

文章编号: 0253-2697(2024)07-1061-17 DOI:10.7623/syxb202407003

塔里木盆地轮南—古城地区寒武系大型台地边缘 层序结构、沉积演化及油气勘探潜力

朱永进^{1,2} 郑剑锋^{1,2} 俞广¹ 陈永权³ 康婷婷³ 张友^{1,2} 陈胜⁴ 熊冉^{1,2} 韩长伟⁵

(1. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 浙江杭州 310023;

3. 中国石油塔里木油田公司 新疆库尔勒 841000; 4. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院 四川成都 610213;

5. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院库尔勒分院 新疆库尔勒 841000)

摘要:针对塔里木盆地轮南—古城地区寒武系台缘带规模储-盖组合的类型及时空分布不清的问题,利用最新采集/拼接处理的轮南—富满地区的三维地震数据体、30余条二维地震格架测线、9口钻井的岩屑薄片和碳/氧稳定同位素曲线等资料,建立了台地内部—台地边缘—盆地的年代地层格架,开展了以层序或体系域为单元的沉积相研究,落实了规模储-盖组合和烃源岩分布特征,评价了有利勘探区带。研究结果表明:①寒武系台缘带可识别出4个二级层序和11个三级层序,横向上,层序结构差异明显,轮南地区结构完整,具典型侧向叠置的特征,而古城地区部分缺失纽芬兰统一第二统(SQ1—SQ3)层序且垂向加积“堆垛”特点突出;②时间上,轮南—古城地区依次经历了富泥质缓坡、低角度前积缓坡—弱镶边台地、垂向加积蒸发湖占主导镶边台地和侧向加积平顶镶边台地4个演化阶段,塔南古陆和古海平面等控制了空间差异;③轮南—古城地区发育9套台缘丘滩带(SQ3—SQ11)、3套膏盐岩(SQ5—SQ7)以及陆棚相和斜坡相两类烃源岩(SQ1、SQ6、SQ8—SQ11);④评价出膏下台缘丘滩带、泥下残余丘滩带、致密碳酸盐岩下丘滩带和泥间斜坡重力流4类有效储-盖组合,构建了5类成藏模式,膏下台缘丘滩带和泥下残余丘滩带是近期实现勘探突破并实施万米深地钻探的最佳储-盖组合,泥间斜坡重力流也是一种值得探索的新类型储-盖组合。

关键词:台地边缘;层序结构;沉积演化;储-盖组合;寒武系;塔里木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sequence architecture, sedimentary evolution and hydrocarbon exploration potential of the large Cambrian platform margin in Lunnan-Gucheng area of Tarim Basin

Zhu Yongjin^{1,2} Zheng Jianfeng^{1,2} Yu Guang¹ Chen Yongquan³ Kang Tingting³

Zhang You^{1,2} Chen Sheng⁴ Xiong Ran^{1,2} Han Changwei⁵

(1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 2. CNPC Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000,

China; 4. Southwest Geophysical Research Institute, CNPC BGP Inc., Sichuan Chengdu 610213, China;

5. Korla Branch of Geophysical Research Institute, CNPC BGP Inc., Xinjiang Korla 841000, China)

Abstract: In response to the unclear types and temporal-spatial distribution of the large-scale reservoir-cap assemblages of Cambrian platform margin in Lunnan-Gucheng area of Tarim Basin, based on the latest collected/merged three-dimensional seismic data, more than 30 two-dimensional seismic survey lines, thin sections of rock debris from 9 drilling wells, and C/O stable isotope curves from the Lunnan-Fuman area, the paper establishes a chronostratigraphic framework from platform interior to platform margin to basin, carries out the research of sedimentary facies using the sequence or system tract as a unit, makes clear large-scale reservoir-cap assemblages and source rock distribution, and evaluates favorable exploration zones. The research results show as follows. (1) Four second-order sequences and 11 third-order sequences are identified in Cambrian platform margin. Horizontally, there are significant differences in sequence architecture. The Lunnan area features a complete structure with typical lateral stacking, while Gucheng area partially lacks sequences from Terreneuvian to Epoch2 (SQ1-SQ3) and has the prominent characteristic of vertical accretion and stacking. (2) Lunnan-Gucheng area experienced four evolution stages in succession, i. e., mud-rich ramp, low-angle progradation ramp to weak-rimmed platform, rimmed platform dominated by vertical accretion evaporation lagoon, and lateral accretion flat-topped

基金项目: 中国石油基础性前瞻性重大科技专项“叠合盆地中下组合油气成藏与保持机制研究”(2023ZZ02)和中国石油攻关性应用性重大科技专项“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(2023ZZ1601)资助。

第一作者: 朱永进,男,1984年8月生,2013年获长江大学博士学位,现为中国石油杭州地质研究院高级工程师,主要从事深层—超深层碳酸盐岩相古地理重建和领域评价研究工作。Email: zhuyj_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 郑剑锋,男,1977年7月生,2004年获长江大学硕士学位,现为中国石油杭州地质研究院高级工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究工作。Email: zhengjf_hz@petrochina.com.cn

rinned platform, and the spatial differentiation was controlled by Tanan oldland and ancient sea level. (3) Nine sets of platform margin mound-shoal belts (SQ3-SQ11), 3 sets of gypsum salt rock belts (SQ5-SQ7), and 6 sets of source rocks (SQ1, SQ6, SQ8-SQ11) have been developed in Lunnan-Gucheng area. (4) Four types of effective reservoir-cap assemblages, i. e., the platform margin mound-shoal belt covered with gypsum, the residue mound-shoal belt covered with soil, the mound-shoal belt covered with compact carbonate rocks, and the slope gravity flow, were evaluated and five types of hydrocarbon accumulation models were established. The platform margin mound-shoal belt covered with gypsum and the residue mound-shoal belt covered with soil are the best reservoir-cap assemblage, where recent breakthroughs have been made and the depth of drilling can reach 10 000 m. The gravity flow on mud slopes is also a new type of reservoir-cap assemblage worthy of exploring.

Key words: platform margin; sequence architecture; sedimentary evolution; reservoir-cap assemblages; Cambrian; Tarim Basin

引用:朱永进,郑剑锋,俞广,陈永权,康婷婷,张友,陈胜,熊冉,韩长伟.塔里木盆地轮南—古城地区寒武系大型台地边缘层序结构、沉积演化及油气勘探潜力[J].石油学报,2024,45(7):1061-1077.

Cite:ZHU Yongjin,ZHENG Jianfeng,YU Guang,CHEN Yongquan,KANG Tingting,ZHANG You,CHEN Sheng,XIONG Ran,HAN Changwei.Sequence architecture,sedimentary evolution and hydrocarbon exploration potential of the large Cambrian platform margin in Lunnan-Gucheng area of Tarim Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2024,45(7):1061-1077.

碳酸盐台地边缘沉积不仅是古地理格局与演化的重要记录,也是油气勘探的重点对象^[1-2]。塔里木盆地轮南—古城地区寒武系台缘带是中国规模最大的碳酸盐台地边缘,其SN向长为355 km、EW向宽为22~91 km,形成于构造相对稳定的裂后克拉通建造阶段^[3],油气成藏条件有利,是目前尚未突破的风险勘探区之一。继中国石油化工股份有限公司(中国石化)在2005年部署塔深1井并钻揭在8 000 m以深仍发育规模优质白云岩礁滩储层以来,对轮南—古城地区寒武系台地边缘的探索从未停止。2020年,轮探1井在8 200余米埋深处获得产油量为134 t/d、产气量为45 917 m³/d的高产工业油气流^[4],使得轮南—古城地区再次受到中国石油天然气集团有限公司(中国石油)和中国石化两家能源公司的高度关注。然而,后期部署的轮探3井、于深1井和塔深5井等多口重点风险探井均因储-盖组合不落实、断裂破坏等因素而失利,使得勘探工作再次陷入领域评价难的局面。

关于塔里木盆地轮南—古城地区寒武系台缘带的研究,已往的报道主要集中在其两端的轮南低凸起和古城低凸起。例如:赵宗举等^[5]和高志前等^[6]基于二维地震测线上丘滩体的几何叠置样式提出寒武系台缘带总体发生进积—加积增生,轮南地区的沉积以进积缓坡—弱镶边台地—镶边台地为主要特点,古城地区则呈现出进积—加积型缓坡—加积镶边台地序列,具有分段差异;刘存革等^[7]利用塔河油田高精度三维地震资料识别出16个地震地层,建立了缓坡—平顶陆棚—镶边陆棚的台地演化模型,并提出上寒武统斜坡区发育有效烃源岩的观点;张君龙等^[8]基于古城地区寒武系不同类型台缘丘滩体发育模式和古地貌的耦合关系提出,具“大丘大滩”特征的陡坡非对称加积型丘滩体有利储层在该地区最为发育。上述创新观点和认识为深化塔里木盆地轮南—古城地区寒武系台缘带沉

积结构的理解和领域评价奠定了良好的基础,有力推动了轮南低凸起和古城低凸起的风险勘探部署。但同时,缺乏统一的层序对比方案也使得研究区面临如下关键问题或争议:难以实现台内—台缘—塔东盆地EW方向和轮南—古城地区SN方向的等时对比;难以实现寒武纪台地类型时空转换、沉积模式和丘滩体发育特征对比;难以实现规模储-盖组合类型与分布对比。

笔者基于轮南—富满地区(15 000 km²)最新采集/拼接处理的三维数据体和30余条二维地震格架大测线、9口探井的岩屑薄片(采样间隔为2~5 m、制作薄片数为3 200余片)、碳/氧稳定同位素曲线^[9]和常规测井曲线等资料,以建立稳定碳同位素约束下的井-震地层层序格架为重点,开展以层序或体系域为单元的沉积相分析,阐明层序格架内台地类型转换和生-储-盖时空发育特征,明确规模储-盖组合的分布特征,并结合走滑断裂的发育特征评价有利区带,以期为进一步油气勘探部署提供可靠的地质依据。

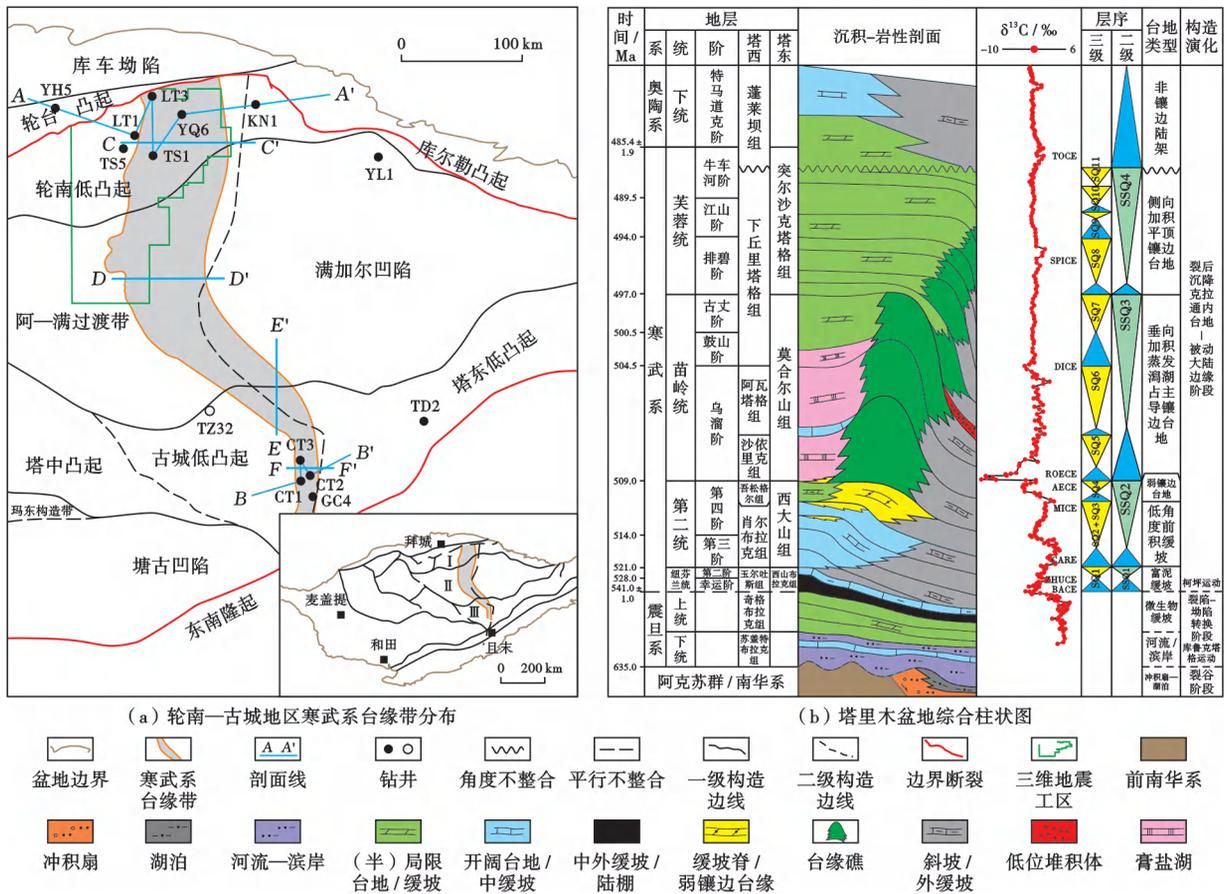
1 地质背景

塔里木盆地位于中国西部,是蕴含丰富油气资源的大型叠合复合盆地,具有“三隆四坳”的构造格局^[10];纵向上,可划分为4个构造层,即南华系—奥陶系构造层、志留系—泥盆系构造层、石炭系—三叠系构造层和侏罗系—第四系构造层。南华系—奥陶系构造层的发育与罗迪尼亚超大陆裂解和原特提斯洋(古亚洲洋)扩张密切相关^[11-13],先后经历了南华纪裂陷期、震旦纪裂陷—坳陷转换期、寒武纪—早奥陶世克拉通台地建造扩张期、中—晚奥陶世克拉通台地挤压萎缩—淹没消亡期4个演化阶段。轮南—古城地区寒武系台缘带形成于台地建造扩张期。

平面上,轮南—古城地区寒武系台缘带位于塔北隆起、北部坳陷和中央隆起带,包括轮南低凸起、阿—

满过渡带、满加尔凹陷、古城低凸起和塔东低凸起 5 个次级构造单元[图 1(a)]。研究区在不同构造演化期的沉积分异特征明显。南华系主要发育冲积扇与湖泊沉积体系;震旦系主要发育冲积扇—三角洲、滨岸—陆棚和碳酸盐缓坡 3 类沉积体系,经历了从拗陷盆地向

碳酸盐台地的演化过程;寒武纪—一早奥陶世,沉积体系由缓坡向台地转化,岩性主要为白云岩、膏盐岩、灰岩和泥页岩等^[14]。轮南—古城地区发育大型进积型台缘带[图 1(b)],与满加尔地区的盆地相共同构成了“西台东盆”的沉积分异格局。



注: I—塔北隆起; II—北部拗陷; III—中央隆起; SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ5、SQ6、SQ7、SQ8、SQ9、SQ10、SQ11—三级层序编号; SSQ1、SSQ2、SSQ3、SSQ4—二级层序编号; BACE、ZHUCE、CARE、MICE、AECE、ROECE、DICE、SPICE、TOCE—碳同位素偏移异常事件。

图 1 研究区位置与寒武系台地边缘沉积演化综合地层特征

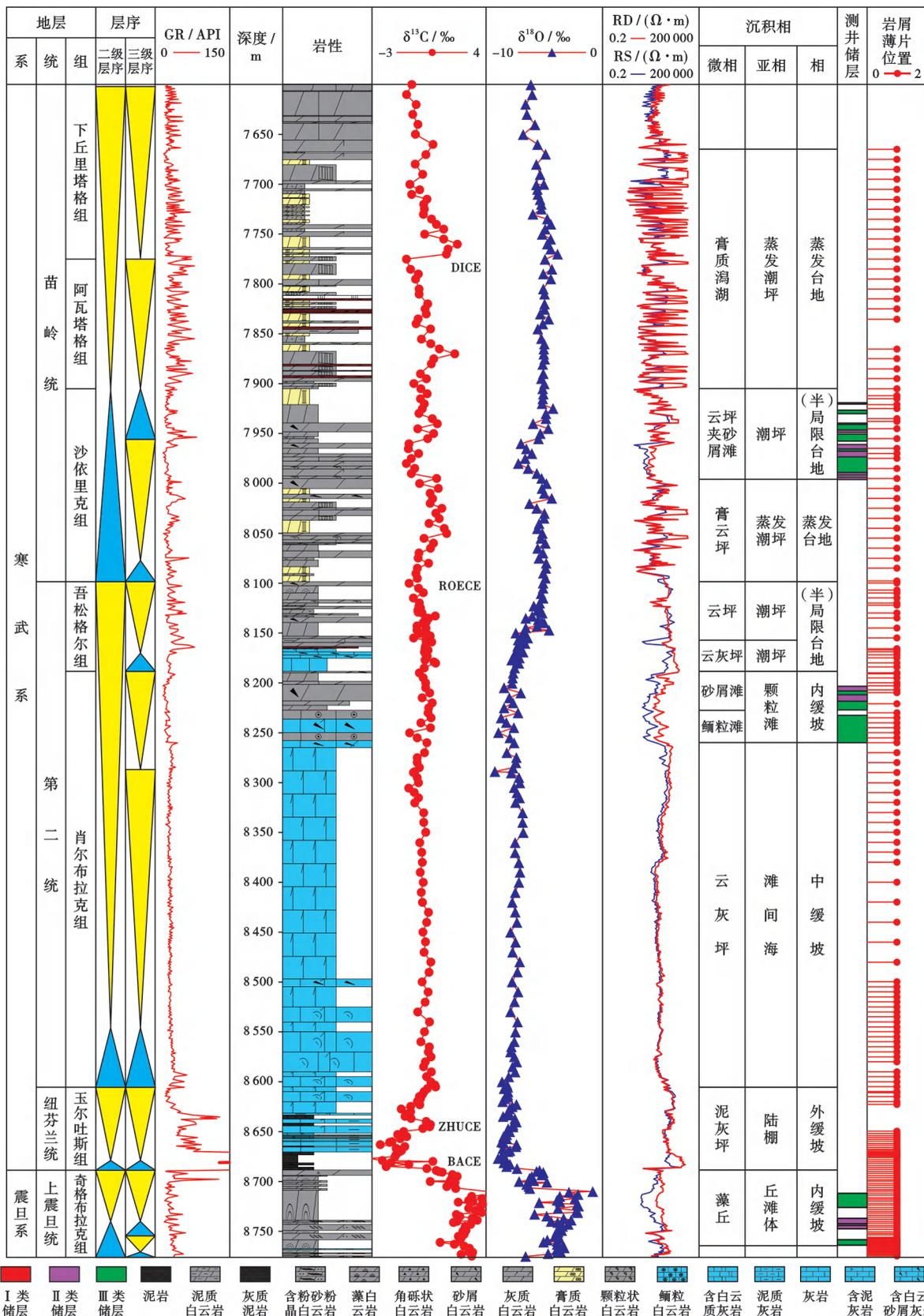
Fig. 1 Location of the study area and comprehensive stratigraphic characteristics of sedimentary evolution of Cambrian platform margin

中一晚奥陶世,塔里木盆地的区域构造应力环境由伸展转为挤压,塔西台地的主构造应力方向由 EW 向转为 SN 向,同期发育的规模走滑断裂体系和多期区域不整合界面^[15]为油气成藏和规模断控岩溶储层提供了有利条件。加里东晚期后,古城低凸起、阿—满过渡带和轮南低凸起等次级构造单元趋于稳定,构造改造强度减弱,这有利于轮南—古城地区寒武系台缘带油气成藏与保存。

2 层序地层特征

以塔里木盆地寒武系塔西台地为主要研究对象,基于生物地层、露头区岩性组合、地震同相轴终止反射

特征和测井旋回性数学分析等技术和方法^[16-18],前人已公开报道过多套层序划分方案。不同阶段的资料基础、品质和叠合盆地自身结构的复杂性使得层序划分方案差异较大,尚未能实现台地内部—台地边缘—盆地和轮南—古城地区寒武系台缘的整体等时对比^[19]。笔者运用 Vail 经典层序地层学原理,基于钻井、地震和全井段碳同位素曲线等新增资料,突出“区域性不整合、全球/区域性碳同位素异常^[20-21]、坡折轨迹迁移趋势^[22]、丘滩体叠置样式、地震终止反射特征和岩性转换”6 项标识,在轮南—古城地区寒武系台缘带内部识别出 4 个二级(复合)层序和 11 个三级层序[图 1(b)、图 2]。SSQ1 对应纽芬兰统玉尔吐斯组,时间跨度为



注:GR—自然伽马;RD—深侧向电阻率;RS—浅侧向电阻率;DICE、ROECE、ZHUCE、BACE—碳同位素偏移异常事件;
 I类储层—孔隙度≥4.5%,渗透率≥5.0 mD; II类储层—孔隙度为2.5%~4.5%,渗透率为0.1~5.0 mD; III类储层—孔隙度为1.5%~2.5%,渗透率为0.01~0.10 mD。

图2 轮南低凸起轮探1井寒武系沉积-层序综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Cambrian sedimentation and sequence of Well Luntan1 in Lunnan low uplift

21 Ma,在柯坪露头区可识别出 2~3 个暴露不整合界面,在地震剖面上表现为 1 个高度连续、强反射的同相轴反射结构,仅可识别出 1 个三级层序 SQ1。复合层序 SSQ2 对应第二统肖尔布拉克组(SQ2+SQ3)和吾松格尔组(SQ4)。SSQ3 对应苗岭统沙依里克组至下丘里塔格组下段,由沙依里克组中一下段(SQ5)、沙依里克组灰岩段—阿瓦塔格组(SQ6)和下丘里塔格组下段(SQ7)3 个三级层序构成。SSQ4 对应下丘里塔格组中—上段,在其内部可识别出 SQ8—SQ11 共 4 个三级层序。SQ8 内部可进一步识别出 SQ8-1、SQ8-2、SQ8-3 和 SQ8-4 共 4 个亚层序。层序受寒武系与奥陶系间区域不整合面影响,保存不完整,分布相对局限(图 3、图 4)。

2.1 层序界面特征

2.1.1 二级层序界面特征

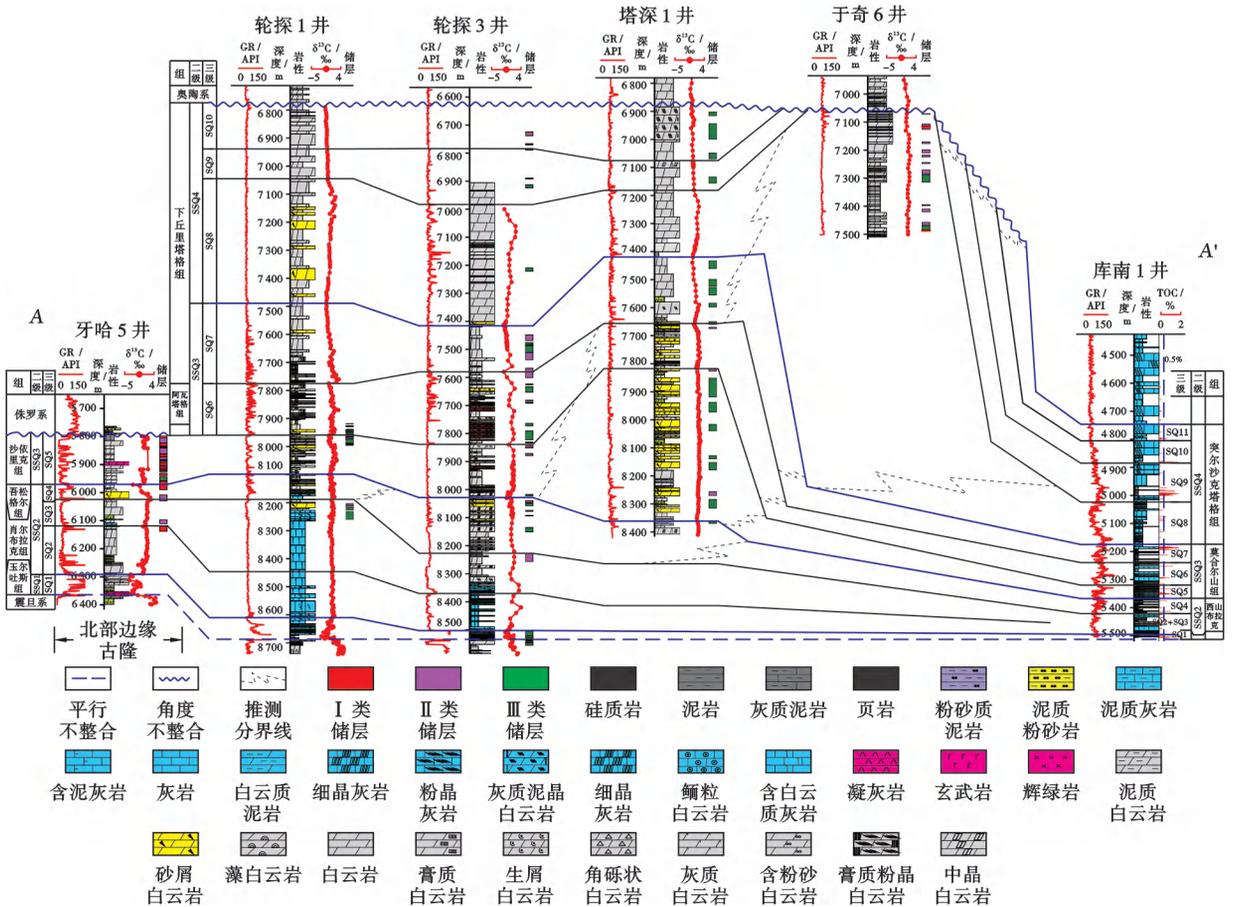
(1) SSQ1 底界面(纽芬兰统玉尔吐斯组底界面)

该底界面为震旦纪末期柯坪构造运动形成的区域不整合界面^[23]。界面之下为上震旦统奇格布拉克组角砾

化白云岩,界面之上为玉尔吐斯组中缓坡—外缓坡/陆棚沉积,底部普遍发育薄层状含磷质沉积岩[图 5(a)]。自然伽马(GR)测井曲线在界面之下表现为平滑箱状(低 GR 值),向上转变为齿状—尖峰状,GR 最高值达 1440 API(图 2)。在成像测井图像上,界面之下表现为亮黄色块状沉积,发育裂缝或角砾状板块,而界面之上则表现出暗褐色纹层状沉积特征。在碳稳定同位素($\delta^{13}C$)曲线上,界面之上可见明显的碳同位素负偏移特点, $\delta^{13}C$ 值由约 0.36‰ 快速降至 -2.1‰,即 BACE(Basal Cambrian Carbon isotope Excursion) 负异常^[24] [图 1(b)、图 2];该特征不仅局限于轮南—古城地区(已钻井均有发育,横向对比性强),在区域上也具有可对比性。在地震层序结构剖面上,SSQ1 底界面表现为高度连续、强波峰反射,界面之下在轮南地区可见中—低角度削截反射,其可识别性及追踪性强(图 6)。

(2) SSQ2 底界面(第二统肖尔布拉克组底界面)

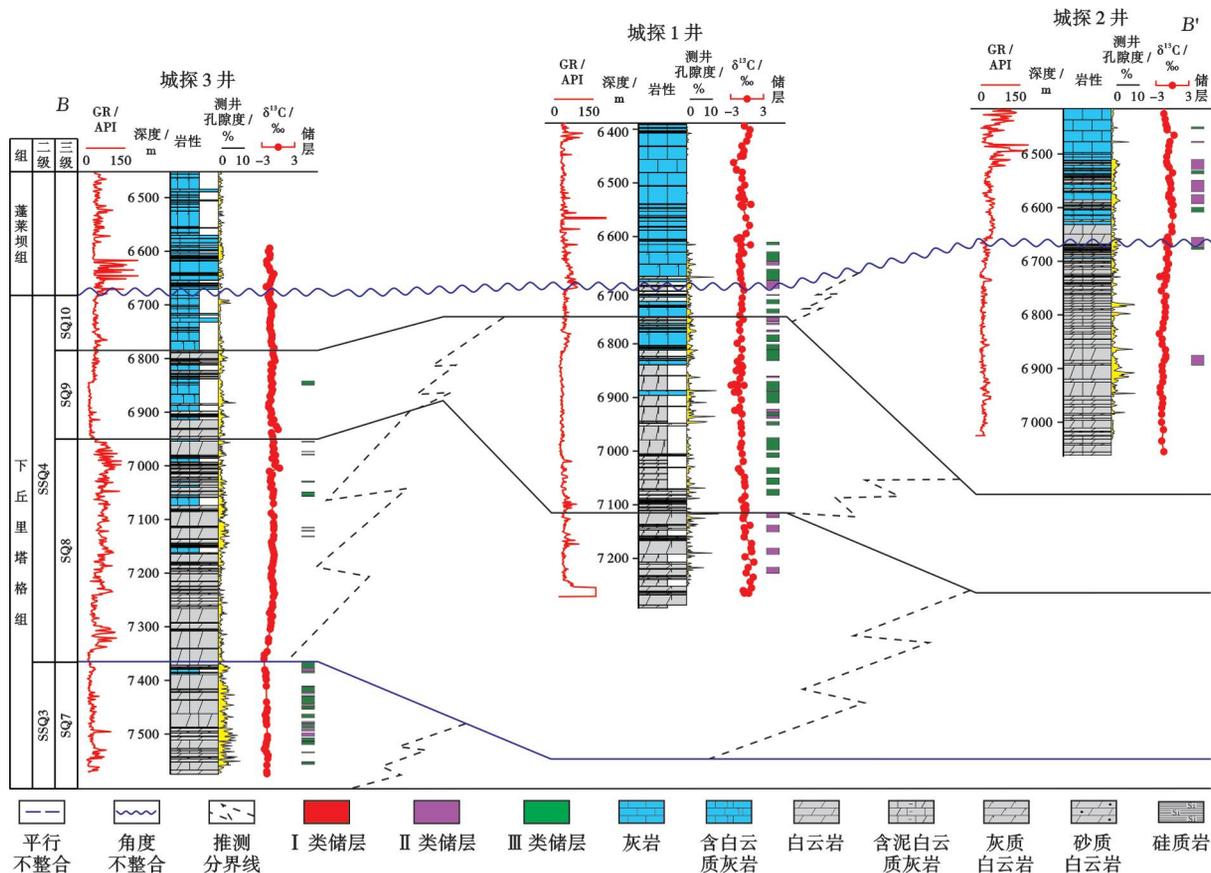
该底界面为一个岩性转换面,在不同的构造区内有所差异,在柯坪地区可见区域暴露界面。界面之下



注:GR—自然伽马;TOC—总有机碳;I类储层—孔隙度 $\geq 4.5\%$,渗透率 $\geq 5.0\text{mD}$;II类储层—孔隙度为 $2.5\% \sim 4.5\%$,渗透率为 $0.1 \sim 5.0\text{mD}$;III类储层—孔隙度为 $1.5\% \sim 2.5\%$,渗透率为 $0.01 \sim 0.10\text{mD}$;SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ5—三级层序编号;SSQ1、SSQ2、SSQ3、SSQ4—二级层序编号。

图 3 轮南低凸起过牙哈 5 井—库南 1 井寒武系钻井层序对比(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Stratigraphic correlation of the Cambrian from Well Yaha5 to Well Ku'nan1 in Lunnan low uplift



注:GR—自然伽马; I类储层—孔隙度 $\geq 4.5\%$,渗透率 $\geq 5.0\text{mD}$; II类储层—孔隙度为 $2.5\% \sim 4.5\%$,渗透率为 $0.1 \sim 5.0\text{mD}$; III类储层—孔隙度为 $1.5\% \sim 2.5\%$,渗透率为 $0.01 \sim 0.10\text{mD}$; SQ7、SQ8、SQ9、SQ10—三级层序编号; SSQ3、SSQ4—二级层序编号。

图4 古城低凸起过城探3井—城探2井寒武系钻井层序对比(剖面位置见图1)

Fig. 4 Stratigraphic correlation of the Cambrian from Well Chengtan3 to Well Chengtan2 in Gucheng low uplift

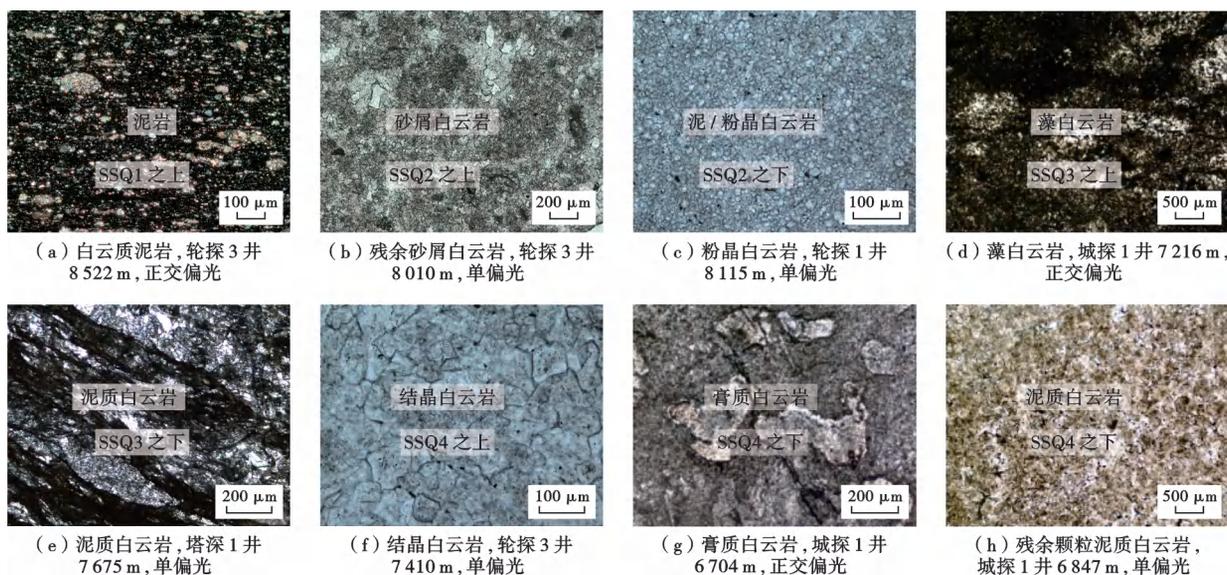
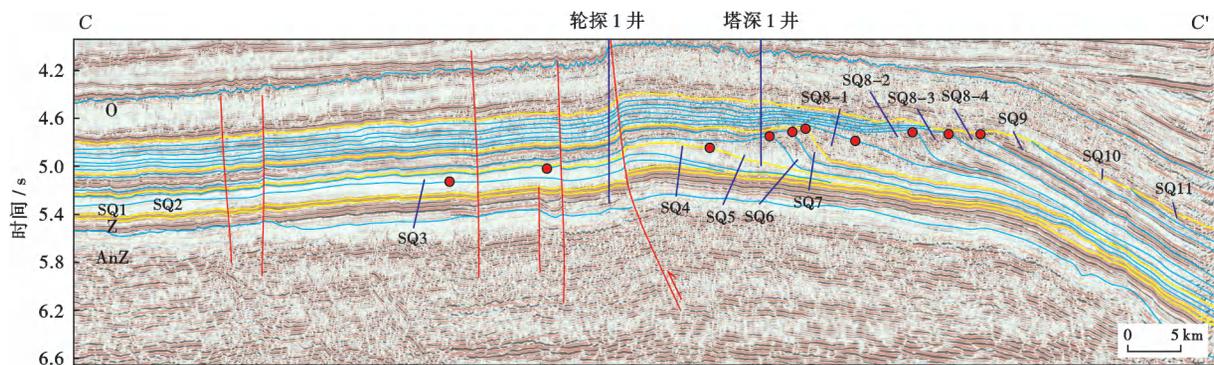
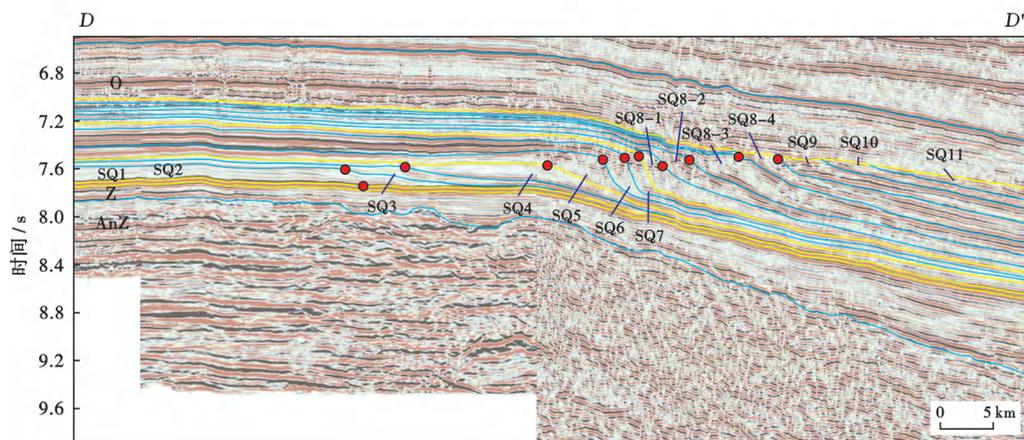


图5 二级层序界面附近的岩屑/岩心薄片显微照片

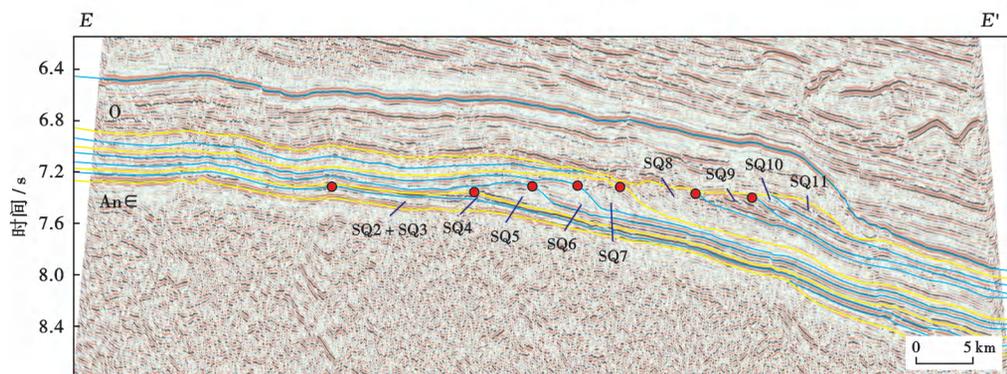
Fig. 5 Microscopic images of debris/core near the second-order sequence interface



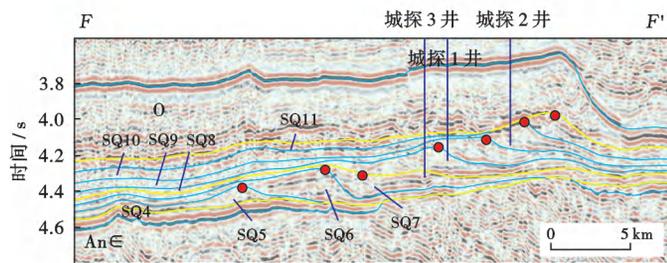
(a) 轮南台缘带



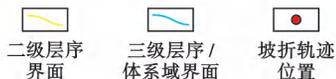
(b) 富满台缘带



(c) 古城北坡台缘带



(d) 古城台缘带



注:O—奥陶系;Z—震旦系;AnZ—前震旦系;AnE—前寒武系;SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ5、SQ6、SQ7、SQ8-1、SQ8-2、SQ8-3、SQ8-4、SQ9、SQ10、SQ11—层序编号。

图 6 轮南—富满—古城地区地震层序结构剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Seismic sequence profile in Lunan-Fuman-Gucheng area

主要发育含白云质灰岩、砂屑白云岩[图 5(b)]或细晶—粉晶白云岩等,界面之上发育含泥质白云质灰岩、纹层状泥晶—粉晶白云岩[图 5(c)]等;对应界面处 GR 测井曲线显示由微齿状—齿状(中—高 GR 值)转变为平直箱状—微齿状(低 GR 值), $\delta^{13}\text{C}$ 曲线上的碳同位素偏移特征由 ZHUCE(ZHUjiaqing Carbon isotope Excursion)正异常转变为 CARE(Cambrian Arthropod Radiation isotope Excursion)正异常[图 1(b)、图 2]。该转折界面在区域上易于识别,且对比性强,在地震层序结构剖面上表现为一个高度连续、强波峰反射,界面之上前积下超的地震反射特征较为常见,在轮南—古城地区易于识别与对比(图 6)。

(3) SSQ3 底界面(苗岭统沙依里克组底界面)

该底界面为典型的岩性转换界面,在局部井区表现为早期暴露界面,界面上、下的岩性差异明显。在轮南—古城地区寒武系台缘带,界面之上主要发育残余砂屑白云岩、藻白云岩[图 5(d)]等高能岩相,界面之下主要发育泥晶—粉晶白云岩、泥质白云岩[图 5(e)]等低能岩相。至塔中—巴楚—柯坪北缘地区,界面之上转换为蒸发潟湖膏盐岩组合,界面之下发育泥质白云岩和薄层状残余砂屑白云岩。界面处的 GR 测井曲线表现为由界面之下的相对平滑箱状(低 GR 值)向上快速转变为齿状(中—高 GR 值)。在 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线上,界面之上的碳同位素偏移特征对应塔里木地块全区乃至全球发育的对比性强的 ROECE(Redlichiiid Oleneliid Extinction Carbon isotope Excursion)负异常事件, $\delta^{13}\text{C}$ 值由约 0.13‰ 快速降至 -9.03‰[图 1(b)]。地震层序结构剖面上,SSQ3 底界面表现为一套强波阻,与下伏弱反射前积连续相接触,强波阻表明 SSQ3 发育蒸发潟湖膏盐岩沉积(图 6);在富满地区,界面之上可见清晰的超覆现象,在轮南地区,SSQ3 底部可见海侵的上超反射特征。在相干地震属性切片上,界面之下可见岩溶落水洞与岩溶冲沟等暴露标志,主要分布在轮南—富满地区东侧区域。

(4) SSQ4 底界面(芙蓉统下丘里塔格组中一下段底界面)

在塔西台地区,该底界面上、下的岩性变化相对较快,整体表现为一个岩性转换界面;在轮南—富满—古城地区,该底界面之上发育厚层状结晶白云岩[图 5(f)],界面之下发育蒸发台地膏质潟湖和泥云坪/礁后潮坪[图 5(g)、图 5(h)]等沉积;至轮南—富满地区台缘带,该底界面主体表现出暴露界面的特征。基于台缘丘滩体的叠置样式由垂向加积转为侧向加积,且界面之上的第 1 套丘滩体直接“跃迁”至前期中一下斜坡区的特征推测,海平面下降至坡折带之下为 I 型层序界面。GR 测井

曲线在界面上、下表现为低值齿化—高值齿化—低值齿化的转变。在 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线上,陈永权等^[15]根据对塔里木盆地的系统研究,识别出碳同位素偏移的 SPICE(Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)正异常,该异常可作为 SSQ4 底界面的标志,且其区域对比性强[图 1(b)]。地震剖面上,SSQ4 底界面为弱反射中等连续与强连续转换处,界面之上可见典型的低位体系域双向超覆反射特征,易于识别(图 6)。

(5) SSQ4 顶界面(芙蓉统下丘里塔格组顶界面)

该界面为寒武系与奥陶系之间的区域不整合界面,在伸展背景下由相对海平面下降所形成[图 1(b)]。在地震剖面上表现为一个高度连续、强反射同相轴;在轮南地区,界面之下表现为中—低角度削截反射,界面之上表现为下奥陶统进积反射特征(图 6)。

2.1.2 三级层序界面特征

(1) SQ1 层序(纽芬兰统玉尔吐斯组)界面

SQ1 层序的顶、底界与 SSQ1 层序的顶、底界重叠。

(2) SQ2—SQ4 层序(第二统肖尔布拉克组—吾松格尔组)界面

第二统肖尔布拉克组可划分为 SQ2 和 SQ3 两个层序。SQ2 的底界与 SSQ2 的底界相重叠。SQ2 与 SQ3 的分界面是一个岩性转换面,在隆起区可见为同生—准同生期的暴露面。以塔中—古城地区中寒 2 井为代表,高密度岩屑校正结果表明:SQ2 发育一套粉晶砂屑白云岩;SQ3 的下部岩性突变为泥质白云岩—泥质岩组合,上部发育一套膏盐岩或紫红色潮坪泥质白云岩—砂屑白云岩组合,其剖面特征与柯坪露头区的相似性较高。在 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线上,SQ2 的碳同位素偏移特征大致对应 CARE 正异常至 MICE(MIngxinsi Carbon Isotope Excursion)正异常底部;SQ3 的碳同位素偏移特征则对应 AECE(Archaeocyathid Extinction Carbon isotope Excursion)负异常,其横向可对比性强。吾松格尔组可划分为 1 个独立的层序(SQ4)。SQ3 与 SQ4 之间界面的主要特征包括:①界面上、下岩性不同,由紫红色泥质白云岩转变为灰黄色泥质岩、泥灰岩等;②GR 测井曲线由低值齿化向高值齿化突变,且差异明显;③AECE 负异常;④台缘相区的地震同相轴表现为收敛下超反射特征,在局部地区可见海侵超覆现象。SQ4 的顶界与 SSQ2 的顶界相重叠。

(3) SQ5—SQ7 层序(苗岭统沙依里克组一下丘里塔格组下段)界面

SSQ3 整体发育一套蒸发潟湖占主导的垂向加积型镶边台地,在塔西台地区发育巨厚膏盐岩和膏岩组合,可识别出 SQ5(沙依里克组中一下段)、SQ6(沙依里克组顶板灰岩段—阿瓦塔格组)和 SQ7(下丘里塔

格组下段)共3套层序。3套层序界面的识别标志包括:①岩性转换和标志性岩性方面,SQ5的底界与SSQ3的底界重叠,界面之上由泥质白云岩突变为膏盐岩组合;SQ6底部为沙依里克组顶界灰岩,厚度为40~60 m,稳定分布于塔西台地—台缘;SQ6与SQ7之间的界面在区域上岩性变化大,为膏盐岩和泥质白云岩、膏盐岩和泥膏岩等组合。② $\delta^{13}\text{C}$ 曲线特征上,可见3个区域性碳同位素偏移异常,即SQ5底界的ROECE负异常、SQ6顶界的DICE(Dissolved Inorganic Carbon Excursion)负异常和SQ7顶界的SPICE正异常。③地震反射特征上,富满地区的SQ5底界上可见从台地向台缘的超覆现象,在斜坡区呈上超反射;SQ6底界呈现出区域性高度连续的强反射特征,其在区域上的可追踪性强;SQ7从台地向台缘可见双向超覆现象;从台缘到斜坡—盆地,3套层序中均可见收敛下超的地震反射波组。

(4) SQ8—SQ11层序(芙蓉统下丘里塔格组中—上段)界面

SQ8、SQ9、SQ10和SQ11自下而上分布。层序界面识别标志主要包括:①在岩性转换面上,下丘里塔格组内部发育4套向上水深变浅的旋回,旋回的底部主要发育粉晶白云岩,顶部多发育细晶—中晶白云岩、残余颗粒白云岩等,反映到GR测井曲线上,界面处表现为曲线由箱状(低GR值)向齿状(中—低GR值)过渡的特征;②在 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线上,SPICE正异常的“M”形态对应SQ8的顶、底界;③在台缘带—斜坡区地震反射特征上表现出双向超覆、上超、削截等结构特征。

2.2 井-震层序划分与对比

轮南—古城地区寒武系台缘带的层序结构在横向上具有分段差异的特点。轮南地区的层序结构相对完整,具有典型侧向叠置的特征[图6(a)];古城地区部分缺失纽芬兰统一第二统(SQ1—SQ3),且垂向上的加积“堆垛”特征突出[图6(c)、图6(d)];富满地区则呈现出过渡特征[图6(b)]。

2.2.1 轮南台缘段

轮南台缘段主要是指轮南断裂以南,轮南低凸起主体区的寒武系台缘带,为轮南—古城地区台缘带北端分布区。该台缘段发育9期丘滩复合体(SQ3—SQ11),其最大宽度为85 km,厚度约为3 km。SSQ1沉积期,台缘整体发育区域海泛陆棚/中缓坡—外缓坡沉积,地震结构难以区分,仅表现为一个高度连续、强反射的同相轴。SSQ2沉积期,台缘发育SQ3和SQ4两套丘滩体,呈低角度前积叠置方式,SQ4丘滩体的规模明显更大,标志着碳酸盐缓坡演变为弱镶边台地。SSQ3沉积期,台缘丘滩体的叠加样式发生明显改变,

表现为垂向加积特征,坡折趋势线由平缓转为陡峭向上,在12 Ma的沉积周期内仅向盆地推进了约5 km;台缘丘滩体内侧的蒸发潟湖沉积呈依次超覆,依据稳定碳同位素偏移的DICE负异常和SPICE正异常等,在下丘里塔格组中—下段识别出一套膏盐岩,其在地震反射剖面上表现出典型的强反射特征,并向塔西台地内部迅速相变,表明该套膏盐岩仅局限分布于轮南—富满段,为蒸发潟湖有序充填的末期沉积。SSQ4沉积期,台缘发育SQ8—SQ11共4套丘滩体,坡折趋势进一步转换为以侧向加积为主,塔西台地的范围迅速扩张,并呈现出3个特点:①SQ8低位体系域沉积跃迁至SSQ3斜坡区,指示古海水平面大幅下降,奠定了丘滩体叠置和台地类型转变的基础;②与中寒武统SSQ3沉积期斜坡—盆地地区的饥饿状态不同,斜坡区发育了规模重力流堆积体;③SSQ4顶部为寒武系、奥陶系之间的区域不整合面,SQ10—SQ11丘滩体顶部被削截,仅表现出残余收敛的地震反射结构,并为下奥陶统蓬莱坝组所覆盖[图6(a)]。

2.2.2 富满台缘段

富满台缘段主要是指富满地区—满参1井区的寒武系台缘带,为中段主体区域^[19]。以往研究认为,该区域存在水体交换通道。然而,笔者的研究表明,该台缘段发育9期丘滩复合体(SQ3—SQ11),最大宽度为65 m,厚度约为3 000 m。与轮南台缘段类似,纽芬兰统SSQ1沉积期,层序内的地震反射发育代表区域海泛沉积的高度连续、强反射的稳定同相轴[图6(b)]。SSQ2沉积期,SQ3和SQ4两套台缘丘滩复合体呈低角度前积,具“填平补齐”的典型特征;受区域构造沉降等因素影响,SQ4的规模较大[图6(b)],其在地震剖面上的预测厚度达400 m以上,在平面上的预测范围超过600 km²,是已部署上钻的万米深井——塔科1井探索的主要目标地质体。SSQ3沉积期,阿瓦塔格组顶部新识别的膏盐岩在地震反射剖面上仍然可见,为有效的区域盖层。SSQ4沉积期,尽管SQ8—SQ11这4套层序均发育台缘丘滩体,且叠置样式仍以侧向加积为主要特点,但其向盆地推进的距离相对减小;在SSQ4顶部,寒武系与奥陶系之间的区域不整合面仍相对明显,SQ10—SQ11内的丘滩体顶部被削截,并被早奥陶世海侵阶段沉积覆盖。

2.2.3 古城台缘段

该台缘段对应于肖塘—古城低凸起地区的寒武系台缘带,为轮南—古城地区寒武系台缘带的南端发育区,呈现出与在轮南段和富满段明显不同的特点^[25]。寒武系的9期台缘丘滩复合体发育不完整,缺失第二统SSQ2复合层序(SQ3和SQ4)的台缘丘滩,最大宽

度缩减至 21 km,厚度也减薄至约 1 500 m。受塔南古陆和古海平面升降影响,SQ1 整体缺失,SQ2—SQ4 表现为均斜型—远端变陡型缓坡结构,未见 SQ4 弱镶边台缘带丘状地震相。SSQ3 沉积期,台缘丘滩复合体开始发育,其叠置样式初期以垂向加积为主,中—晚期开始向侧向加积转换。阿瓦塔格组顶部新识别的膏盐岩在古城地区几乎不发育,仅发育以往认识到的 2 套膏盐岩。SSQ4 沉积期,沉积物分异的特点与轮南台缘段和富满台缘段类似,SQ8—SQ11 均发育丘滩体,但规模明显减小,保存相对完整,顶部削蚀不整合特征不明显,上覆奥陶系缓坡沉积地层[图 6(c)、图 6(d)]。

2.3 层序平面展布特征

在开展层序界面精细追踪解释和时深转换等工作后,笔者编制了层序结构相对完整的轮南台缘段—富满台缘段 SQ1—SQ11 层序厚度平面分布图(图 7)。SQ1 层序的厚度分异受控于寒武系沉积前的古地形,地层呈南厚北薄展布,整体变化不大,仅在于奇 6 井区发育局部减薄区[图 7(a)]。SQ2 层序的厚度格局较 SQ1 有了较大变动,沿轮探 3 井—轮探 1 井一线近 SN 走向发育 1 条“陡坎”带,“陡坎”带以西地区厚

度变化相对均匀,以东地区厚度迅速减薄;“陡坎”带呈现出明显的弯曲内凹特点,在轮南—富满三维工区内可识别出 2 个内凹区,分别位于中部和南部边缘区[图 7(b)]。SQ3 和 SQ4 层序的厚度分异呈现出典型的“填平补齐”的特点[图 7(c)、图 7(d)],厚值区主要分布在 SQ2 的内凹区和“陡坎”带的斜坡区。SQ4 厚值区的分布更加平直,在轮探 1 井东侧出现一个“缺口”,为海西期走滑断裂导致的地层错断和减薄。SQ5—SQ7 层序的厚度分布格局与 SQ4 层序相比变化明显,表现出厚值区形态稳定、侧向迁移距离小(在 12 Ma 内的推进距离 < 5 km)、东部盆地区厚度薄、西部台地区的厚度由台地中心向边缘逐渐减薄等特点[图 7(e)—图 7(g)]。SQ8—SQ11 层序的厚度表现出从边缘厚值区快速向东部盆地区迁移且在斜坡区堆积大量沉积物,厚度明显增大,甚至在盆地区的厚度比边缘区更大,如 SQ8-3[图 7(h)]、SQ9、SQ10 等层序;西部台地区 SQ8—SQ11 层序的厚度变化不大,厚度分异相对均匀,这一特点也说明自 SQ7 沉积期后,塔西台地的构造沉积分异和古地形分异均相对较弱,地形相对平缓。

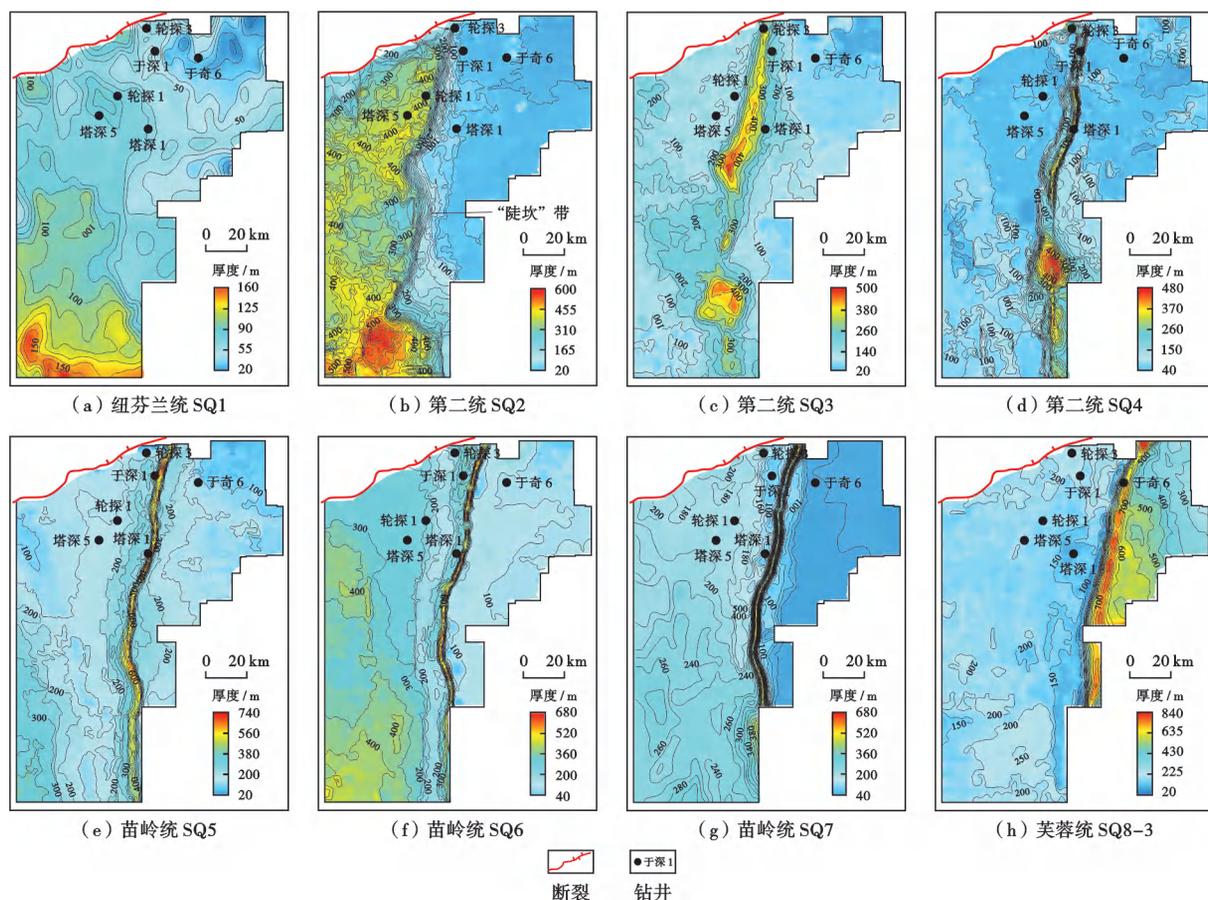


图 7 轮南—富满地区三维地震工区层序(体系域)厚度分布

Fig. 7 Thickness distribution of sequences or system tracts based three dimensional seismic data in Lunan-Fuman area

3 沉积演化

轮南—古城地区寒武系台缘带 SSQ1—SSQ4 沉积期先后经历了富泥质缓坡、低角度前缓坡-弱镶边台地、垂向加积蒸发潟湖占主导的镶边台地和侧向加积的平顶镶边台地 4 个演化阶段,表现为构造相对稳定的被动陆缘型碳酸盐台地从形成至扩张期的沉积序列。笔者以轮南—富满三维工区为例进行重点阐述。

3.1 SSQ1 层序的沉积演化过程与沉积展布

SSQ1(纽芬兰统玉尔吐斯组)沉积期发生了全球性的海泛事件^[26],整个塔里木盆地发生规模海侵,仅中央隆起区出露。该时期大量陆源碎屑物质注入盆地内部,并在古陆周缘发育滨岸或潮坪相沉积,如塔中隆起在中寒 1 井钻遇了一套细粉砂岩与泥质岩互层,而在远离古陆的盆地内部则发育富泥质缓坡沉积或处于陆棚环境,其下部的泥质岩段(幸运阶)对应海侵体系域,上部的碳酸盐岩段(第二阶)对应高位体系域。在轮南—富满三维工区,SSQ1 发育潟湖、中缓坡—外缓坡、陆棚沉积组合,其中,中缓坡—外缓坡亚相占据主体,向西南部的满西凹陷方向演变为潟湖环境,向满西低梁以东的于奇 6 井区相变为陆棚相。玉尔吐斯组为寒武系台缘带落实程度最高的一套富有机质沉积地层,其沉积厚度与寒武系沉积前的古地形分异密切相关。地震勘探的预测结果表明:沉积厚值区位于潟湖发育区,厚度为 40~60 m,并向满西凹陷方向呈增大趋势;中缓坡—外缓坡亚相、陆棚相下段泥质岩段的厚度为 10~20 m,局部低洼处泥质岩段的厚度可达 30 m,如塔深 5 井、塔深 1 井等地区[图 8(a)]。

3.2 SSQ2 层序的沉积演化过程与沉积展布

SSQ2(第二统肖尔布拉克组—吾松格尔组)沉积期,相对海平面整体呈现出短暂海侵—缓慢海退的特点,发育多期低角度前积叠置的沉积结构[图 8(b)—图 8(d)、图 9(a)]。坡折迁移轨迹趋势线呈现出“平直—陡峭—平直”的三分特征,以“平直段”为主要特征[图 9(d)]。

SQ2(肖尔布拉克组下段)沉积期,塔西台地受控于南北两侧古隆起、塔中—古城凸起、满西低梁等古构造单元,以及中央隆起裸露区,发育混积潮坪亚相沉积,至北部拗陷则发育碳酸盐岩均斜型缓坡。内缓坡的高能丘滩带主要分布在隆起的围斜区域,这在塔中北斜坡—巴楚主体区的多口钻井中已得到充分证实。塔北隆起的主体区域与轮南—富满三维工区发育中缓坡—外缓坡亚相[图 8(b)],沉积岩相以泥灰岩、含白云质灰岩等低能岩相组合为主。

SQ3(肖尔布拉克组上段)沉积期,随着海平面缓

慢下降,台地类型由均斜型缓坡演化为远端变陡型缓坡。SQ2 沉积地层厚度等值线[图 7(b)]明显增密指示 SQ3 沉积前地形坡度呈增大趋势。在 NE 向的地震剖面上可见多期前积增生沉积体,对比沉积前的地形,具有类“填平补齐”的特征,增生的沉积单元主要发育在地形相对低洼区。该时期古海平面的变化以相对稳定—缓慢下降为主,其中,前积层顶部的浅水区为有利丘滩体发育区。轮南—富满三维工区 SQ3 层序自西向东依次发育台内洼地、中缓坡、外缓坡和下斜坡—盆地。中缓坡可识别出缓坡脊台内滩带,共识别出 23 个面积不等的颗粒滩,累计面积为 2 378 km²,最大丘滩体的面积为 609 km²,分布在南部富满地区沉积前的低洼地形区[图 8(c)]。

SQ4(吾松格尔组)沉积期,轮南地区—塔中 32 井区发育寒武系第 1 套台地边缘^[27],其岩性以砂屑白云岩等颗粒岩类组合为主。礁滩带以西的沉积环境为半局限台地,轮探 1 井的岩屑校正结果显示该区域为能量相对较低的潮坪相泥质白云岩发育区(图 2)。与 SQ3 类似,SQ4 的台地边缘也呈现出前积填平的特点[图 8(d)]。轮南—富满三维工区内可识别出 21 个礁滩体,累计面积为 1 551 km²,其中最大面积为 539 km²,已成为中国石油在塔里木盆地实施塔科 1 井钻探计划的主力目标区。SQ4 沉积期后,轮南—富满三维工区台缘区的古地形差异已明显减弱,坡折区更加平直,塔西台地区与东部盆地区的分异特征更加凸显。

3.3 SSQ3 层序的沉积演化过程与沉积展布

SSQ3(苗岭统沙依里克组、阿瓦塔格组、下丘里塔格组中—下段)沉积期,相对海平面呈快速上升—缓慢下降,叠合干旱炎热的古气候,台地边缘沉积呈现出在结构上以垂向加积的叠置样式为主、蒸发潟湖占主导和东部盆地呈饥饿状态的新特点[图 8(e)—图 8(g)、图 9(b)]。坡折迁移轨迹呈“陡峭段”特征[图 9(d)]。

SQ5(沙依里克组中—下段)沉积期,塔西台地的统一性明显增强,南、北侧的古隆区已演化为水下低隆区;满西低梁区与东部盆地区的古地形分异特征清晰,为多期加积型台缘的发育奠定了基础;塔西台地沉积了多期巨厚的蒸发潟湖膏盐岩。值得注意的是,SQ4 沉积期后研究区内仍相对平缓的古地形,在 SQ5 海侵初期形成了规模礁后台内滩带[图 8(e)]。随着台缘建造逐渐增大,“空桶”台地结构逐渐形成,礁后台内滩向台缘主体区逐渐出现退覆式迁移。在轮南—富满三维工区,SQ5 沉积期呈现出典型的环带状沉积分异特征,即膏盐质潟湖→膏云坪→泥云坪→礁后台内滩→台缘礁丘→斜坡→盆地,礁后台内滩的面积为 1 483 km²,地震反演预测其厚度为 100~150 m。

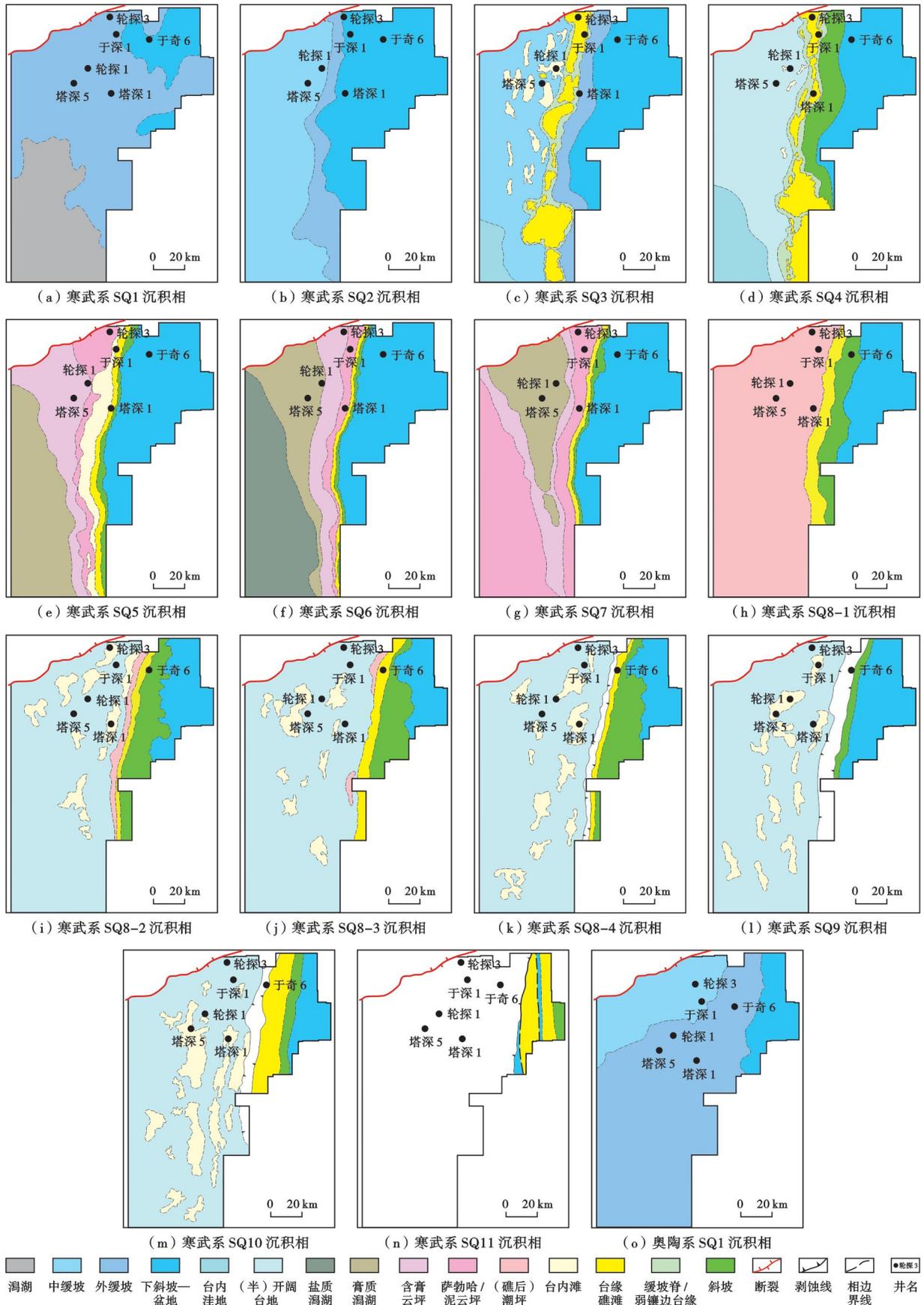


图8 轮南—富满地区三维地震工区寒武纪—早奥陶世沉积特征

Fig. 8 Sedimentary facies from Cambrian to Early Ordovician based three dimensional seismic data in Lunan-Fuman area

SQ6 沉积初期[图 8(f)],塔西台地再次出现区域海泛,发育一套厚度为 40~60 m 的灰岩,至轮南—古城台缘区和南、北两侧古隆区相变为粉晶白云岩。此次区域海泛事件使得 SQ6 层序的膏盐岩分布范围明显增加,局部地区向东推进了约 10 km,且在中西部地区出现了盐质潟湖。斜坡相区有机质也出现一定程度的富集。

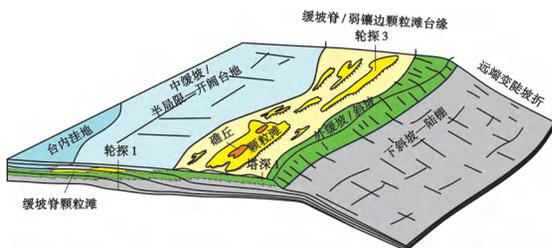
SQ7 沉积期[图 8(g)],塔西台地低洼区主体被蒸发潟湖膏盐岩沉积所充填,仅在轮南—富满三维工区仍为地形洼地,并通过间歇性的海水补给持续发育膏盐岩沉积,在膏盐潟湖周缘依次发育膏云坪、泥云坪等沉积微相。苗岭统发育 3 套膏盐岩(SQ5—SQ7),SQ7 膏盐岩的识别为区域盖层的评价和预测提供了新的证据,也证实了塔西台地具有多期海水间歇性补给、多套膏盐依次发育且有序分布的成盐模式。

3.4 SSQ4 层序的沉积演化过程与沉积展布

SSQ4(芙蓉统下丘里塔格组中—上段)沉积期,相对海平面呈现出整体缓慢下降的特征,古气候由干旱炎热转变为温暖潮湿,台缘丘滩体的叠置样式发生明显改变,由垂向加积转为侧向加积占主导并向东部盆地快速推进。丘滩体的分布范围广,代表该时期为塔西台地的最大扩张期。坡折迁移轨迹再次呈现出“平

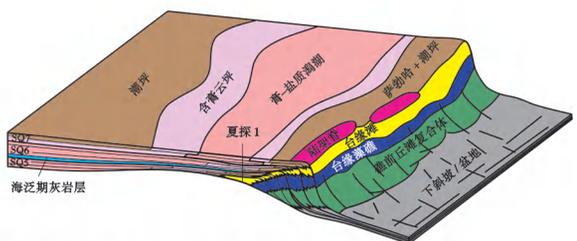
直段”特征[图 9(d)]。与 SSQ3 沉积期相比,SSQ4 沉积期呈现出以下新的特点:①台缘带的障壁作用明显减弱,台缘丘滩体在沉积期水体更深,靠近上斜坡的中部,盆、台间的水体沟通更加顺畅,台内发育规模颗粒滩;②沉积物向台内搬运的同时,斜坡区沉积了巨厚的浅水重力流堆积体,米兰 1 井、罗西 1 井等多口探井的岩屑具典型的浅水区沉积特征,以白云岩类与斜坡-盆地相静水环境泥灰岩呈互层为特点;③在 SQ8-2、SQ9、SQ10 和 SQ11 共 4 套层序中发育斜坡相富含有机质沉积,为烃源岩赋存的有利区。含 SQ6 层序在内的 5 套斜坡相烃源岩预测叠合面积约为 10 000 km²,叠合厚度约为 100 m。

在轮南—富满三维工区,SQ8 沉积期后,由于沉积物分配方式的转变,古地形变化较为明显,主要体现为台前坡度明显减小。综合利用层序厚度、地震属性和钻井标定等,笔者绘制了 SQ8—SQ11 沉积期的相模式[图 8(h)—图 8(n)、图 9(c)]。SQ8-1 为典型的低位体系域沉积,该沉积期海平面的相对下降使得沉积物主要分布在坡折带之下,台地区主要发育低能潮坪;SQ8-2—SQ11 整体表现为开阔台地(滩间海和台内滩)—陆架脊—台地边缘—斜坡—盆地组合,随着纵向演化,台内滩的分布面积和规模均明显增加。



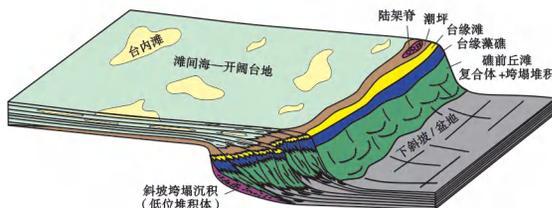
均斜型缓坡(SQ2 早期)—远端变陡缓坡(SQ2 晚期+SQ3)—弱镶边台地(SQ4)前积层顶部(缓坡脊)和弱镶边台缘为中—高能丘滩发育相区沉积物向台内和斜坡区双向搬运,切面呈透镜状

(a) SQ2—SQ4 低角度前积型缓坡—弱镶边台地



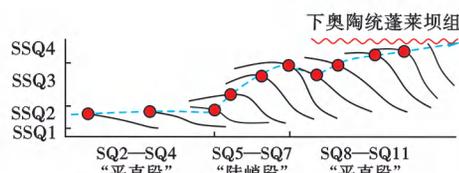
台地边缘丘滩垂向加积为主,指示构造稳定背景下海平面快速上升苗岭统发育 3 套膏—盐质潟湖沉积礁前斜坡—盆地缺乏规模性重力垮塌相关沉积,甚至为饥饿状态

(b) SQ5—SQ7 蒸发潟湖占主导—垂向加积型镶边台地



台地边缘丘滩侧向加积为主,指示海平面处于相对高位—下降初期台地边缘障壁作用减弱,台内规模发育台内滩礁前斜坡—盆地发育规模性重力垮塌相关沉积

(c) SQ8—SQ11 平顶—侧向加积型镶边台地



(d) 寒武系台缘带坡折迁移轨迹

注:SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ5、SQ6、SQ7、SQ8、SQ9、SQ10、SQ11—三级层序编号;SSQ1、SSQ2、SSQ3、SSQ4—二级层序编号。

图 9 轮南—富满地区三维地震工区寒武系台缘结构类型与沉积模式

Fig. 9 Architectural types and sedimentary models of Cambrian platform margin based three dimensional seismic data in Lunan-Fuman area

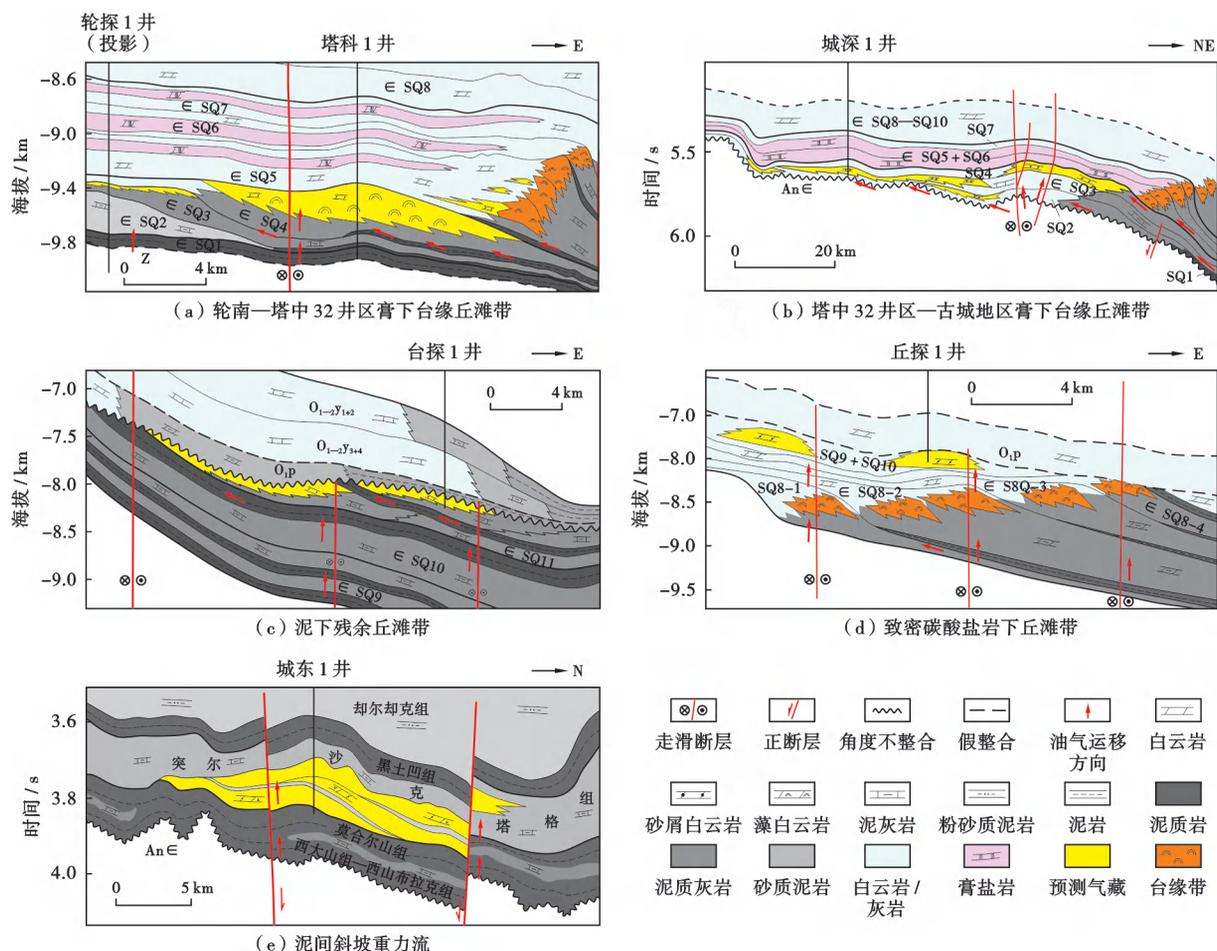
4 油气勘探潜力评价

以轮南—富满三维工区为重点,借鉴加里东期—海西期形成的走滑断裂研究成果,对刻画出的陆棚相(SQ1)和斜坡相(SQ6、SQ8-2、SQ9—SQ11)两类共6套烃源岩、9套台缘复合体储层(SQ3—SQ11)和苗岭统3套膏盐岩盖层(SQ5—SQ7)进行时空配置关系分析,评价出膏下台缘丘滩带、泥下残余丘滩带、致密碳酸盐岩下丘滩带和泥间斜坡重力流沉积4套有利储-盖组合(图10、表1)。构建了5类油气成藏模式,分别为:“垂向+侧向双源供烃”成藏模式[图10(a)]、“沿不整合侧向运聚、断裂垂向调整”成藏模式[图10(b)]、“海侵泥质岩覆盖、双源供烃”成藏模式[图10(c)]、“原地烃源岩供烃、断裂垂向疏导”成藏模式[图10(d)]和源间“泥包砂”成藏模式[图10(e)]。

4.1 膏下台缘丘滩带

在苗岭统膏盐岩直接覆盖之下的台缘丘滩带内,储层具体包括肖尔布拉克组沉积晚期的缓坡脊(SQ3)、吾松

格尔组(SQ4)弱镶边台缘带和沙依里克组(SQ5)礁后台内滩3套^[27-28]。膏下台缘带主要分布在轮南地区—塔中32井区,表现为“垂向+侧向双源供烃”成藏模式[图10(a)],叠合面积大,在轮南—富满三维工区的预测面积达5396 km²。在塔中32井区—古城地区,由于缺失纽芬兰统一第二统(SQ1—SQ3),尽管膏下台缘丘滩带组合依然存在,但演变为膏下隆起周缘丘滩带,有利储层为塔南古陆周缘肖尔布拉克组的内缓坡丘滩带,形成“沿不整合侧向运聚、断裂垂向调整”油气成藏模式[图10(b)]。玉尔吐斯组烃源岩是膏下台缘带组合的主力烃源岩,其在北部坳陷普遍发育且品质较优,至古城地区局部缺失。走滑断裂沟通了玉尔吐斯组与膏下多套主力储层,为油气运聚提供了运移通道。尽管断裂贯穿至奥陶系中—浅层,油气在此聚集成藏,但寒武系膏盐之下依然可以形成规模成藏,这一认识在轮探1井的勘探突破中已得到充分证实。轮南—古城地区在区域上位于塔中继承性古隆起和塔北残余古隆起,有利于规模油气聚集。因此,准确刻画丘



注:Z—震旦系;AnЄ—前寒武系;Є—寒武系;O_{1p}—蓬莱坝组;O₁₋₂y₃₊₄—鹰山组三段+四段;O₁₋₂y₁₊₂—鹰山组一段+二段;SQ1、SQ2、SQ3、SQ4、SQ5、SQ6、SQ7、SQ8-1、SQ8-2、SQ8-3、SQ8-4、SQ9、SQ10、SQ11—层序编号。

图10 轮南—古城地区寒武系台缘带储-盖组合类型与成藏模式

Fig. 10 Reservoir-cap assemblages and reservoir accumulations of Cambrian platform margin in Lunnan-Gucheng area

表1 轮南—古城地区寒武系台缘带油气成藏组合、特征、有利区带与目标

Table 1 Hydrocarbon accumulation assemblages, characteristics, favorable zones and targets of Cambrian platform margin in Lunnan-Gucheng area

组合	烃源岩	储集层	盖层	成藏特点	有利区带和目标
膏下台缘丘滩带	玉尔吐斯组	肖尔布拉克组沉积晚期缓坡脊(SQ3)、吾松格尔组弱镶边台缘带(SQ4)和沙依里克组礁后台内滩(SQ5)	苗岭统膏盐岩	原地垂向供烃、走滑断裂输导、膏盐封盖,膏上、膏下立体复式成藏	轮南—富满地区膏下台缘带,古城地区膏下丘滩带;夏探1井、塔探1井(万米深井)已上钻,轮探1井已获重大突破,准备城深1井目标
泥下台缘残余丘滩带	玉尔吐斯组+斜坡相(SQ6、SQ8—SQ11)	下丘里塔格组台缘带(SQ10—SQ11)	下奥陶统海侵泥质灰岩/灰质泥岩	双源供烃、走滑断裂输导、斜坡相泥灰岩封盖,泥上、泥下复式成藏	轮南—富满地区泥下台缘带;准备台探1井目标
致密碳酸盐岩台缘丘滩带	玉尔吐斯组+斜坡相(SQ6、SQ8—SQ11)	阿瓦塔格组—下丘里塔格组台缘带(SQ6—SQ9)	蓬莱坝组、下丘里塔格组致密碳酸盐岩	双源供烃、走滑断裂+侧向输导、致密碳酸盐岩封盖,油气分布相对复杂	轮南—富满地区致密碳酸盐岩台缘丘滩带;准备丘探1井目标
泥间礁前重力流沉积	斜坡相(SQ6、SQ8—SQ9)	斜坡重力流沉积体(SQ8—SQ9)	斜坡—盆地相泥质岩	重力流成因储层与斜坡相泥灰岩互层,源间成藏	轮南—富满地区、古城—肖塘北地区泥间斜坡重力流带;准备城东1井、轮东1井目标

滩带的分布是该套储-盖组合在近期内实现勘探突破的关键。目前,油田公司已部署上钻塔科1井(万米深井)和夏探1井两口探井,正积极准备城深1井目标。

4.2 泥下残余丘滩带

在下奥陶统海侵期中缓坡—外缓坡亚相泥质岩覆盖之下的寒武系芙蓉统,可识别出SQ10和SQ11两套残余丘滩带[图10(c)]。受台缘层序的结构完整性控制,泥下残余丘滩带组合主要分布在轮南—富满地区,预测面积为5593 km²。与膏下台缘带相比,泥下残余丘滩带除组芬兰统玉尔吐斯组的优质烃源灶可通过走滑断裂沟通实现垂向供烃外,加上斜坡相的多套烃源岩直接与2套残余丘滩带接触,形成“海侵泥质岩覆盖、双源供烃”的成藏模式。此外,蓬莱坝组岩性自西向东由白云岩变为灰岩、泥质灰岩和泥岩,地震反演预测其厚度可达90~180 m,也构成了泥下残余丘滩带的直接盖层条件。中国石化在于奇6井以西距泥下残余丘滩带组合约5 km处钻揭了SQ8残余丘滩带,储层厚度为87.5 m,并获得良好的油气显示。盖层缺失和断裂改造是油气富集失利的直接原因,而泥下残余丘滩带的盖-储组合可有效规避不利因素。目前,油田公司已将台探1井作为储备的风险目标。

4.3 致密碳酸盐岩下丘滩带

在下奥陶统蓬莱坝组—芙蓉统致密碳酸盐岩覆盖之下的台缘带[图10(d)]和台内滩,储层为苗岭统阿瓦塔格组—芙蓉统下丘里塔格组(SQ6—SQ9)的多套台缘丘滩带,是轮南—古城地区寒武系台缘带建造的主体,其在轮南—富满三维工区内的叠合面积达4154 km²。致密碳酸盐岩下丘滩带组合发育规模储集层,形成“原地烃源岩供烃、断裂垂向疏导”的成藏模式,是塔深1井、于奇6井、城探1井、城探2井和城探3井等多口风险探井的探索目标。缺乏区域塑性盖层和走滑断裂

的破坏调整使得油气分布相对复杂,这是风险探井相继失利的主要原因,也是未来勘探突破的攻关难点。目前,油田公司正积极准备丘探1井风险目标。

4.4 泥间斜坡重力流

对于由斜坡相泥质岩夹持的芙蓉统礁滩斜坡重力流沉积(SQ8—SQ9)[图10(e)],以往的勘探研究认为,礁前斜坡浊积体位于构造低部位且相带能量低,储集条件差,勘探潜力有限,因此长期未得到重视。泥间斜坡重力流组合形成典型的源间“泥包砂”成藏模式。其中,斜坡相烃源岩可直接供烃,而判断是否发育有效储集层和落实岩性圈闭是勘探突破的关键^[29]。根据罗西地区台缘斜坡区已相继上钻的英东1井、英东2井、米兰1井和罗西1井等探井所揭示的芙蓉统储层厚度为41~96 m,可推测与之相对应的轮南—古城地区斜坡带的储层规模,这将为开展规模勘探和探索新型油气成藏组合的储集层奠定基础。目前,油田公司评价出轮南—富满地区、古城—肖塘北地区两个有利区带,储备城东1井和轮东1井2个有利目标。

5 结论

(1) 综合利用碳同位素地层学和坡折迁移轨迹重建等方法,在寒武系可识别出4个二级层序和11个三级层序,实现了轮南—古城地区寒武系台缘带的等时对比。轮南地区和古城地区寒武系台缘的层序结构存在明显差异。轮南地区的层序结构完整,以迁移叠置为主要特征;古城地区受塔南古陆和古海平面等多因素制约,仅发育SQ4—SQ11层序,缺失组芬兰统和部分第二统沉积,台缘层序垂向加积的“堆垛”特点突出,宽度仅为21 km。

(2) 轮南—富满地区坡折迁移轨迹趋势线呈现出“平直—陡峭—平直”的三分特征,指示了组芬兰统一

第二统陆棚—低角度前积缓坡—弱镶边台地(SQ1—SQ4)、苗岭统垂向加积蒸发潟湖占主导镶边台地(SQ5—SQ7)和芙蓉统侧向加积平顶镶边台地(SQ8—SQ11) 3个演化阶段。轮南—富满地区发育9套台缘丘滩带;新识别出5套斜坡相烃源岩,叠合面积约为10 000 km²,厚度约为100 m;苗岭统发育3套膏盐岩,为区域优质盖层。

(3) 评价出膏下台缘丘滩带、泥下残余丘滩带、致密碳酸盐岩下丘滩带和泥间斜坡重力流4套有效储-盖组合,并构建了5类油气成藏模式。膏下台缘丘滩带和泥下残余丘滩带是近期取得突破和万米深井实施的最佳目标组合,泥间斜坡重力流是一种值得探索的新类型储-盖组合。

参 考 文 献

- [1] 魏国齐,杨威,谢武仁,等. 克拉通内裂陷及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践——以四川盆地震旦系—寒武系为例[J]. 石油勘探与开发,2022,49(3):465-477.
WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift; taking the Sinian-Cambrian of Sichuan Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 465-477.
- [2] 邢凤存,胡华蕊,侯明才,等. 构造和古地理控制下的碳酸盐岩储集体旋回和集群性探讨:以四川盆地为例[J]. 地球科学,2018,43(10):3540-3552.
XING Fengcun, HU Huarui, HOU Mingcai, et al. Carbonate reservoirs cycles and assemblages under the tectonic and palaeogeography control; a case study from Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3540-3552.
- [3] 朱永进,倪新锋,刘玲利,等. 裂后沉降期碳酸盐岩缓坡沉积响应及成储特征——以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例[J]. 沉积学报,2019,37(5):1044-1057.
ZHU Yongjin, NI Xinfeng, LIU Lingli, et al. Depositional differentiation and reservoir potential and distribution of ramp systems during post-rift period; an example from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 1044-1057.
- [4] 杨海军,陈永权,田军,等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探,2020,25(2):62-72.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72.
- [5] 赵宗举,罗家洪,张运波,等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J]. 石油学报,2011,32(6):937-948.
ZHAO Zongju, LUO Jiahong, ZHANG Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 937-948.
- [6] 高志前,樊太亮,杨伟红,等. 塔里木盆地中生界碳酸盐岩台缘结构特征及其演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):657-665.
GAO Zhiqian, FAN Tailiang, YANG Weihong, et al. Structure characteristics and evolution of the Eopaleozoic carbonate platform in Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 657-665.
- [7] 刘存革,李国蓉,罗鹏,等. 塔里木盆地北部寒武系大型进积型台地—斜坡地震层序、演化与控制因素[J]. 地质学报,2016,90(4):669-687.
LIU Cunge, LI Guorong, LUO Peng, et al. Seismic sequences, evolution and control factors of large Cambrian progradational platform-slope system in the northern Tarim Basin, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 669-687.
- [8] 张君龙,胡明毅,冯子辉,等. 塔里木盆地古城地区寒武系台缘丘滩体类型及与古地貌的关系[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):94-105.
ZHANG Junlong, HU Mingyi, FENG Zihui, et al. Types of the Cambrian platform margin mound-shoal complexes and their relationship with paleogeomorphology in Gucheng area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 94-105.
- [9] 赵宗举. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报,2015,36(3):262-273.
ZHAO Zongju. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences; take Ordovician of Tarim Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 262-273.
- [10] 贾承造,魏国齐. “九五”期间塔里木盆地构造研究成果概述[J]. 石油勘探与开发,2003,30(1):11-14.
JIA Chengzao, WEI Guoqi. The summary of the achievements on the tectonic researches in Tarim Basin during the period of 9th Five-Year Plan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 11-14.
- [11] LI Yuejun, GAO Yongjin, ZHOU Hui, et al. Early Paleozoic collision-related structures in the Tarim craton, NW China; implications for the Proto-Tethys evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 241: 105458.
- [12] 何碧竹,焦存礼,黄太柱,等. 塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(4):635-655.
HE Bizhu, JIAO Cunli, HUANG Taizhu, et al. Structural architecture of Neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(4): 635-655.
- [13] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia; a synthesis[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 179-210.
- [14] 杨海军,陈永权,潘文庆,等. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探选区意义[J]. 中国石油勘探,2021,26(4):84-98.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, PAN Wenqing, et al. Study on tectonic and sedimentary evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its significance for subsalt exploration, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 84-98.
- [15] 田军,杨海军,朱永峰,等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报,2021,42(8):971-985.