

南美北部巴巴多斯增生楔生物气成藏特征及富集规律

陶维祥,程涛,陈亮

中国海洋石油国际有限公司

摘要 近年来深水生物气勘探已经成为油气勘探的热点之一。由于构造活动剧烈,增生楔的生物气成藏条件较为复杂,目前对该领域生物气富集规律以及主控因素方面缺乏系统认识。基于二维地震、钻井等资料,探讨了南美北部巴巴多斯增生楔生物气成藏条件,建立油气成藏模式,进一步揭示油气富集规律并指出有利勘探方向。研究表明:巴巴多斯增生楔自西向东依次发育西部坳陷带、中部隆起带和东部冲断带。西部坳陷带内厚层泥岩提供充足的生物气源;发育水道复合体、水道-堤岸复合体、水道-朵叶复合体以及朵叶等富砂微相,可作为有利储集体;构造圈闭和储层配置关系好;早期高幅断背斜长期处于油气优势汇聚区,有利于生物气高效聚集成藏。上新世以来受加勒比板块挤压影响,中部隆起带广泛发育泥底辟,形成大量泥底辟遮挡型圈闭,泥底辟持续活动至今,晚期泥底辟的活动导致生物气藏遭到破坏,晚期保存条件是生物气成藏与富集的关键因素。建立了生物气自生自储和下生上储的近源成藏模式。西部坳陷带生物气成藏条件较好,是有利的勘探方向。

关键词 生物气;深水沉积;保存条件;成藏模式;增生楔;南美

中图分类号:TE122.1 **文献标识码**:A

引用:陶维祥,程涛,陈亮.南美北部巴巴多斯增生楔生物气成藏特征及富集规律[J].海相油气地质,2025,30(3):265-276.

TAO Weixiang, CHENG Tao, CHEN Liang, et al. Biogenic gas accumulation conditions and enrichment rules in Barbados accretionary wedge, north of South America[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(3): 265-276.

0 前言

生物气藏是由大量生物气聚集而形成的天然气藏。生物气储量占世界天然气储量的20%以上。意大利、哥伦比亚、加拿大、墨西哥湾、美国、俄罗斯等国家和地区都广泛分布着大量的生物气田^[1]。2000年以来,环孟加拉湾和东地中海等地区多个大型生物气田的发现使得生物气勘探备受关注,已成为全球天然气勘探的热点之一,因此开展生物气藏相关研究具有很强的现实意义。国内外众多学者针对生物气的形成机制、成因类型、成藏特征、分布规律以及勘探方向等开展了大量的研究工作^[2-9]。其中,杨松岭等^[2]认为生物气勘探方向应集中在具有大型物源基础的被动大陆边缘盆地外带深水区、具有大型水下扇的残余洋盆地、前陆盆地的前渊区、冻土地区的克拉通盆地内坳陷区。鲁银涛等^[9]

分析了孟加拉湾东北部上新统深水生物气成藏系统,指出“泥包砂”的沉积结构有利于孟加拉扇发育自生自储自封堵的生物气藏,宽缓的背斜构造提高了富砂质结构单元中生物气的聚集程度。前人的研究多集中在被动大陆边缘盆地和前陆盆地,对增生楔内生物气藏的成藏条件、富集规律以及主控因素方面的研究涉及较少。本文以南美北部巴巴多斯增生楔为靶区,深入解剖典型生物气藏的地质条件,明确巴巴多斯海域生物气成藏模式和富集规律,指出有利勘探方向。

1 区域地质概况

巴巴多斯增生楔位于南美北部,总面积约 $9.7\times 10^4\text{ km}^2$,全部位于海域(图1a),水深主要介于1 000~3 000 m。盆地的油气勘探始于19世纪70年代。20世纪初,在特立尼达东北部海域钻探多

收稿日期:2025-02-05;改回日期:2025-04-21

本文受中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目“‘两岸一带’重点盆地油气富集规律和成藏差异性研究”(编号:KJGG2022-0901)资助

第一作者:陶维祥,博士,现为中国海洋石油国际有限公司副总裁兼总地质师,高级工程师,主要从事中国海油海外油气勘探研究和管理。通信地址:100028 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座;E-mail:taowx@cnoocinternational.com

口探井,结果多为干井,油气勘探始终处于低迷期。2016年,盆地进入勘探活跃期,勘探目标为上新统和中新统碎屑岩,油气类型主要为生物气。截至目前,盆地内已发现可采天然气储量 $2\,463\times 10^8\text{ m}^3$ (引自IHS数据库,下同)。

与大西洋西岸的被动陆缘盆地相比,巴巴多斯

增生楔位于加勒比板块东向活动的挤压前缘,受加勒比板块对大西洋板块的仰冲作用影响,构造变形强烈。研究区整体经历了早期拉张、后期挤压两种应力背景,主要经历了3个构造演化阶段,包括裂陷期(侏罗纪—早白垩世)、被动陆缘期(早白垩世—古新世)和碰撞改造期(始新世—现今)(图1b)。

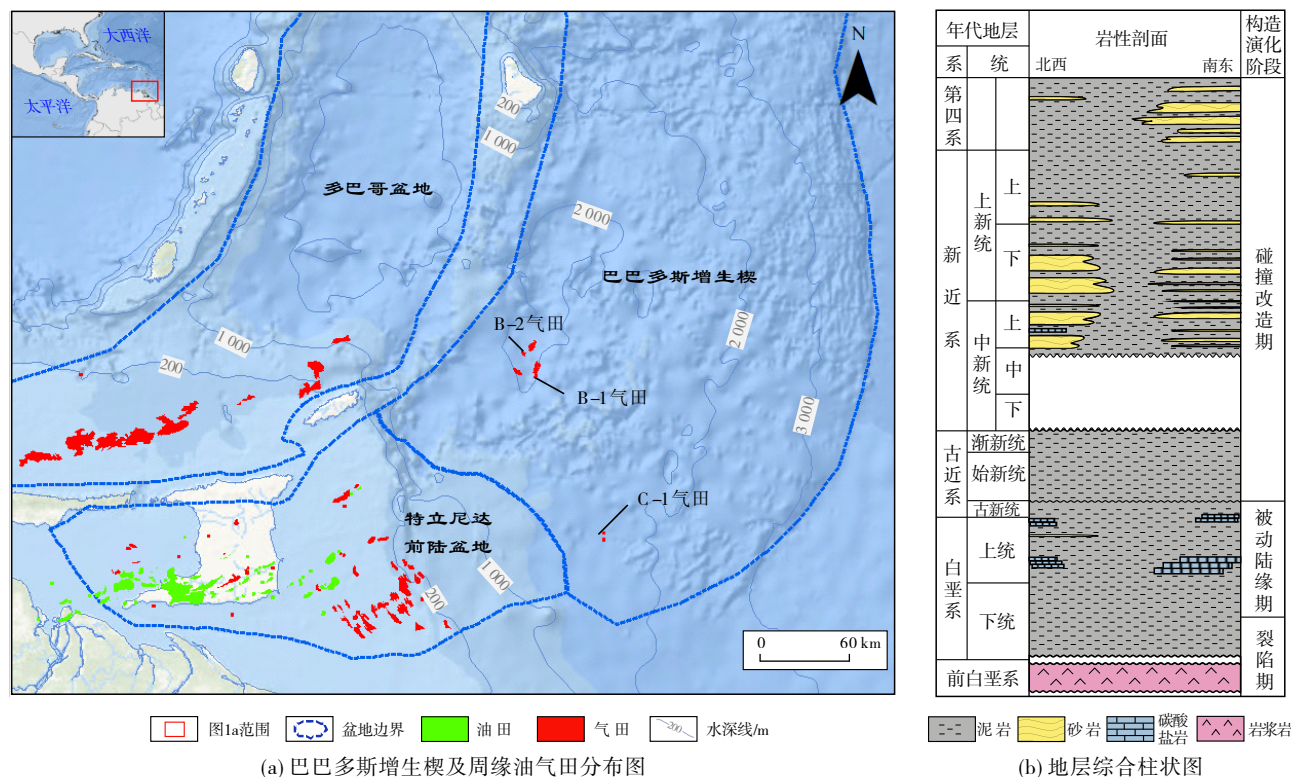


图1 巴巴多斯增生楔及其周缘油气田分布及研究区地层综合柱状图

Fig. 1 Oil and gas fields distribution in Barbados accretionary wedge and its surrounding areas (a), and comprehensive stratigraphic column of the study area (b)

裂陷期 晚侏罗世,随着中大西洋的开启,南美洲东北缘海岸盆地进入裂陷期。该时期巴巴多斯海域发育陆内裂谷,地层充填以陆相河流沉积为主。

被动陆缘期 早白垩世,南美、北美板块的裂离开启了古加勒比海的洋壳扩张,南美洲北部海岸盆地进入被动陆缘期(图2)。巴巴多斯海域开始沉积海相地层。

碰撞改造期 古新世以来,加勒比板块抵达南美、北美板块之间。随着加勒比板块的楔入,阿韦斯火山岛弧开始活动,多巴哥弧前盆地和巴巴多斯增生楔初具雏形,以海相泥岩沉积为主,局部发育近源的火山岛弧碎屑沉积。渐新世大西洋板块后撤,阿韦斯火山岛弧停止活动,多巴哥弧前盆地抬升并拓宽,增生楔向东继续推进,局部遭受剥蚀。

早一中中新世末,大西洋板块后撤减弱,小安的列斯岛弧形成,多巴哥盆地与格林纳达海槽分隔,形成独立的弧前盆地;增生楔在强烈的挤压作用下,迅速大规模抬升,进入主要活动期(图2)。

2 构造单元划分与特征

受加勒比板块东向持续挤压的影响,巴巴多斯增生楔构造东西分带,构造活动西早东晚,自西向东可以划分为西部坳陷带、中部隆起带和东部冲断带(图3)。

西部坳陷带 发育中新统一第四系,厚度为3~5 km(图3b)。局部受中新世东南向挤压作用影响,形成洼中隆、逆冲断层和底辟相关构造,发育断背斜和反向断层遮挡断块圈闭。

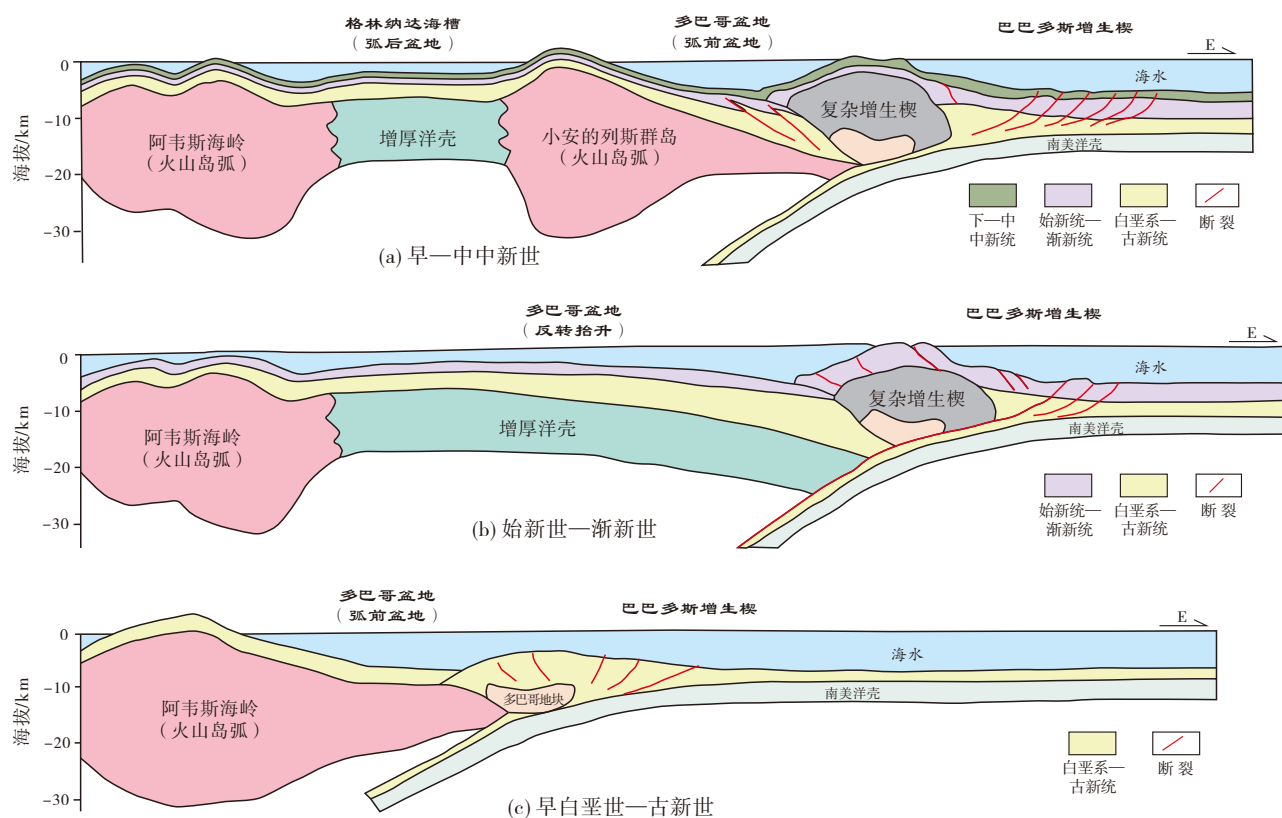


图2 早白垩世以来南美北部板块及盆地演化剖面(据文献[10]修改)

Fig. 2 Evolution profiles of tectonic plates and basins since the Early Cretaceous in the north of South America (cited from reference [10], modified)

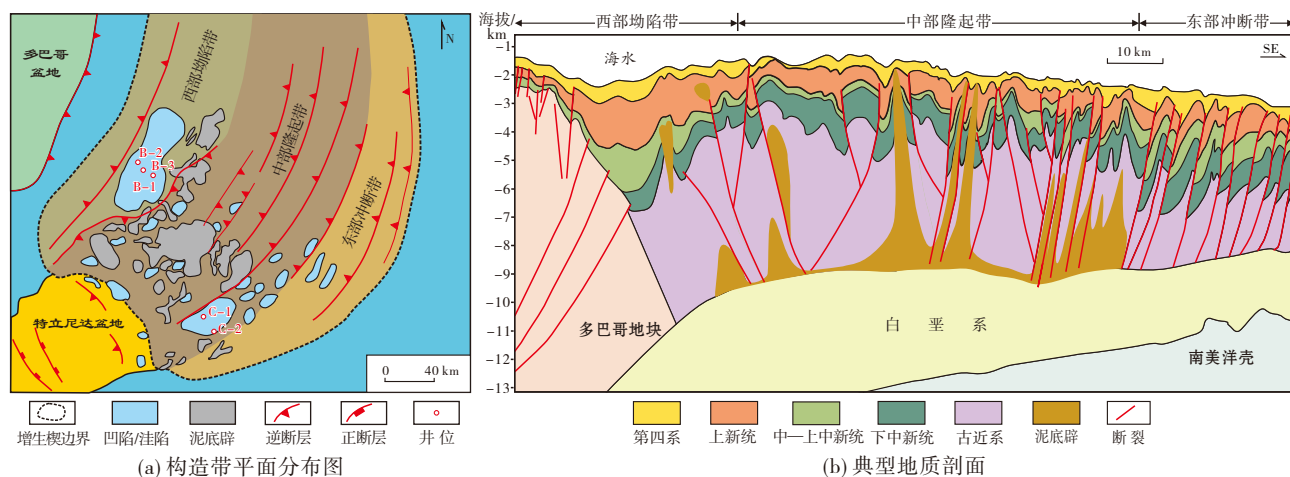


图3 巴巴多斯增生楔构造带划分

Fig. 3 Tectonic zone division in Barbados accretionary wedge

中部隆起带 以NE—SW向逆冲断层为主,断层之间发育多期小型洼陷,地层厚度为2~3 km。中新世以来,受自西向东的区域挤压应力影响,中部隆起带形成大量泥底辟,局部泥底辟沿断层上涌至地表,发育了大量泥底辟遮挡型圈闭,至今仍未定型。

东部冲断带 受上新世末期以来的强烈挤压

作用影响,中新统一上新统发生构造变形并形成一系列逆冲断层,发育断块和断背斜圈闭。第四系厚度较小。

3 生物气成藏特征及模式

目前,巴巴多斯增生楔内共钻探15口预探井,获得7个天然气藏,可采储量累计 $2\,463 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别于

更新统、上新统、中新统获得可采储量 $283 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1\,189 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $991 \times 10^8 \text{ m}^3$; 油气发现主要集中于西部拗陷带内。通过对西部拗陷带已发现天然气藏和中部隆起带失利井解剖,明确生物气成藏特征及主控因素。

3.1 中新统一上新统发育厚层海相泥岩,晚中新世末到现今处于生物气窗

目前研究区天然气发现以生物气为主。生物气是在低温还原环境下,由厌氧细菌分解未成熟有机质而生成的组分以甲烷为主的天然气^[11-15]。生物气具有气体非常干、碳同位素较轻的地球化学特征。一般研究认为生物气中的甲烷碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_1$)介于 -110‰ ~ -55‰ 、干燥系数($\text{C}_1/(\text{C}_1+\text{C}_5)$)大于0.98,而热成因气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 -50‰ ~ -20‰ , $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 -60‰ ~ -50‰ 的天然气是混合成因。研究

区已发现气藏 $\delta^{13}\text{C}_1$ 多介于 -65‰ ~ -55‰ ,干燥系数大于0.98,主要以生物气藏为主,其次为混合成因气藏(图4a)。

西部拗陷带内中新统一第四系厚度一般为3~5 km(图3b),中新统一上新统海相泥岩厚度最大可达1 000 m,且横向连续分布,自晚中新世末到现今处于生物气窗。已钻井揭示始新统一下中新统泥岩 TOC 值介于0.5%~1.3%(图4b),氢指数介于200~300 mg/g,富含可溶性有机质的海相泥岩为生物气田提供了充足气源。

产甲烷菌一般要求较低的地层温度和厌氧环境,实验表明产甲烷菌存活的环境温度为0~80 ℃^[16-21],生气带的温度为40~80 ℃。基于钻井地温统计,研究区生气带对应的烃源岩埋深为1 500~3 600 m(图4c),中新统一上新统的海相泥岩正处于产甲烷菌最佳温度范围,烃源岩处于主力生物气窗。

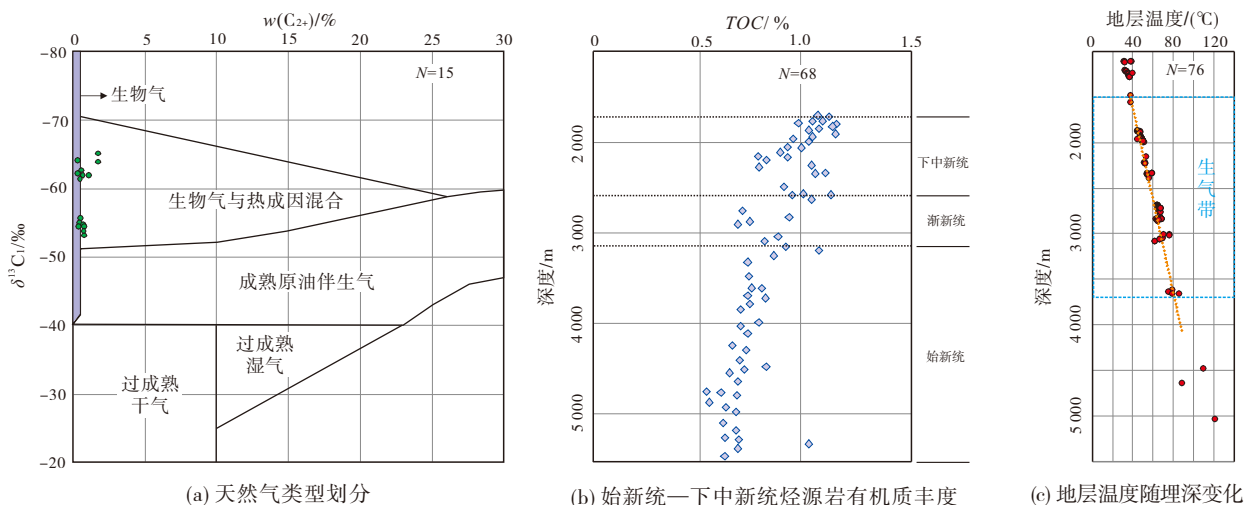


图4 巴巴多斯增生楔天然气成因类型、烃源岩丰度以及地层温度

Fig. 4 Natural gas genetic types, source rock abundance, and formation temperature in Barbados accretionary wedge

3.2 中新世以来发育大型水道和水道-朵叶复合体沉积,储层条件有利

晚白垩世加勒比板块挤压前缘抵达南美西北缘,形成火山岛弧和造山带,为增生楔内沉积充填提供了充足的陆源碎屑。从中新世至更新世,巴巴多斯增生楔始终位于深水环境,在古Orinoco河输送下,发育水道复合体、水道-堤岸复合体、水道-朵叶复合体以及朵叶等多个沉积类型(图5)。从水道复合体、水道-堤岸复合体、水道-朵叶复合体到朵叶,总体上表现为重力流能量逐渐降低、沉积物粒度逐渐变细、砂地比逐渐降低的趋势。

水道复合体宽约6.5 km,厚度最大可达200 m;地震剖面上水道复合体具有下切特征,外形呈“U”形,内部具有充填结构,表现为强振幅、中频、中等一断续反射特征。砂岩主要发育在水道复合体轴部,水道侧翼可见滑塌体,推测以泥岩沉积为主,地震相表现为弱振幅、杂乱-乱岗状反射。

水道-堤岸复合体宽约10 km,地震剖面外形表现为海鸥翼状,水道呈“V”形,内部沉积具有“两分”特征。下部表现为底部滞留沉积,地震相表现为强振幅-杂乱断续反射特征。在水道形成初期,高密度重力流侵蚀陆坡,在陆坡上形成“U”形或者“V”形水道,重力流中粒度较粗的砂砾岩沉积下

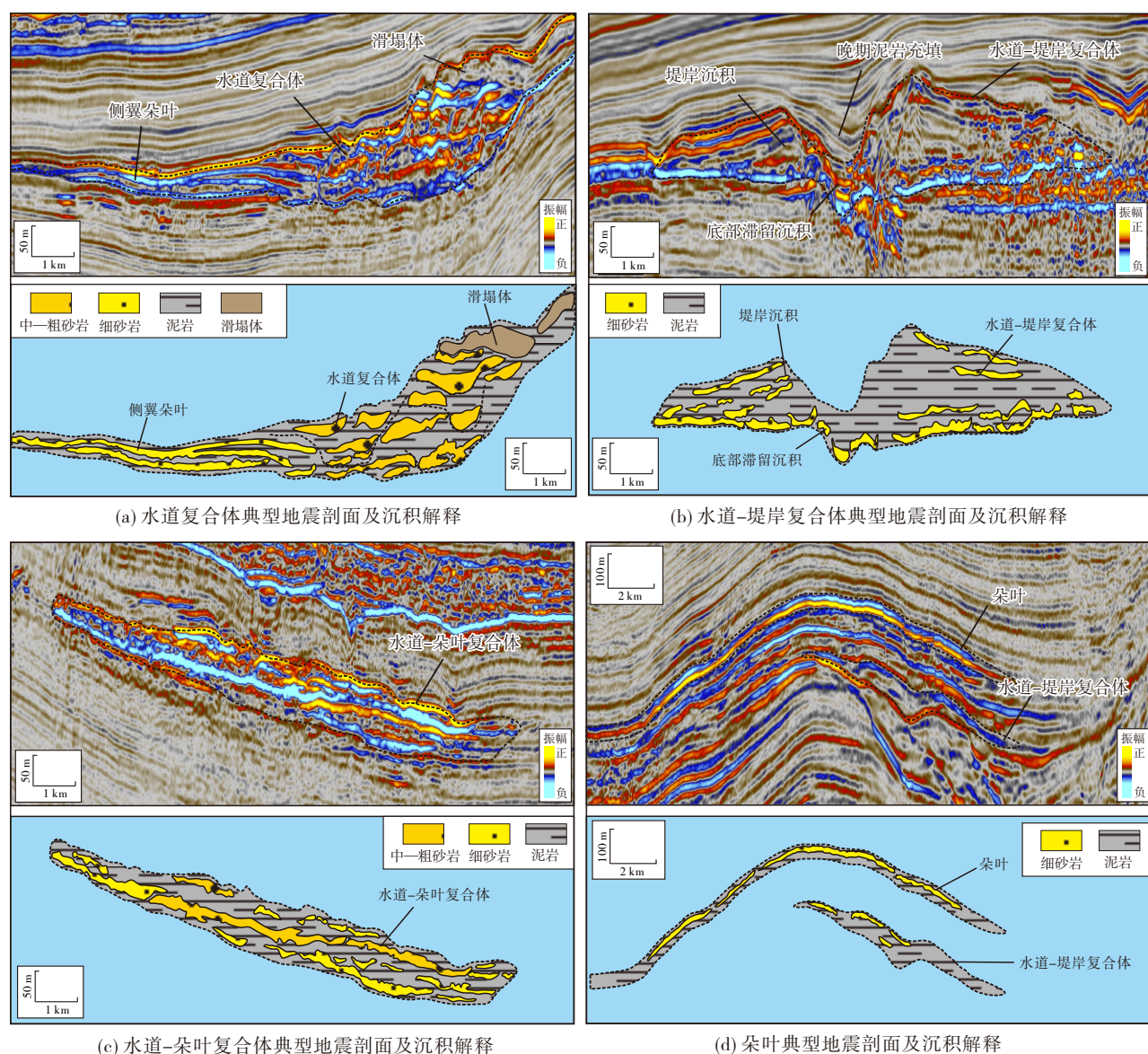


图5 巴巴多斯增生楔深水沉积单元典型地震相特征及沉积解释剖面

Fig. 5 Typical seismic and sedimentary interpretation profiles of deep-water sedimentary unit in Barbados accretionary wedge

来,在水道底部形成滞留沉积^[22-24]。上部为席状、中弱振幅、中-高频、平行连续反射特征,主要为晚期充填的泥岩为主,局部夹薄砂岩。水道侧翼重力流溢流形成堤岸沉积,地震相呈中-强振幅楔状反射,一般为砂泥岩互层,粒度较水道底部充填更细,以粉-细砂岩为主^[25]。

水道-朵叶复合体具有透镜状外形,宽度约为11 km,厚度最大可达100 m;在地震剖面上表现为强振幅、中低频、平行较连续反射特征,局部可见小型水道下切。水道-朵叶复合体的产生,与陆坡下倾方向坡度逐渐变缓、水道中重力流能量与受限程度逐渐减弱有关。主水道首先发散形成多个分支

水道(图6),分支水道在向前运动过程中随着受限程度进一步减弱导致沉积物分散,由于能量及地势起伏的影响,不同分支水道在下倾方向的不同位置分散形成朵叶体,造成水道和朵叶体在侧向上的叠置,主要为厚层复合席状砂沉积^[26]。

朵叶具有席状外形,宽度约为13 km,厚度约为50 m;地震相表现为强振幅、中高频、平行连续反射特征,一般位于最远端,该部位重力流能量低,粒度极细,水道不发育,一般以单层席状砂沉积为主^[27]。

古新世以来,受加勒比板块前缘挤压影响,南美板块北部山脉持续向东推进,导致古Orinoco河不断向东迁移。上新世古Orinoco河迁移至研究区,自

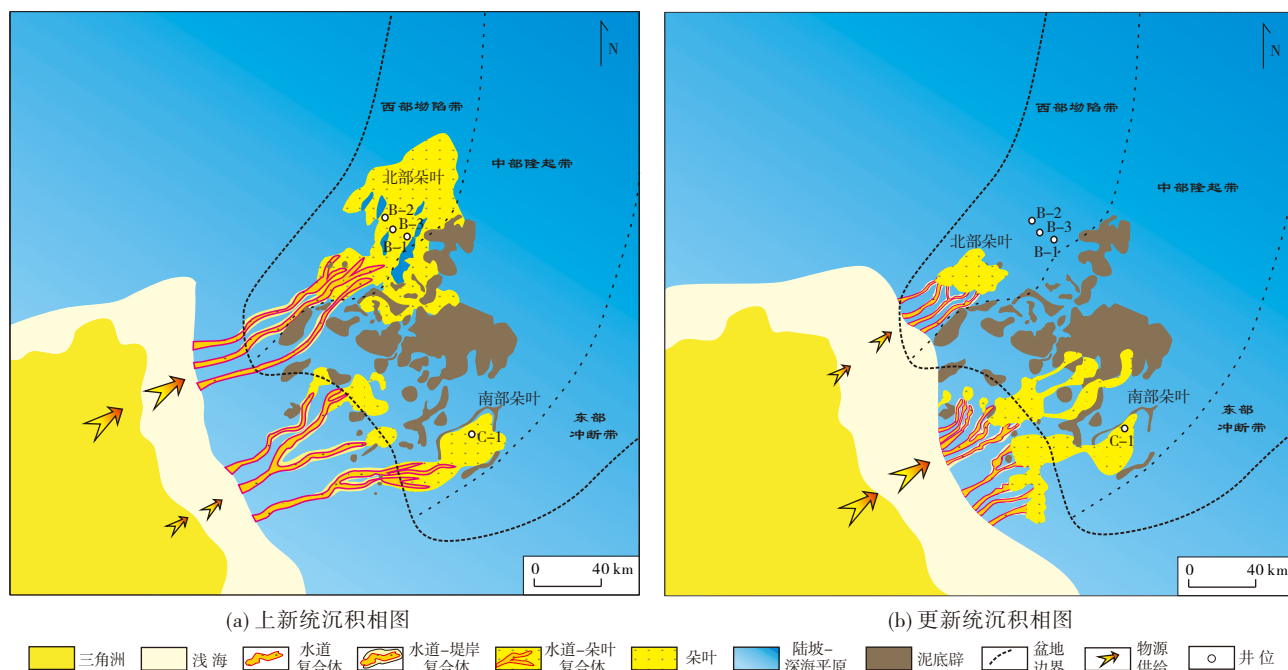


图6 巴巴多斯增生楔上新统一更新统沉积相图

Fig. 6 Sedimentary facies map of the Pliocene-Pleistocene in Barbados accretionary wedge

西南向东北持续输送陆源碎屑,研究区发育多支深水扇沉积体系(图6a)。受古Orinoco河控制,该时期研究区北部物源供给强,扇体搬运距离远、规模大;南部物源供给弱,深水扇体系受古地貌和泥底辟控制,搬运距离短、规模小,局限于近岸展布(图6a)。更新世以来,古Orinoco河不断向东南迁移,北部扇体规模明显变小,搬运距离变短,南部扇体规模逐渐增大(图6b)。

受古Orinoco河迁移控制,砂体规模具有早期北厚南薄、晚期南厚北薄的特征。以上新统和更新统为例,分别统计北部、南部的砂岩厚度分布频率(图7):上新统北部深水扇砂岩更为发育,砂体单层厚度为8~63 m(平均值为21 m),砂地比为20%~30%;南部

深水扇砂体单层厚度为3~27 m(平均值为11 m),砂地比为10%~15%。更新统北部扇体砂岩欠发育,砂体单层厚度为8~12 m(平均值为10 m),砂地比为5%~10%;南部扇体砂体单层厚度为3~34 m(平均值为12 m),砂地比为15%~20%。

深水扇砂体的展布主要受控于物源和构造古地貌。在西部坳陷带,重力流沿构造控制的负地形轴向搬运,主要分布于大型凹陷中。中部隆起带和东部冲断带泥底辟较为发育,限制了重力流向深海搬运沉积物,深水扇局限展布于小型洼陷中(图8)。

钻井揭示新近系储层为细砂岩,局部见中粗砂岩,岩石类型为长石石英砂岩和岩屑石英砂岩,中等分选,次棱角一次圆状,弱—中等胶结。中新统一更新统44个样品的储层物性统计表明:更新统储层埋深介于666~2 114 m,孔隙度为24%~36%,平均值为30%,渗透率为 $(45\sim 5\ 469)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $793\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,为高孔高渗储层;上新统储层埋深介于1 184~2 215 m,孔隙度为21%~36%,平均值为29%,渗透率为 $(198\sim 1\ 744)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $619\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,为高孔高渗储层;中新统埋深介于2 684~4 444 m,孔隙度为13%~26%,平均值为20%,渗透率为 $(26\sim 834)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $329\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,为中孔中渗储层(图9)。新近系储层孔隙度普遍大于15%,渗透率普遍大于 $50\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,储层质量较好。

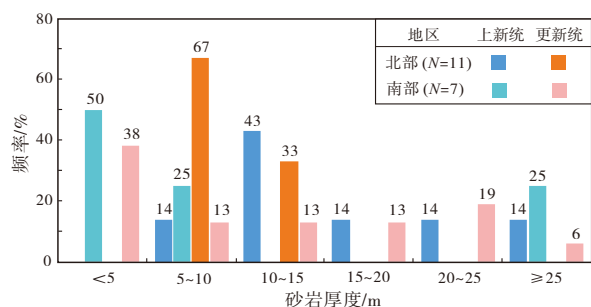


图7 巴巴多斯增生楔钻井砂岩厚度分布统计

Fig. 7 Statistics of drilled sandstone thickness in Barbados accretionary wedge

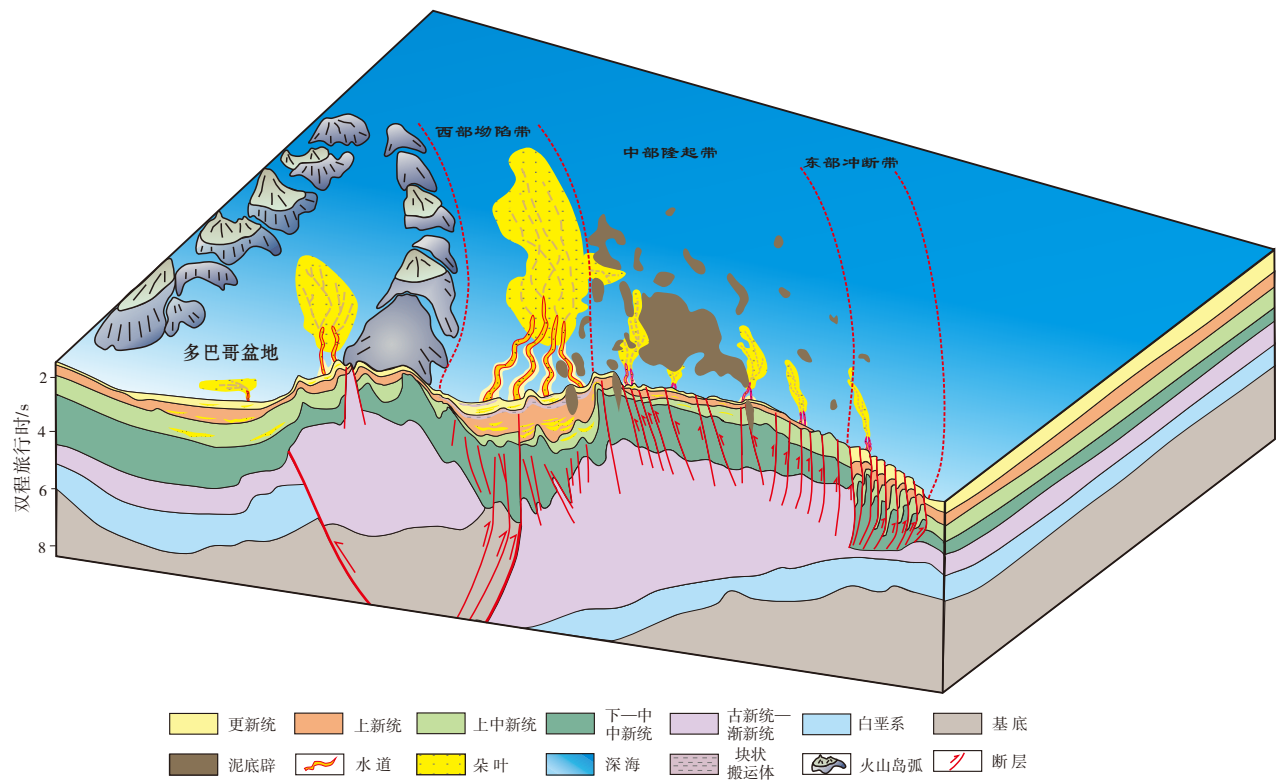


图8 巴巴多斯增生楔深水扇沉积模式

Fig. 8 Sedimentary model of deep-water fans in Barbados accretionary wedge

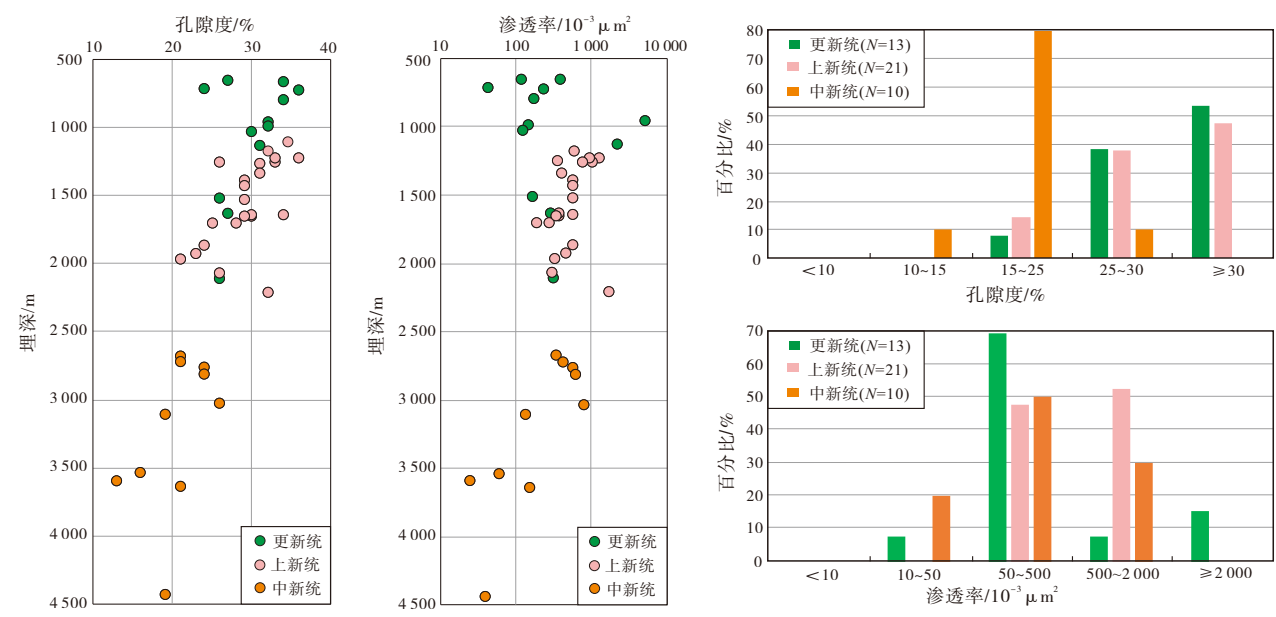


图9 巴巴多斯增生楔钻井储层物性统计

Fig. 9 Physical property statistics of drilled reservoirs in Barbados accretionary wedge

3.3 早期高幅构造圈闭有利于生物气快速聚集,成藏条件有利

中新世以来,受加勒比板块挤压影响,研究区发育两种断裂类型:NE—SW走向逆冲断裂,NW—SE走向正断裂。NE—SW走向的逆冲断裂与增生楔形成过程中的区域挤压应力相关,多形成大型高幅断背斜圈闭。NW—SE走向的拉张型断裂是区域挤压强度差异所产生的调节性阶梯状正断层,多形成小型低幅反向正断层遮挡断块圈闭,断距整体较小,活动较弱。与此相对应,研究区主要发育两类生物气藏(图10)。

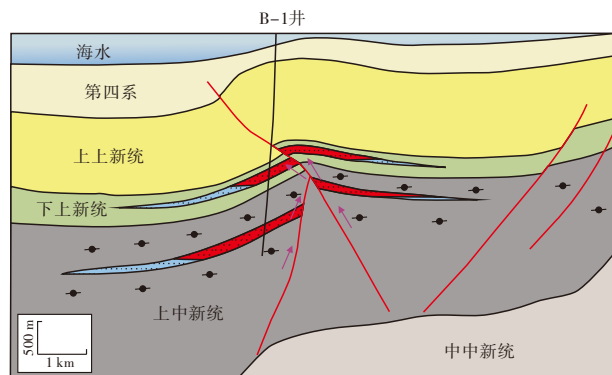
(1) 中新统大型高幅断背斜型生物气藏

B-1气藏位于巴巴多斯增生楔西部坳陷带,水深为1 911 m,完钻于上中新统。该气藏揭示上新统和中新统两套气层,下上新统气层厚度累计60 m,上中新统气层厚度累计44 m,为层状边水气藏(图10a),可采储量为 $425 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该气藏圈闭类型为断背斜,受区域挤压应力影响,圈闭形成于中新世,地层隆升幅度大,上新统、中新统圈闭幅度分别为230 m、300 m。储层沉积相类型为水道-朵叶复合体,孔隙度介于19%~28%,渗透率介于 $(292 \sim 534) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,气层段流度最大为 $2 710 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。该气藏临近生烃灶,中新统烃源岩自晚中新世开始排烃,现今仍处于有利生物气窗,大型断裂沟通烃源岩和中新统一上新统储层,圈闭处于生物气汇聚有利区,长期接受供烃,近源成藏。

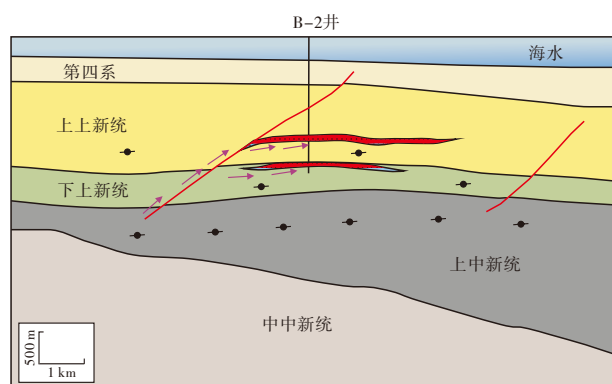
(2) 上新统反向正断层遮挡型生物气藏

B-2气藏位于巴巴多斯增生楔西部坳陷带,水深为2 102 m,完钻于上新统。该气藏揭示上上新统和下上新统两套气层(图10b),上上新统气层厚度累计39 m,下上新统气层厚度累计33 m,可采储量为 $198 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该气藏圈闭类型为调节型反向正断层遮挡断块圈闭,圈闭形成于上新世,地层隆升幅度小,上上新统、下上新统圈闭幅度分别仅为100 m、55 m。储层沉积相类型为水道-朵叶复合体,孔隙度介于23%~32%,渗透率介于 $(175 \sim 1 391) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,气层段流度最大为 $3 452 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。该气藏临近生烃灶,中新统和上新统烃源岩处于有利生物气窗,断层沟通中新统一上新统烃源岩和上新统储层。由于圈闭于上新世末期形成,且圈闭幅度

仅50~100 m,并未处于生物气有利汇聚区,因此充注效率低且时间短,储量规模有限。



(a) 大型高幅断背斜成藏模式图



(b) 反向正断层遮挡断块圈闭成藏模式图

图例: 气层 (Gas layer), 水层 (Water layer), 烃源岩层 (Source rock layer), 天然气运移方向 (Natural gas migration direction), 断层 (Fault)

图10 巴巴多斯增生楔西部坳陷带典型圈闭类型及生物气成藏模式

Fig. 10 Typical trap types and biogenic gas accumulation models in the western depression of Barbados accretionary wedge

基于已发现气田数据的统计分析,圈闭幅度与气柱高度、储量丰度呈正相关(图11)。统计结果表明:圈闭幅度大于200 m的气藏储量丰度大于 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,气柱高度大于200 m,部分发现井揭示气柱高度大于圈闭幅度,表现为构造-岩性油气藏;圈闭幅度小于100 m的气藏储量丰度多小于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,气柱高度多介于50~100 m。据此分析,研究区大型断背斜或背斜多形成于晚中新世,圈闭幅度高,接受油气充注时间长,生物气高效聚集成藏;小型反向正断层遮挡断块圈闭多形成于上新世末期—更新世,接受油气充注时间短,且圈闭幅度低,充注效率低,气藏储量规模有限,储量丰度较低。

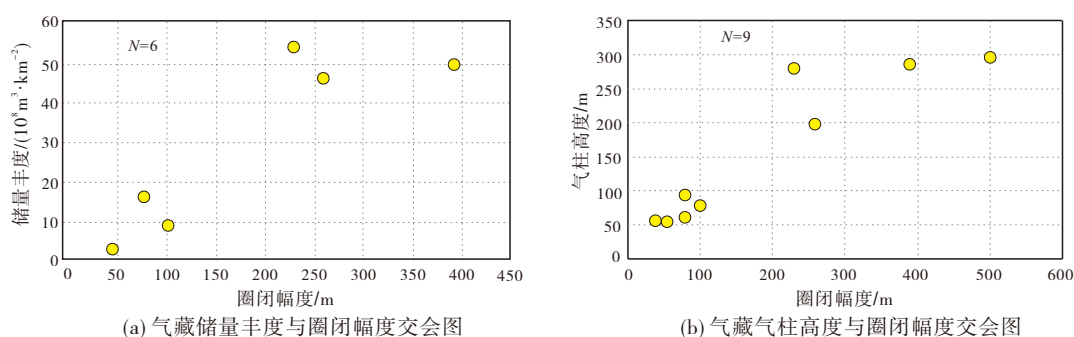


图 11 巴巴多斯增生楔西部坳陷带天然气藏储量丰度、气柱高度与圈闭幅度交会图

Fig. 11 Crossplots of reserve abundance, gas column height and trap amplitude respectively of natural gas pools in the western depression of Barbados accretionary wedge

3.4 晚期保存条件是中部隆起带和东部冲断带生物气成藏的关键要素

由于时代新、埋藏浅、压实程度低,不可避免造成生物气的纵向散失,生物气藏始终处于气体聚集和散失的动态平衡中,因此稳定的构造对生物气成藏至关重要^[28-31]。研究区在区域挤压应力影响下发育背斜圈闭、泥底辟遮挡型圈闭以及逆冲断层遮挡形成的断鼻构造。

背斜圈闭相对保存条件较好,有利于生物气聚集成藏。以C-1井为例,该目标为背斜圈闭,分别在上新统中部、中新统顶部和中部分别钻遇24 m、21 m和3 m的气层,获得可采储量 $566 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该目标圈闭于更新世后停止活动,气层上覆泥岩盖层厚约700~900 m,有利于生物气的保存。

中部隆起带广泛发育泥底辟遮挡型圈闭。上新世以来受加勒比板块挤压影响,增生楔东部广泛发育泥底辟,持续活动至今。钻至该类圈闭的预探井全部失利,晚期泥底辟的活动导致生物气藏遭到破坏。以C-2井为例,圈闭为泥底辟侧向遮挡型圈闭,该井钻遇更新统和上新统优质深水朵叶储层,失利原因主要为晚期保存条件不佳——朵叶砂体与泥底辟搭接,由海底地形可见泥底辟至今仍在活动,剧烈活动的泥底辟导致侧翼气藏被破坏(图12a)。东部冲断带广泛发育受逆冲断层遮挡所形成的断鼻构造和断背斜构造(图12b),逆冲断层至今仍在剧烈活动,导致该区带保存条件差。目前东部冲断带仅有1口钻井,以失利告终。因此,对于中部隆起带和东部冲断带,晚期活动至今的泥底辟和逆冲断层导致晚期保存条件不利,油气勘探成效差。

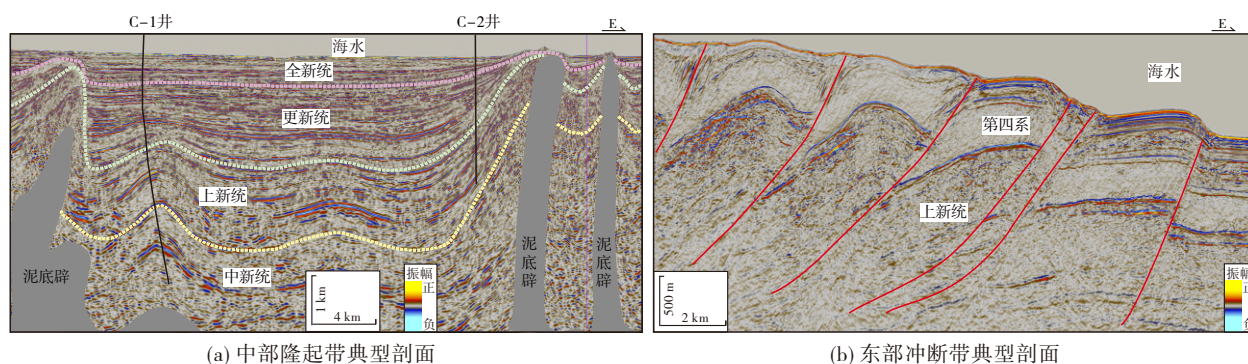


图 12 巴巴多斯增生楔中部隆起带与东部冲断带典型地震解释剖面

Fig. 12 Typical seismic interpretation profiles in the central uplift and eastern thrust zone of Barbados accretionary wedge

3.5 生物气成藏模式及有利勘探方向

目前已发现的生物气藏主要位于西部坳陷带。以上新统、中新统深水水道-朵叶砂体为主要储层,

处于生物气窗范围内的中新统一上新统泥岩生成的生物气直接或通过断层向上覆砂岩短距离运聚,生物气在背斜、断背斜、断块及岩性圈闭高部位近源聚集成藏,具有自生自储或者下生上储的特征(图13)。

巴巴多斯增生楔西部拗陷带生物气成藏条件较好,是有利的勘探方向。渐新世以来沉积的巨厚层泥岩为生物气成藏提供了大量的物质基础,中新世以来构造活动所形成的充足的可容纳空间是大型水道-朵叶复合体沉积的有利场所,挤压背景下洼中隆与储层纵向配置关系好,长期处于生物气的有利汇聚区,最终可形成规模生物气藏。

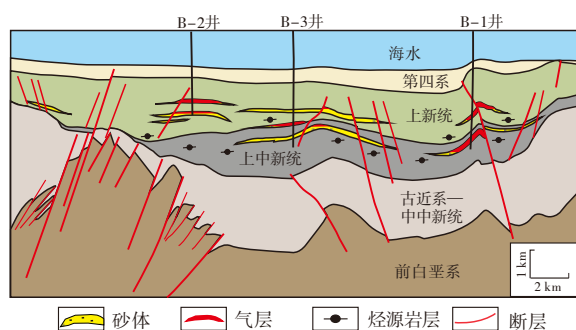


图13 巴巴多斯增生楔西部拗陷带生物气成藏模式

Fig. 13 Biogenic gas accumulation model in the western depression of Barbados accretionary wedge

4 结 论

基于地震地质解释、烃源岩地球化学分析和储层物性分析,对南美北部巴巴多斯增生楔的构造-沉积演化及新生界生物气成藏条件开展了系统研究。

(1)受加勒比板块的东向持续挤压影响,巴巴多斯增生楔构造东西分带,构造活动西早东晚,自西向东依次发育西部拗陷带、中部隆起带和东部冲断带。西部拗陷带发育大型凹陷,圈闭类型主要为背斜、断背斜和断块圈闭;中部隆起带广泛发育泥底辟,圈闭类型以泥底辟遮挡型圈闭为主;东部冲断带发育系列逆冲断层,圈闭类型为断块和断背斜。

(2)巴巴多斯增生楔生物气富集规律体现在以下4个方面:西部拗陷带内厚层泥岩提供充足的生物气源;水道-朵叶复合体多发育于西部拗陷带大型凹陷中,晚期构造和储层配置关系好;早期高幅断背斜圈闭有利于生物气高效聚集成藏;晚期保存条件是生物气成藏的关键因素,稳定的构造对生物气成藏至关重要。

(3)中新统一上新统泥岩生成的生物气直接或通过断层向上覆砂岩短距离运聚,生物气成藏表现为自生自储或者下生上储成藏模式。西部拗陷带生物气成藏条件较好,是油气勘探的有利方向。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 赵文智, 魏国齐, 等. 国外天然气勘探与研究最新进展及发展趋势[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 5-9.
JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, WEI Guoqi, et al. The recent progress and developing tendency in natural gas exploration and its studies seen at abroad[J]. Natural gas industry, 2002, 22(4): 5-9.
- [2] 杨松岭, 张科, 陈景阳, 等. 全球生物气藏分布特征及成藏条件[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 10-24.
YANG Songling, ZHANG Ke, CHEN Jingyang, et al. Distribution characteristics and hydrocarbon accumulation conditions of biogenic gas reservoirs all over the world[J]. Natural gas industry, 2019, 39(8): 10-24.
- [3] FEINSTEIN S, AIZENSHTAT Z, MILOSLAVSKI I, et al. Genetic characterization of gas shows in the east Mediterranean offshore of southwestern Israel [J]. Organic geochemistry, 2002, 33(12): 1401-1413.
- [4] 穆亚蓬, 王万春, 宋振响. 生物气源岩评价指标研究现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 775-779.
MU Yapeng, WANG Wanchun, SONG Zhenxiang. Present researches and prospects of the evaluation indicator of biogenic gas source rocks [J]. Natural gas geoscience, 2008, 19(6): 775-779.
- [5] 何家雄, 夏斌, 张启明, 等. 南海北部边缘盆地生物气和亚生物气资源潜力与勘探前景分析[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 167-174.
HE Jiaxiong, XIA Bin, ZHANG Qiming, et al. Resources base and exploration potential of biogenic and sub-biogenic gas in marginal basin of the northern South China Sea [J]. Natural gas geoscience, 2005, 16(2): 167-174.
- [6] ALAM M, ALAM M M, CURRAY J R, et al. An overview of the sedimentary geology of the Bengal Basin in relation to the regional tectonic framework and basin-fill history [J]. Sedimentary geology, 2003, 155(3/4): 179-208.
- [7] RACEY A, RIDD M F. Petroleum geology of Myanmar [M]. London: Geological Society of London, 2015: 93-108.
- [8] SALLER A, LIN Rui, DUNHAM J. Leaves in turbidite sands: the main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia[J]. AAPG bulletin, 2006, 90(10): 1585-1608.
- [9] 鲁银涛, 范国章, 冉伟民, 等. 孟加拉湾东北部上新统深水生物气成藏系统[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 7-16.
LU Yintao, FAN Guozhang, RAN Weimin, et al. Pliocene deepwater biogas accumulation system in the northeastern bay of Bengal[J]. Natural gas industry, 2022, 42(7): 7-16.
- [10] SHENELLE G. Tectonostratigraphic evolution of the Barbados Accretionary Prism and surrounding sedimentary basins within the Southeastern Caribbean-South America plate boundary zone[D]. Texas: University of Houston, 2018: 233.

- [11] 范国章, 马宏霞, 邵大力, 等. 缅甸若开海域深水生物气藏形成条件与富集规律[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 146–156.
- FAN Guozhang, MA Hongxia, SHAO Dali, et al. Deep-water biogas generation and accumulation in offshore Rakhine Basin, Myanmar[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(2): 146–156.
- [12] 焦贵浩, 张林, 李剑, 等. 柴达木盆地三湖地区生物气资源潜力及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(2): 1–5.
- JIAO Guihao, ZHANG Lin, LI Jian, et al. Resources potential and exploration direction of biogas in Sanhu region in Qaidam Basin[J]. China petroleum exploration, 2009, 14(2): 1–5.
- [13] 丁安娜, 王明明, 李本亮, 等. 生物气的形成机理及源岩的地球化学特征: 以柴达木盆地生物气为例[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 402–407.
- DING Anna, WANG Mingming, LI Benliang, et al. Biogas forming mechanism and geochemical characteristics of its source rock [J]. Natural gas geoscience, 2003, 14(5): 402–407.
- [14] 李本亮, 王明明, 魏国齐, 等. 柴达木盆地三湖地区生物气横向运聚成藏研究[J]. 地质论评, 2003, 49(1): 93–100.
- LI Benliang, WANG Mingming, WEI Guoqi, et al. Lateral migration and accumulation of biogenic gas in the Sanhu area, Qaidam Basin[J]. Geological review, 2003, 49(1): 93–100.
- [15] 王万春, 刘文汇, 王国仓, 等. 沉积有机质微生物降解与生物气源岩识别: 以柴达木盆地三湖坳陷第四系为例[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 318–327.
- WANG Wanchun, LIU Wenhui, WANG Guocang, et al. Biodegradation of depositional organic matter and identification of biogenic gas source rocks: an example from the Sanhu Depression of Qaidam Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2016, 37(3): 318–327.
- [16] 关德师. 控制生物气富集成藏的基本地质因素[J]. 天然气工业, 1997, 17(5): 16–20.
- GUAN Deshi. Fundamental geologic factors controlling biogas accumulation [J]. Natural gas industry, 1997, 17(5): 16–20.
- [17] 李宏伟, 王九拴, 邵林海, 等. 油气检测技术在三湖浅层生物气勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 770–775, 673, 854.
- LI Hongwei, WANG Jiushuan, SHAO Linhai, et al. Hydrocarbon detection in biogas exploration in Sanhu shallow [J]. Oil geophysical prospecting, 2013, 48(5): 770–775, 673, 854.
- [18] 史占祯. 渤海湾盆地及其外围的生物气研究[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 11–16.
- SHI Zhanzhen. Study on biogas in Bohaiwan Basin and its surroundings[J]. Natural gas industry, 2002, 22(5): 11–16.
- [19] 林春明, 李艳丽, 漆滨汶. 生物气研究现状与勘探前景[J]. 古地理论, 2006, 8(3): 317–330.
- LIN Chunming, LI Yanli, QI Binwen. Research status and exploration potential of biogenic gas [J]. Journal of palaeogeography, 2006, 8(3): 317–330.
- [20] 甘志红. 沉积环境对阳信洼陷生物气成藏的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 46–48.
- GAN Zhihong. The control of sedimentary environment over biogas reservoir formation in Yangxin subsag [J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2006, 13(6): 46–48.
- [21] 党玉琪, 侯泽生, 徐子远, 等. 柴达木盆地生物气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 374–378.
- DANG Yuqi, HOU Zesheng, XU Ziyuan, et al. The conditions for biogas accumulation in Qaidam Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2003, 24(5): 374–378.
- [22] 李东伟, 龚承林, 胡林, 等. 深水水道沉积内幕级次划分与精细刻画[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 553–564.
- LI Dongwei, GONG Chenglin, HU Lin, et al. Hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits [J]. Oil & gas geology, 2023, 44(3): 553–564.
- [23] 陈亮, 赵千慧, 王英民, 等. 深水水道沉积单元及演化分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 12–19.
- CHEN Liang, ZHAO Qianhui, WANG Yingmin, et al. Depositional elements of deepwater channels and their evolution [J]. Marine geology frontiers, 2020, 36(3): 12–19.
- [24] GONG Chenglin, WANG Yingmin, ZHU Weilin, et al. The central submarine canyon in the Qiongdongnan Basin, north-western South China Sea: architecture, sequence stratigraphy, and depositional processes [J]. Marine and petroleum geology, 2011, 28(9): 1690–1702.
- [25] LOWE D R, GRAHAM S A, MALKOWSKI M A, et al. The role of avulsion and splay development in deep-water channel systems: sedimentology, architecture, and evolution of the deep-water Pliocene Godavari “A” channel complex, India [J]. Marine and petroleum geology, 2019, 105: 81–99.
- [26] 廖计华, 徐强, 陈莹, 等. 白云—荔湾凹陷珠江组大型深水水道体系沉积特征及成因机制[J]. 地球科学, 2016, 41(6): 1041–1054.
- LIAO Jihua, XU Qiang, CHEN Ying, et al. Sedimentary characteristics and genesis of the deepwater channel system in Zhujiang Formation of Baiyun–Liwan Sag [J]. Earth science, 2016, 41(6): 1041–1054.
- [27] 梁建设, 黄兴文, 蔡文杰, 等. 墨西哥 Burgos 盆地 Perdido 构造带 Wilcox 组源–汇体系及勘探前景[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1439–1450.
- LIANG Jianshe, HUANG Xingwen, CAI Wenjie, et al. Source-to-sink system and exploration prospects of the Wilcox Formation in Perdido fold belt, Burgos Basin, Mexico [J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(12): 1439–1450.
- [28] 魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成

- 机理、分布规律与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84–89.
- WEI Guoqi, LIU Delai, ZHANG Ying, et al. Formation mechanism, distribution feature and exploration prospect of the Quaternary biogenic gas in Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum exploration & development, 2005, 32(4): 84–89.
- [29] 魏水建, 王金鹏, 管志强, 等. 柴达木盆地第四系陆相生物气形成机理与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 310–315, 323.
- WEI Shuijian, WANG Jinpeng, GUAN Zhiqiang, et al. Genetic mechanisms and controlling factors of terrestrial biogenic gas in the Quaternary of the Qaidam Basin[J]. Oil & gas geology, 2009, 30(3): 310–315, 323.
- [30] 帅燕华, 张水昌, 陈建平, 等. 深部生物圈层微生物营养物质来源机制及生物气源岩特征分析[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(7): 866–872.
- SHUAI Yanhua, ZHANG Shuichang, CHEN Jianping, et al. Source of nutrient substrates for microbes in deep biosphere and characteristics of biogenic gas source rock [J]. Scientia sinica (terrae), 2010, 40(7): 866–872.
- [31] 李明宅, 张洪年. 生物气成藏规律研究[J]. 天然气工业, 1997, 17(2): 18–22, 5–6.
- LI Mingzhai, ZHANG Hongnian. Research on the formation of biogas reservoir [J]. Natural gas industry, 1997, 17(2): 18–22, 5–6.

编辑:董庸

Biogenic gas accumulation conditions and enrichment rules in Barbados accretionary wedge, north of South America

TAO Weixiang, CHENG Tao, CHEN Liang

CNOOC International Limited

Abstract: In recent years, many large-scale biogenic gas reservoirs have been discovered in the world, which has become one of the hotspots of natural gas exploration. Biogenic gas reservoirs are mainly distributed in passive continental margin basin, foreland basin, craton basin, fore-arc basin, and accretionary wedge, etc. The conditions of biogenic gas accumulation in accretionary wedge are complicated due to the intense tectonic activity, and there is a lack of systematic understanding of biogenic gas enrichment rules and main controlling factors in accretionary wedge. Based on 2D seismic, well data, we discuss the biogenic gas accumulation conditions in Barbados accretionary wedge, north of South America and define the hydrocarbon migration and accumulation model, and furtherly reveal the law of oil and gas enrichment and point out the favorable exploration direction. The results show that: (1) From west to east, the inner (western) depression, the central uplift, and the outer (eastern) thrust zone develop successively, and the inner zone develops the large sag. (2) The thick mudstone in the large sag provides sufficient biogenic gas source. Large channel complexes, channel-levee complexes, channel-lobe complexes, and lobes are mainly developed in western depression, which has a good relationship with traps. Early high relief thrust-faulted anticline is located in the convergence area of oil and gas, which is conducive to efficient biogenic gas accumulation. (3) Since the Pliocene, under the compression of the Caribbean Plate, the central uplift belt has widely developed mud diapirs, forming numerous mud diapir-related structural traps. The continuous activity of these mud diapirs persists to the present day. The activity of late-stage mud diapirs has led to the destruction of biogenic gas reservoirs, resulting in the failure of all drilling attempts on the flanks of the mud diapirs. So late preservation conditions are the key factors for biogenic gas accumulation. (4) The model of Biogenic gas self-generation and self-storage or lower-generation and upper-storage is established. The western depression has favorable conditions for the formation of biogenic gas reservoirs and is a favorable exploration direction.

Key words: biogenic gas; deep-water sedimentation; preservation condition; accumulation model; accretionary wedge; South America

TAO Weixiang, First author: PhD, Senior Engineer, Vice President and Chief Geologist of CNOOC International Co., Ltd, focus on overseas oil and gas exploration research and management. Add: China National Offshore Oil Corporation Building, No. 6 Taiyanggong South Street, Chaoyang District, Beijing 100028, China. E-mail: taowx@cnoocinternational.com