源端,废弃水道发育在水道的高弯曲部位。

5.2 沉积体系演化特征

海平面下降时期,碎屑流发育,砂泥比高。海平面上升时期,泥质发育,砂泥比低。基于研究区深水沉积

的特征及其沉积序列,将中新统三级层序划分为异地沉积体系域和原地沉积体系域。异地沉积体系域主要为重力流沉积,发育砂泥岩互层,原地沉积主要为泥质沉积。本文沉积演化分析关注重点为层序内储层发育的异地沉积体系域,对其沉积分布特征进行总结。

通过井震结合分析,研究区均方根振幅属性可以较好地反映深水重力流沉积体系的时空展布特征(图13),故利用均方根振幅属性图来研究各个层序的沉积相分布。研究认为,下刚果盆地A区块中新统各三级层序沉积相的展布特征、全球海平面在10.5 Ma的海退事件与SB6界面的一致性均说明重力流沉积体

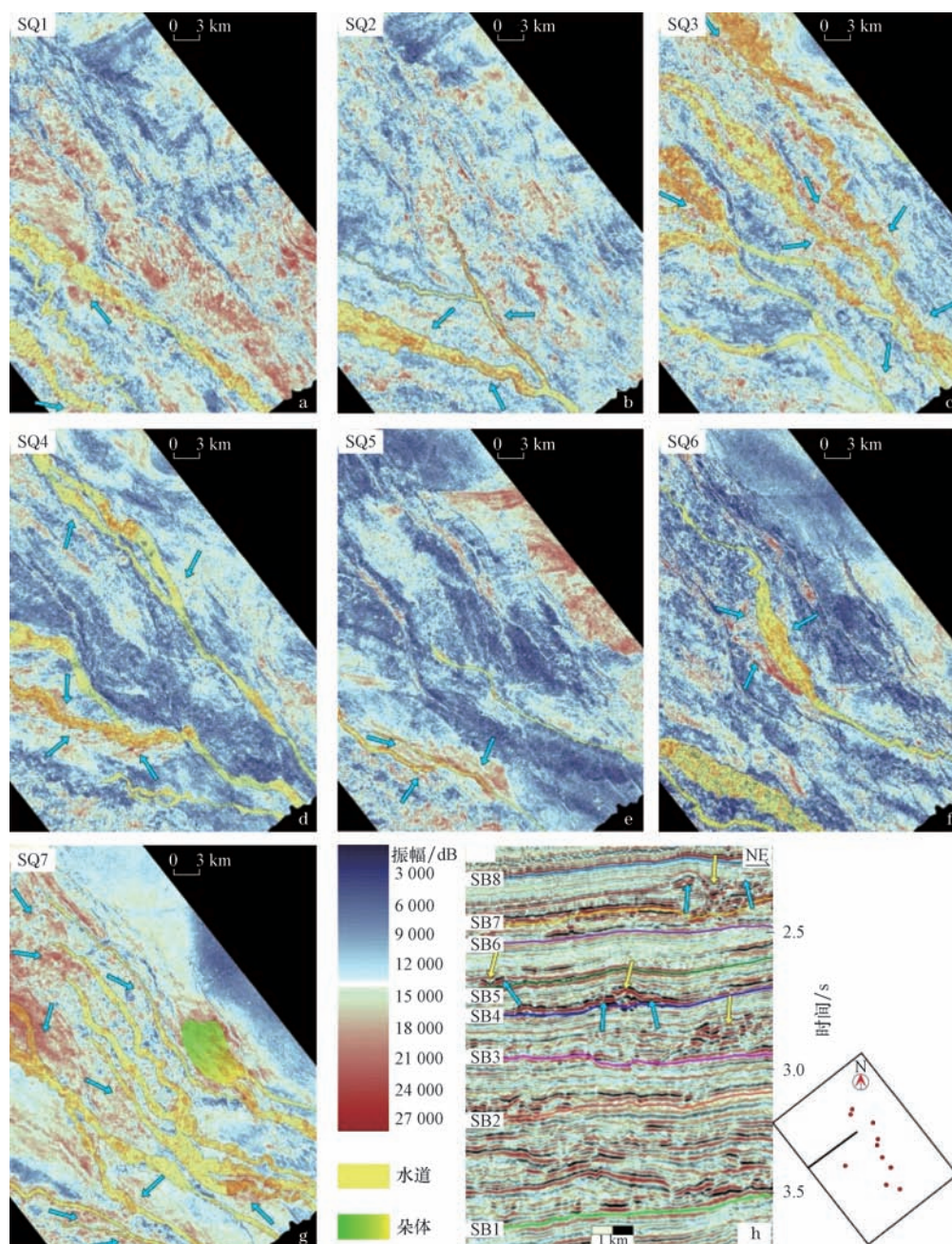


图13 下刚果盆地A区块SQ1—SQ7沉积演化

Fig. 13 Sedimentary evolution of SQ1-SQ7 in Block A of the Lower Congo Basin

a—d. 均方根振幅;h. 地震剖面

(蓝色箭头指示堤岸发育区,黄色区域和黄色箭头指示水道。)

系演化明显受海平面升降变换的影响,研究区主要发育深水水道沉积,水道基本呈NW向分布,块体搬运沉积和朵体发育较少。研究区物源方向基本一致,均来自SE方向,各层序异地沉积体系域呈现规律性变化(图13)。SQ1沉积时期,相对海平面处于较高范围,构造活动弱,沉积供给长期处于饥饿环境,发育广泛的深海泥质沉积。异地沉积体系域重力流沉积范围局限,主要在研究区南部发育3条水道,水道规模均较小,呈NW方向分布,水道的两侧发育小型天然堤—溢岸沉积,朵体不发育。相对SQ1来说,SQ2在沉积构造背景上具有继承性,该时期研究区水道向北侧迁移,规模依旧较小,发育小型水道和堤岸沉积。SQ3沉积时期相对海平面下降,沉积物供给充足,构造活动加剧,异地沉积体系域发育水道规模明显增大,研究区多期水道叠置、交织在一起,水道两侧堤岸沉积发育,朵体不发育。SQ4沉积时期,相对海平面上升,沉积物供给相对较弱,以原地沉积体系域发育的深海泥质沉积为主,研究区深水重力流水道规模开始减小,随着重力流水道向深海方向发育逐渐演变成重力流分支河道,水道两侧发育堤岸沉积。SQ5相对SQ4沉积构造环境上具有继承性,以原地沉积体系发育的广泛深海泥质沉积为主,深水水道规模进一步减小,仅在研究区南部和中部发育两条小型高弯度水道和堤岸沉积,未见朵体发育。SQ6沉积时期,水道规模变大,尤其是南部发育了一条富砂且规模较大的叠置水道,水道两侧伴随发育堤岸沉积。SQ7沉积时期,相对海平面经历较长的下降周期,沉积物供给丰富,该时期研究区深水水道沉积规模较大,交错发育大量复合水道,宽度可达数公里,局部发育小型孤立水道,堤岸沉积也十分发育。此外,在研究区北部水道末端发育规模较大的朵体沉积。

6 结论

1) 通过对下刚果盆地中新统层序地层分析,共识别出8个层序界面,自下而上依次为SB1,SB2,SB3,SB4,SB5,SB6,SB7,SB8,依次将中新统划分为SQ1—SQ7共7个三级层序。

2) 研究区中新统发育深水重力流沉积,包括块体搬运沉积、深水水道、堤岸、朵体、废弃水道、决口扇以及深海泥质沉积共7种沉积单元,其中深水水道、堤岸和深海泥质沉积相对较发育。

3) 建立了研究区中新统沉积模式:垂向上重力流砂质沉积与深海泥质沉积交替发育形成旋回;平面上,由陆地向盆地方向,随着重力流流体性质由滑动—滑塌向碎屑流及碎屑流向浊流的转换,依次发育块体搬运沉积、水道—堤岸复合体沉积和朵体沉积。

4) 中新统从SQ1到SQ7沉积时期,相对海平面经历了上升—下降—上升—下降的过程,SQ1—SQ2和SQ4—SQ5相对海平面上升时期异地沉积体系域主要发育小型高弯度水道和堤岸沉积,水道沉积体的含砂率整体较低;SQ3和SQ6—SQ7相对海平面下降时期异地沉积体系域主要发育大型的复合水道,水道宽度大,含砂率高,其中SQ7北部发育规模较大的朵体沉积。

参 考 文 献

- [1] 刘剑平,潘校华,马君,等. 西部非洲地区油气地质特征及资源概述[J]. 石油勘探与开发,2008,35(3):378-384.
Liu Jianping, Pan Xiaohua, Ma Jun, et al. Petroleum geology and resources in West Africa: An overview[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 378-384.
- [2] 吕福亮,贺训云,武金云,等. 全球深水油气勘探简论[J]. 海相油气地质,2006,11(4):22-28.
Lu Fuliang, He Xunyun, Wu Jinyun, et al. Review of global deepwater oil and gas exploration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(4): 22-28.
- [3] 郑应钊,何等发,马彩琴,等. 西非海岸盆地带大油气田形成条件与分布规律探析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2011,41(6):1018-1024.
Zheng Yingzhao, He Dengfa, Ma Caiqin, et al. The forming factors and distribution rules of giant oil and gas fields in the coastal basins of West Africa[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 1018-1024.
- [4] 徐志诚,吕福亮,范国章,等. 西非海岸盆地深水油气地质特征和勘探前景[J]. 油气地质与采收率,2012,19(5):1-5.
Xu Zhicheng, Lu Fuliang, Fan Guozhang, et al. Petroleum geology and recovery efficiency[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 1-5.
- [5] 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.
- [6] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the Petroleum Geology of Deep-water Settings[M]. AAPG Studies in Geology 57, SEPM Special Publication, 2007: 419.
- [7] 李磊,王英民,徐强,等. 南海北部白云凹陷21 Ma深水重力流沉积体系[J]. 石油学报,2012,58(5):798-806.
Li Lei, Wang Yingmin, Xu Qiang, et al. 21 Ma deepwater gravity flow depositional system in Baiyun sag, northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 58(5): 798-806.
- [8] 王振奇,肖洁,龙长俊,等. 下刚果盆地A区块中新统深水水道沉积特征[J]. 海洋地质前沿,2013,29(3):5-12.
Wang Zhenqi, Xiao Jie, Long Changjun, et al. Depositional characteristics of Miocene deepwater channel deposits in block A of Lower CONGO basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(3): 5-12.
- [9] 刘祚冬,李江海. 西非被动大陆边缘盆地盐构造对油气的控制作用[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2):196-202.
Liu Zuodong, Li Jianghai. Control of salt structures on hydrocarbons in the passive continental margin of West Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 196-202.
- [10] Shannona P M, Stoker M S, Praega D, et al. Sequence stratigraphic analysis in deep-water, underfilled NW European passive margin basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 1185-1200.

- [11] 李磊,王英民,黄志超,等. 尼日尔三角洲深水层序地层及地震相研究[J]. 沉积学报,2008,26(3):407-416.
Li Lei, Wang Yingming, Huang Zhihua. Study on sequence stratigraphy and seismic facies in deep-water Niger Delta[J]. Acta Petrolei Sinica,2008,26(3):407-416.
- [12] Droz L, Marsset T, Ondreas H, et al. Architecture of an active mud-rich turbidite system: The Zaire Fan (Congo - Angola margin south-east Atlantic): results from ZaiAngo 1 and 2 Cruises[J]. AAPG Bulletin,2003,87(7):1145-1168.
- [13] Tripsanas E K, Bryant W R, Phaneuf B A. Slope-instability processes caused by salt movements in a complex deep-water environment, Bryant canyon area, northwest gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin,2004,88(6):801-823.
- [14] Sawyer D E, Flemings P B, Shipp R C, et al. Seismic geomorphology, lithology, and evolution of the late Pleistocene Mars - Ursa turbidite region, Mississippi canyon area, northern gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin,2007,91(2):215-234.
- [15] 马宏霞,吕福亮,范国章,等. 缅甸若开海域块体搬运沉积地震响应及典型地质特征[J]. 石油与天然气地质,2011,32(54):751-759.
Ma Hongxia, Lü Fuliang, Fan Guozhang, et al. Seismic responses and geological characteristics of mass-transport deposits in the Rakhine Basin, Offshore Myanmar[J]. Oil & Gas Geology,2011,32(54):751-759.
- [16] Moscardelli L, Wood L, Mann P. Mass transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela[J]. AAPG Bulletin,2006,90(7):1059-1088.
- [17] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research,2008,20:73-98.
- [18] Middleton G V, Wilcock P R. Mechanics in the Earth and Environmental Sciences[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1994.
- [19] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs-key elements in facies prediction and effective development[J]. Marine and Petroleum Geology,2006,23(11):821-841.
- [20] Mohring D, Buttles J. Deep turbidity currents in shallow channels[J]. Geology,2007,35(2):155-158.
- [21] 李华,何幼斌,王振奇. 深水高弯度水道-堤岸沉积体系形态及特征[J]. 古地理学报,2011,13(2):139-149.
Li Hua, He Youbin, Wang Zhenqi. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levee system[J]. Journal of Palaeogeography,2011,13(2):139-149.

(编辑 董立)

(上接第962页)

- [25] Rooney M A, Claypool G E, Moses C H. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons[J]. Chemical Geology,1995,126(3-4):219-232.
- [26] Jenden P D, Kaplan I R. Origin of natural gas in Sacramento Basin, California[J]. AAPG Bulletin,1989,73(4):431-453.
- [27] Liu Q Y, Dai J X, Li J, et al. Hydrogen isotope composition of natural gases from the Tarim Basin and its indication of depositional environments of the source rocks[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,2008,51(2):300-311.
- [28] Dai J X, Li J, Luo X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. Organic Geochemistry,2005,36(12):1617-1635.
- [29] 刘文汇. 海相层系多种烃源及其示踪体系研究进展[J]. 天然气地球科学,2009,20(1):1-7.
Liu Wenhui. Research progress on manifold hydrocarbon source and its trace system in marine strata[J]. Natural Gas Geoscience,2009,20(1):1-7.
- [30] Lorant F, Prinzhofer A, Behar F, et al. Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases[J]. Chemical Geology,1998,147(3-4):249-264.
- [31] 刘景东,刘光祥,王良书,等. 川东北元坝-通南巴地区二叠系-三叠系天然气地球化学特征及成因[J]. 石油学报,2014,35(3):417-428.
Liu Jingdong, Liu Guangxiang, Wang Liangshu, et al. Geochemical characteristics and origin of Permian and Triassic natural gas in Yuanba-Tongnanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(3):417-428.
- [32] 刘文汇,张建勇,范明,等. 叠合盆地天然气的重要来源——分散可溶有机质[J]. 石油实验地质,2007,29(1):1-6.
Liu Wenhui, Zhang Jianyong, Fan Ming, et al. Gas generation character of dissipated soluble organic matter[J]. Petroleum Exploration & Development,2007,29(1):1-6.
- [33] Wu X Q, Tao X W, Hu G Y. Geochemical characteristics and source of natural gases from Southwest Depression of the Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry,2014,74(1):106-115.
- [34] 廖凤蓉,于聪,吴伟,等. 四川盆地中坝气田天然气碳、氢同位素特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学,2014,25(1):79-86.
Liao Fengrong, Yu Cong, Wu Wei, et al. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gas from the Zhongba Gasfield in the Sichuan Basin and implication for gas-source correlation. Natural Gas Geoscience,2014,25(1):79-86.
- [35] Dai J X, Xia X Y, Qin S F, et al. Origins of partially reversed alkane $\delta^{13}\text{C}$ values for biogenic gases in China[J]. Organic Geochemistry,2004,35(4):405-411.
- [36] James A T, Burns B J. Microbial alteration of subsurface natural gas accumulations[J]. AAPG Bulletin,1984,68(8):957-960.
- [37] 秦胜飞. 塔里木盆地库车坳陷异常天然气的成因[J]. 勘探家,1999,4(3):21-23,30.
Qin Shengfei. Origin of abnormal gas in the Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Explorationist,1999,4(3):21-23,30.
- [38] Chung H M, Gormly J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments; theoretical considerations of carbon isotope distribution[J]. Chemical Geology,1988,71(1/4):97-103.
- [39] Zou Y R, Cai Y, Zhang C, et al. Variations of natural gas carbon isotope-type curves and their interpretation A case study[J]. Organic Geochemistry,2007,38(8):1398-1415.

(编辑 张亚雄)