

塔东南寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩台缘带的迁移与相对海平面变化的关系

贺 锋^{1,2,3}, 林畅松³, 刘景彦³, 张宇龙^{1,2}, 张君龙⁴, 闫 博⁴, 屈泰来⁵

[1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国石油 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 5. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:在岩心、薄片以及测井资料分析的基础上,结合地震相、地震属性以及古地貌来识别台地边缘带,追踪和揭示了塔里木盆地东南部寒武系-中下奥陶统不同期台地边缘相带分布与变迁。台地边缘带发育的岩石类型主要为砂屑灰岩、生屑灰岩、鲕粒灰岩与泥晶灰岩等。台缘滩在地震反射剖面上呈杂乱反射或空白反射特征,礁(丘)滩复合体外部呈丘状外形,内部为显杂乱反射或空白反射。较大的礁(丘)滩复合体快速生长形成地层厚度增大的建隆特征,以及向盆地沉积厚度急剧减薄形成的陡坡或远端变陡特征是判断台地边缘的证据。应用自然伽马能谱测井资料识别碳酸盐岩岩性和沉积能量的方法,结合有机碳、碳氧同位素等资料,编制塔里木盆地东南部地区的相对海平面变化曲线,探讨海平面变化对不同时期台地边缘相带迁移的控制作用。早寒武世塔东南地区以斜坡-盆地相为主,台缘不发育;中晚寒武世海平面不断下降,台地类型为局限台地,台地边缘相发育且向盆地方向迁移;早奥陶世全球海平面开始上升,蓬莱坝组沉积期台地边缘宽度变窄;鹰山组下段沉积期海平面下降,台地类型变为开阔台地,台地边缘相带变宽;鹰山组上段沉积期经历了快速的水进,海平面又开始下降,台地边缘相带向盆地内侧进一步加宽;一间房组沉积之后随海平面快速上升,台地被淹没。

关键词:礁(丘)滩复合体;台地边缘相带;海平面;沉积演化;碳酸盐岩;寒武系;奥陶系;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Migration of the Cambrian and Middle-Lower Ordovician carbonate platform margin and its relation to relative sea level changes in southeastern Tarim Basin

He Feng^{1,2,3}, Lin Changsong³, Liu Jingyan³, Zhang Zilong^{1,2}, Zhang Junlong⁴, Yan Bo⁴, Qu Tailai⁵

[1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 5. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: A comprehensive analysis on cores, thin sections and logging data is combined with seismic facies, seismic attributes and palaeo geomorphology to identify platform margin and trace the distribution and migration of platform-margin facies belt in southeastern Tarim Basin during different deposition periods of the Cambrian and the Middle and Lower Ordovician. The rock types of platform-margin facies belt are mainly calcarenite, bioclastic limestone, oolitic limestone and micritic limestone. On seismic reflection profiles, platform margin beach facies present as chaotic or blank reflections, and the reef-beach complexes show mound reflection exteriorly and chaotic reflection or blank reflection interiorly. Both the buildup features with increasing stratum thickness caused by rapid growth of large reef-beach complexes, and the steep slope or distal steepening features caused by decreasing stratigraphic thickness in the basin, are indicators of platform margins. The method that uses natural gamma ray spectrometry logging data to identify carbonate lithology and sedimentary energy is combined with the data of organic carbon, carbon and oxygen isotopes, to map the relative sea level changes

收稿日期:2016-03-07;修订日期:2017-06-21。

第一作者简介:贺锋(1984—),男,工程师,沉积学与铀矿地质学。E-mail:hefeng_84@sohu.com。

通讯作者简介:林畅松(1958—),男,教授、博士生导师,沉积盆地分析。E-mail:lincs@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41130422);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB201100-03)。

and their controlling effect upon platform margin migration in different sedimentary periods in southeastern Tarim Basin. Slope-basin facies with under-developed platform margin had dominated the Early Cambrian. With sea level continuously falling during the Middle to Late Cambrian, restricted platform facies started to take shape with edges migrating basin ward. In the Early Ordovician, the platform margin narrowed due to sea level rising during the Penglai Formation deposition and widened as the sea level falling again during the Lower Yingshan Formation deposition. The upper Yingshan Formation experienced rapid transgression which narrowed the platform edge and the lower Yingshan Formation went through falling sea level which turned the platform into open ones and widened the platform margin. However, the platform was again submerged as sea level rapidly rising after the deposition of the Yijianfang Formation.

Key words: reef-beach complex, platform margin, sea level, sedimentary evolution, carbonate rock, Cambrian, Ordovician, Tarim Basin

海平面变化、构造沉降、沉积速率和气候的相互作用控制了碳酸盐岩台地的沉积类型与形成演化^[1-5]。构造沉降作用为碳酸盐岩提供了沉积的可容纳空间和保存条件,但也会造成碳酸盐台地的暴露和限制沉积相的展布^[6-7]。顾家裕等认为构造运动所形成的古地貌和水动力条件控制了碳酸盐岩台地和沉积相的类型,海平面的变化控制碳酸盐岩台地边缘类型及沉积物的结构特征^[8-9]。

古海平面变化是沉积学和岩相古地理研究的重要内容之一。国内外地质学者通过层序地层学和沉积结构分析、元素地球化学特征以及自然伽马能谱分析等方法对全球及塔里木盆地海平面变化规律进行研究,探讨了海平面变化旋回与沉积演化的关系^[9-25]。不少学者利用地震剖面上可追踪的上超点、岩相组合样式、地层终止型式(上超、顶超、削截、下超)、层序间的组合关系(加积、进积和退积)及层序不对称系数来研究相对海平面的变化及其相关沉积历史^[1,10-14]。也有不少学者利用碳氧同位素、锶同位素和有机碳含量等地球化学的方法来研究海平面变化。氧同位素值的增大指示古海平面的下降,氧同位素值的减小指示古海平面的上升;与之相反,碳同位素值正向漂移指示海平面下降,负向漂移指示海平面上升^[15-18];锶同位素变化与海平面变化呈负相关^[19-20];烃源岩的形成严格受古气候和古环境的影响,有机碳含量(TOC)高反映有机生产率高和有机埋藏率高,指示海水较深的沉积环境^[15-17]。自然伽马能谱在复杂构造的碳酸岩地层中的岩性鉴定功能,在储层评价上有较高应用价值^[21-22]。地层中的放射性核元素钍、铀和钾的分布规律与岩石的岩性、成岩环境、矿物成分和地下水活动有关^[23-24]。自然伽马能谱中的U、Th和K能很好地反映出沉积环境能量的变化,地层的泥质含量与Th含量有较好的正相关性,高Th和K含量反映的是一种稳定低能的潮湿的沉积环境;水动力的强弱反映了沉积

环境的能量高低,水流作用就越强,U的富集程度就越高,高U含量反映的能量高的沉积环境^[21-25]。

在海相碳酸盐岩沉积体系中,台缘带是碳酸盐岩台地相与陆棚相之间的过渡地带,是台缘高能礁滩发育的有利部位。塔里木盆地寒武系-奥陶系多期碳酸盐岩台缘带勘探已取得了重大突破,台缘带的研究对油气勘探具有非常重要意义。张月巧、余宽宏、王铁冠以及云露等对塔东南地区寒武系-奥陶系碳酸盐岩沉积演化也进行了解剖,取得了较好的认识^[26-29]。由于早期塔东南地区钻井较少,地震资料以二维为主,研究程度相对较低,对碳酸盐岩台缘带沉积演化研究方面不足。因此研究塔东南地区碳酸盐岩台缘带的展布、迁移以及相对海平面变化对其发育的影响,是目前塔东油气勘探取得新突破而需要解决的重大基础问题之一。

1 地质概况

塔东南地区处于塔里木盆地东南部,隶属于塔里木板块,面积 $12.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括满加尔坳陷、孔雀河斜坡、古城低凸起、东南隆起及罗布泊低凸起五个二级构造单元(图1)^[26-27]。研究区目前共有11口井钻遇寒武系-奥陶系碳酸盐岩。塔东南地区勘探主要目标为寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩,古城台地和罗西台地碳酸盐岩台缘带的存在早已被证实,为有利储集相带的发育区^[28-29]。

2 台地边缘带特征

塔东南地区寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩可以划分台地、台地边缘带和盆地3个相区,发育开阔台地、局限-半局限台地、淹没台地、台地边缘、前缘斜坡、浅海陆棚和深水盆地等亚相。在岩心、薄片以及测井资料分析的基础上,结合地震相、地震属性以及地层厚度、古地貌来识别台地边缘带。台地边缘带岩石类型

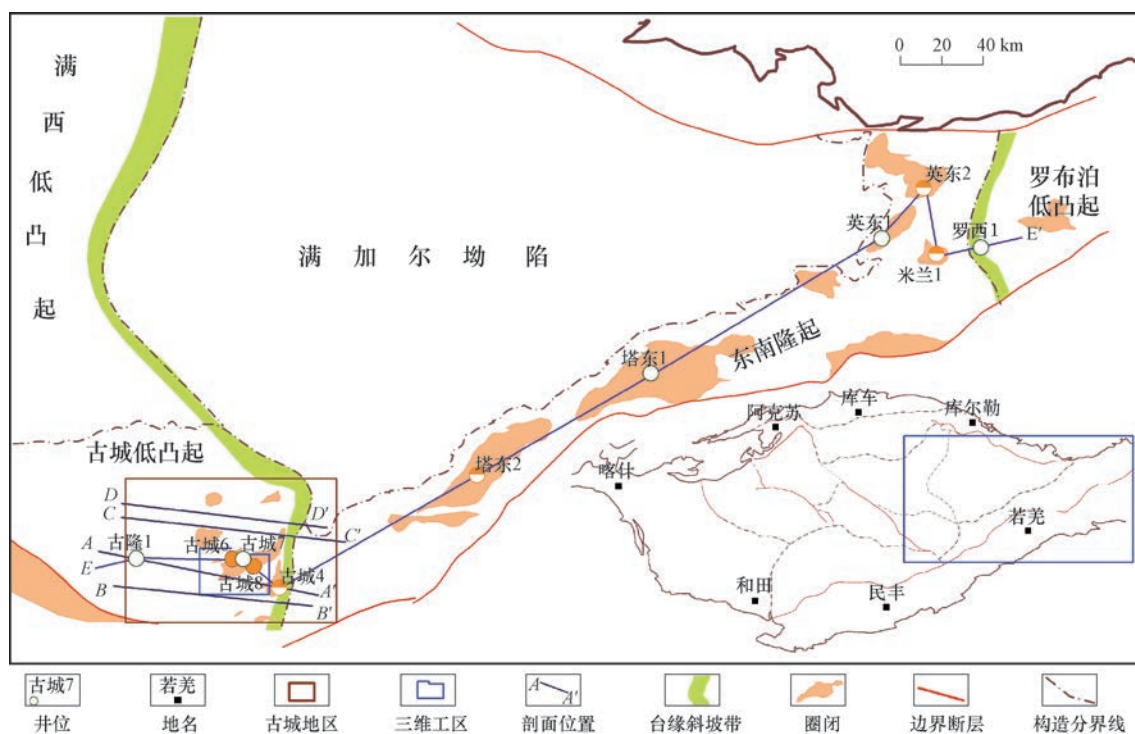


图1 塔里木盆地东南部构造位置及构造单元划分

Fig. 1 Structural location and tectonic units of southeastern Tarim Basin

主要为砂屑灰岩、生屑灰岩、鲕粒灰岩与泥晶灰岩等,发育台缘礁滩体和滩间海微相,表现为台地边缘高能沉积环境;地震反射特征为杂乱反射或空白地震反射特征,礁(丘)滩复合体外呈丘状外形,内部为明显杂乱反射或空白反射。较大的礁(丘)滩复合体快速生长形成地层厚度增大的建隆特征,及向盆地区沉积厚度急剧减薄形成的陡坡或远端变陡特征是判断台地边缘的证据。

2.1 台地边缘带岩相特征

台地边缘带位于台地的外侧,靠近盆地,长期处于正常浪基面之上,为浅水的高能相带。台地边缘带在塔东地区中上寒武统-中下奥陶统均有分布。

2.1.1 台地边缘礁滩复合体

位于台地边缘带靠台地一侧,处于平均浪击面之上,水体整体为高能环境。岩石类型主要以砂屑灰岩为主,还发育泥晶灰岩、生屑灰岩与鲕粒灰岩等。在塔东南地区,寒武系-奥陶系的不同时期,台地边缘相带有所迁移。古城地区(古城4井,6井,7井,8井)和罗西地区罗西1井奥陶系蓬莱坝组(O_{1p})、鹰山组(O_{1-2y})至一间房组(O_{2yj})均具有典型台地边缘相特征,台地边缘鲕粒滩(图2a,b)、生屑滩(图2c,d)和高能砂屑滩广泛发育(图2e—g),多为粒屑组成,属于台缘滩微相;泥晶灰岩、藻灰岩以及

弱粘结亮晶砂屑灰岩(图2h—j)沉积能量相对较低,以滩间海微相为主。

2.1.2 台缘斜坡相

台缘斜坡位于台地边缘靠盆地一侧,沉积界面在浪击面之上,水体能量相对较低。古城4井上寒武统发育垮塌沉积(图2k),英东2井上寒武统(ϵ_3)也主要发育台缘斜坡相为主,岩性为泥质泥晶云岩(图2l)、细晶白云岩、粉晶白云岩等,整体颗粒较细,反映水体能力较低沉积环境。

2.2 台地边缘带地震反射特征

古城地区早寒武世(ϵ_1)为宽缓的缓坡台地-深水盆地,台地样式为缓坡进积不镶边型台地;中寒武(ϵ_2)沉积期,台地样式转化成缓坡进积镶边型,发育2~3期台缘礁滩体,地震剖面结构显示为进积型(图3);晚寒武(ϵ_3)沉积期,台地样式仍为缓坡镶边型,发育1期台缘礁滩体,剖面结构显示为进积型,发育大型前积结构,台内滩也比较发育,在地震剖面上呈丘形内部弱反射特征。中下奥陶统蓬莱坝组(O_{1p})为缓坡-弱镶边结构,台地边缘建隆特征不明显,主要为台缘滩沉积;鹰山组(O_{1-2y})——一间房组(O_{2yj})为陡坡镶边台地型,出现加积为主、加积-进积复合型台地结构,形成逐渐变陡的台缘类型;吐木休克(O_{3t})沉积期,

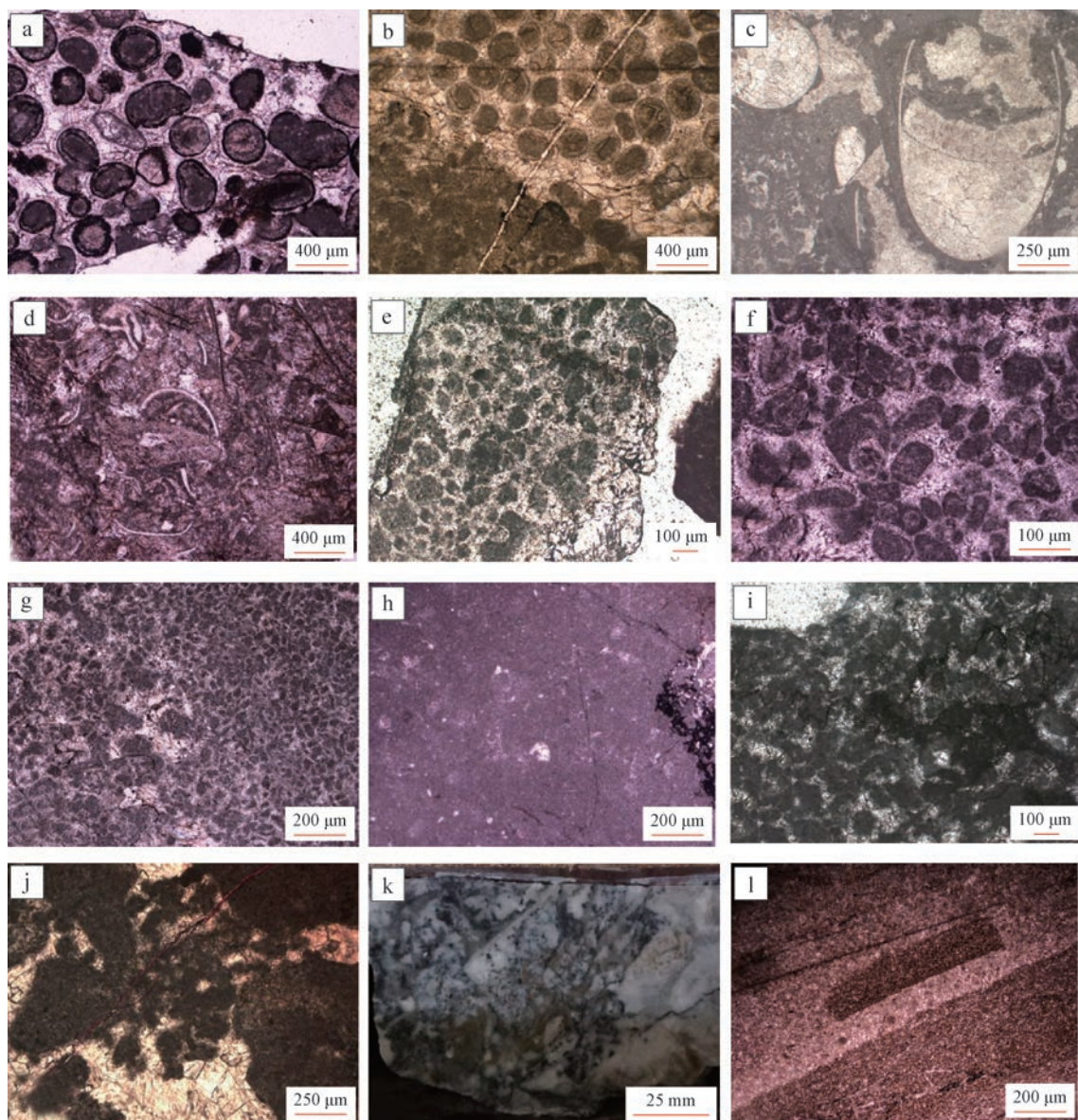


图2 塔里木盆地东南部不同沉积微相的岩心和薄片特征

Fig. 2 Petrological features of cores and thin sections from different microfacies in southeastern Tarim Basin

a. 鲕粒灰岩, 古城7井, 一间房组, 埋深5 662 m; b. 鲕粒灰岩, 含亮晶砂屑灰岩, 古城4井, 一间房组, 埋深5 508.3 m; c. 亮晶生屑灰岩, 罗西1井, 一间房组, 埋深3 935.26 m; d. 亮晶生屑灰岩, 古城7井, 鹰三段, 埋深5 620 m; e. 亮晶砂屑灰岩, 古城8井, 鹰二段, 埋深5 875 m; f. 亮晶砂屑灰岩, 古城7井, 鹰三段, 埋深6 048 m; g. 亮晶砂屑灰岩, 含泥质, 古城7井, 鹰四段, 埋深6 316.05 m; h. 泥晶灰岩, 古城7井, 鹰三段, 埋深6 140 m; i. 藻灰岩, 古城8井, 鹰三段, 埋深6 048 m; j. 弱粘结亮晶砂屑灰岩, 古城6井, 鹰一段, 埋深5 807.23 m; k. 角砾状白云岩, 古城4井, 上寒武统, 埋深6 503.8 m; l. 泥晶云岩, 英东2井, 上寒武统, 埋深4 456.25 m

海平面快速上升, 形成淹没型台地结构。进积型礁滩体向加积型礁滩体转化的界面为蓬莱坝组顶部, 顶部可见剥蚀。

地震剖面上台地、台地边缘区、台缘斜坡区和盆地区均具有不同的地震反射特征。台地区反射特征为中低频、中强振幅, 平行-亚平行结构; 台地边缘区常发育礁滩复合体, 为杂乱反射或空白反射特征, 在中上寒武统礁(丘)滩复合体呈丘形, 由西向东迁移叠置, 生物丘滩体侧积、迁移形成复合的角度低缓的S型或叠

瓦状前积结构; 台缘斜坡相具有中-强振幅、前积反射特征; 盆地区为泥岩和页岩沉积, 呈中-弱振幅、平行、连续性较好。

在地震剖面上礁滩复合体的杂乱反射或空白反射特征、外部呈丘形内部弱反射特征可以认为是台地边缘的特征(图3)。根据台缘带的地震反射特征, 可以初步确定台缘带分布位置。从地震剖面上看, 塔东地区中寒武世(ϵ_2)开始建隆, 发育台地边缘相, 台缘宽度20 km左右; 晚寒武世(ϵ_3)礁(丘)台缘带有所增宽, 台

缘带向盆地方向迁移2~8 km,反映了水退的特征;蓬莱坝组(O_{1p})沉积期,台缘带变窄,反映了水进的特征;鹰山组(O_{1-2y})下段台缘带往台地地方变宽,宽度达40 km;鹰山组(O_{1-2y})上段台缘带又开始变窄。

2.3 台地边缘带古地貌特征

塔东地区寒武系-中下奥陶统没有缺失,不存在角度不整合面,剥蚀量较小,地层厚度变化基本上反映了当时的古地貌形态、碳酸盐岩台地边界以及台地形

态。较大的礁(丘)滩复合体快速生长形成地层厚度增大的建隆特征,以及向盆地区沉积厚度急剧减薄形成的陡坡或远端变陡特征是判断台地边缘的明显证据。寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩古地貌单元可以划分为台内高隆区、台缘高隆区、台缘斜坡带、陆架斜坡和深海盆地区^[30]。塔东南地区寒武系沉积期古地貌上总体表现为“两高夹一低”的形态,为台内高隆区-台缘高隆区-台缘斜坡带-陆架斜坡-深海盆地区-陆架斜坡-台缘斜坡带-台缘高隆区-台地平缓区的

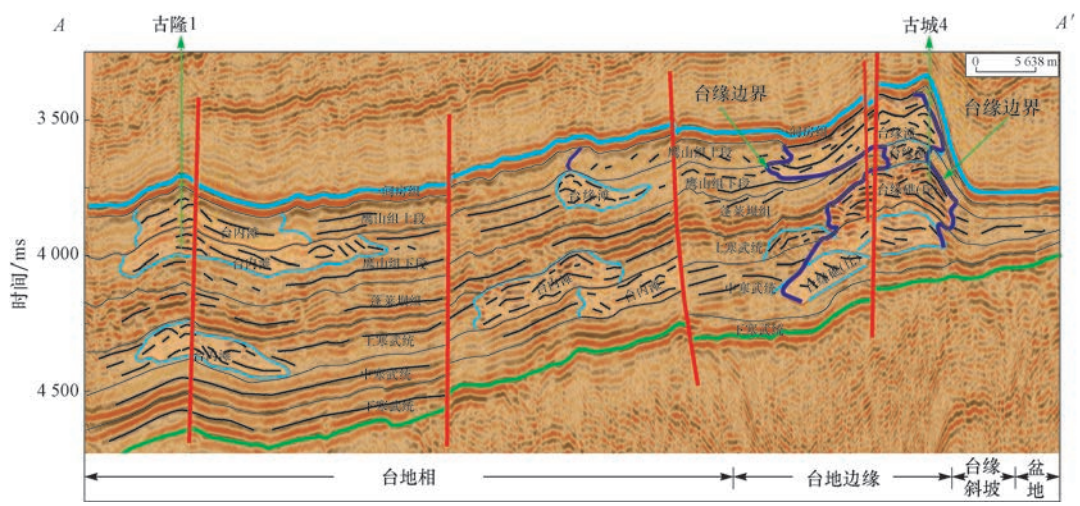


图3 塔里木盆地东南部古城地区寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩台地结构地震解释剖面

Fig. 3 Seismic sections showing the architectures of the Cambrian and Middle-Lower Ordovician carbonate platform in Gucheng, southeastern Tarim Basin

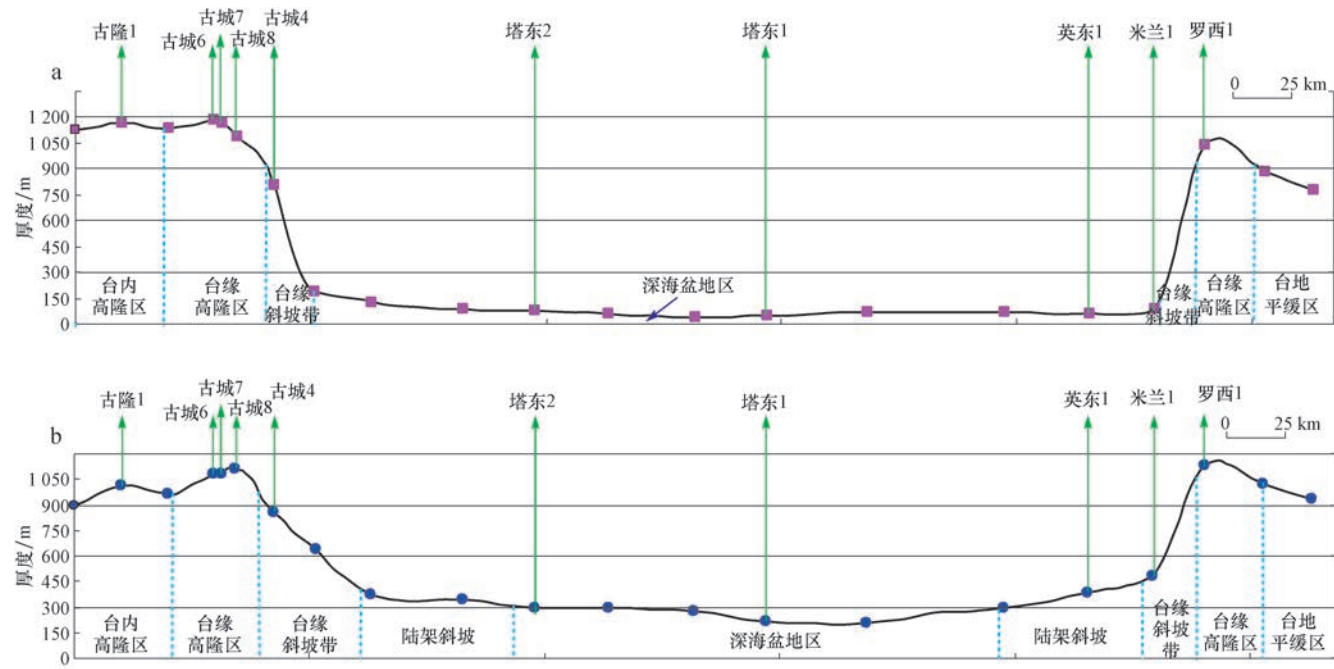


图4 塔里木盆地东南部寒武系(b)和中-下奥陶统(a)古地貌剖面

Fig. 4 Geomorphologic profiles of the Cambrian (b) and Middle-Lower Ordovician (a) carbonate platform in southeastern Tarim Basin

格局。其中东西两侧沉积地层厚度较大,为台地高隆区,地貌高部位呈南北向弧形展布;中部地层厚度非常薄,为欠补偿盆地发育区;过渡带发育台缘斜坡和陆架斜坡,地形比较宽缓,深水盆地地区地势相对平缓(图4)。中下奥陶统继承了寒武系整体古地貌特征,奥陶系古地貌可以划分为台内高隆区-台缘高隆区-台缘斜坡带-深海盆地-台缘斜坡带-台缘高隆区-台地平缓区格局。相比寒武系,奥陶系的台缘坡折带宽度变窄,但台缘斜坡带更陡,陆架斜坡不发育,坡折带形态更清楚,呈S型展布。

塔东南地区古地貌分为台内高隆区、台缘高隆区、台缘斜坡、陆架斜坡和深海盆地等5个地貌单元,分别对应台地相、台地边缘相、台缘斜坡相、浅海陆棚相和深海盆地相。寒武系沉积期,罗西1井位于台缘高隆区,米兰1井和英东2井主要位于台缘斜坡区,英东1井位于陆架斜坡区,塔东1井和塔东2井位于深水盆地,依次发育台地边缘相、台缘斜坡相、浅海陆棚和盆地相带。中-下奥陶统沉积期,古隆1井位于台内高隆区,罗西1井、古城6井和古城7井位于台缘高隆区,古城4井位于台缘高隆区和台缘斜坡区过渡带,米兰1井、英东1井、英东2井、塔东1井和塔东2井位于深海盆地,依次发育台地相(台内滩)、台地边缘相(台缘滩)、台缘-斜坡过渡相和盆地相(图4)。

台地边缘地层厚度大的地方代表了碳酸盐岩生产速率大的区域,一般代表了台地边缘能量较强的地带,也是台缘礁滩体发育的位置。古城地区早寒武世还没有出现明显的台地,古城6井、7井、8井与4井总体处

于缓坡地带,古城4井以东见窄的厚度变化带,通过残厚及岩相认为是缓坡与深水盆地的分界;中寒武世在古城6井、7井、8井一带有明显的厚度加大,反映中寒武统的台地边缘的建隆;晚寒武世台地边缘相带向盆地内进一步迁移,厚度最大的建隆转移到古城8井的东侧-古城4一带,台缘带向台内扩大变宽。蓬莱坝组(O_{1p})沉积期台缘建隆不明显,古城6井处于台内,古城7井处于台缘-台内过渡区,古城8井及古城4井处于台地边缘带,台缘带变窄;至鹰山组(O_{1-2y})古城6井、7井和古城8井都处于台缘带,古城4井已基本处于台缘-斜坡过渡地带,台缘带变宽向台地内迁移(图5)。

在海相碳酸盐岩沉积体系中,台缘坡折带决定了台缘带的分布位置,古地貌特征及其演化控制着沉积相带及礁滩体的分布。台缘高隆区古地貌单元的分布及其演化控制着台缘带及台缘礁滩体的分布。在古城地区相对古地貌较高的区域,相对海平面浅,水动力更足,外海波浪的作用下形成了粗粒的碎屑滩。台地边缘滩和台内滩均属于沉积水体能量较高时的产物,因此在古地貌相对较高的地区砂屑滩更为发育。相反在没有任何古地形的高地,则发育较深水的以泥晶灰岩为主的滩间海沉积。

3 相对海平面变化曲线的编制

Haq 等对全球海平面变化已经做了较多的研究工作,取得了不少成果^[31],不少学者通过元素地球化学特征、自然伽马能谱分析法以及层序地层学和沉积结

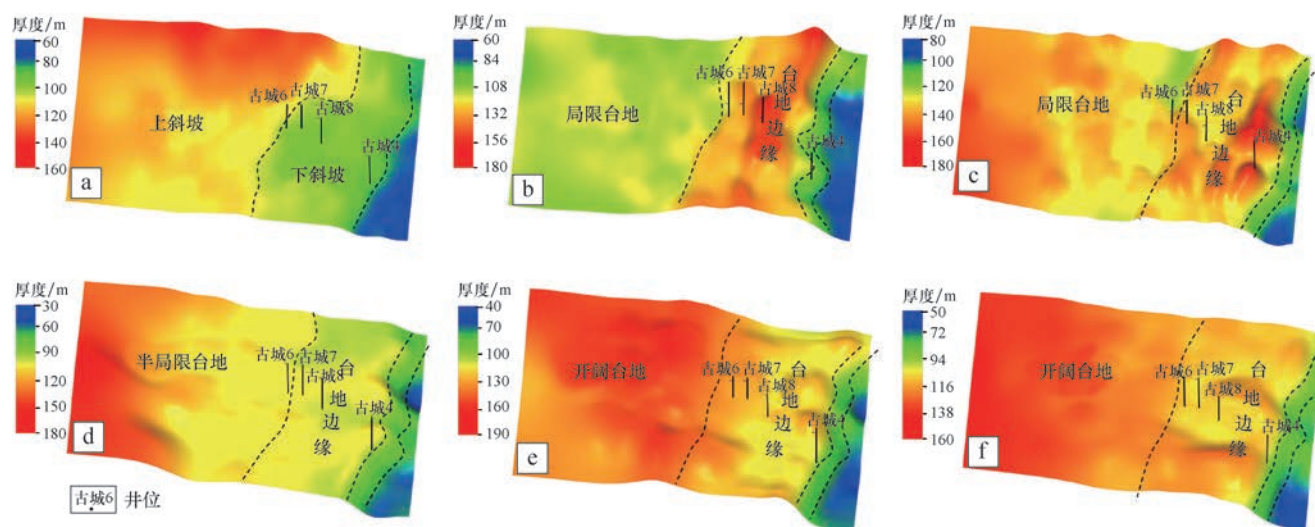


图5 塔里木盆地东南部古城地区寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩古地貌形态

Fig. 5 Geomorphology of the Cambrian and Middle-Lower Ordovician carbonate platform in Gucheng area, southeastern Tarim Basin

a. 下寒武统(ϵ_1); b. 中寒武统(ϵ_2); c. 上寒武统(ϵ_3); d. 中-下奥陶统蓬莱坝组(O_{1-2p}); e. 中-下奥陶统鹰山组(O_{1-2y})下段;

f. 中-下奥陶统鹰山组(O_{1-2y})上段

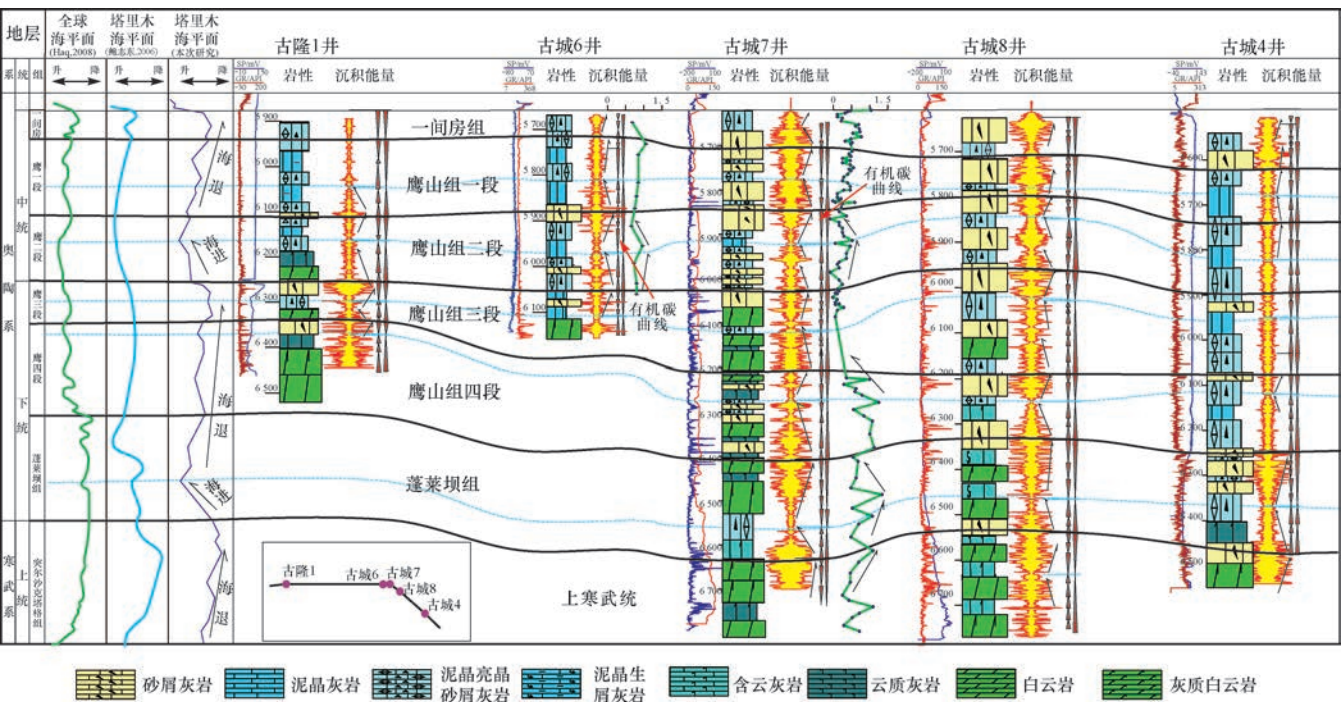


图6 塔里木盆地东南部古城地区中-下奥陶统相对海平面变化曲线^[19,31]

Fig. 6 Relative sea-level change curves of the Middle-Lower Ordovician in Gucheng area, southeastern Tarim Basin^[19,31]

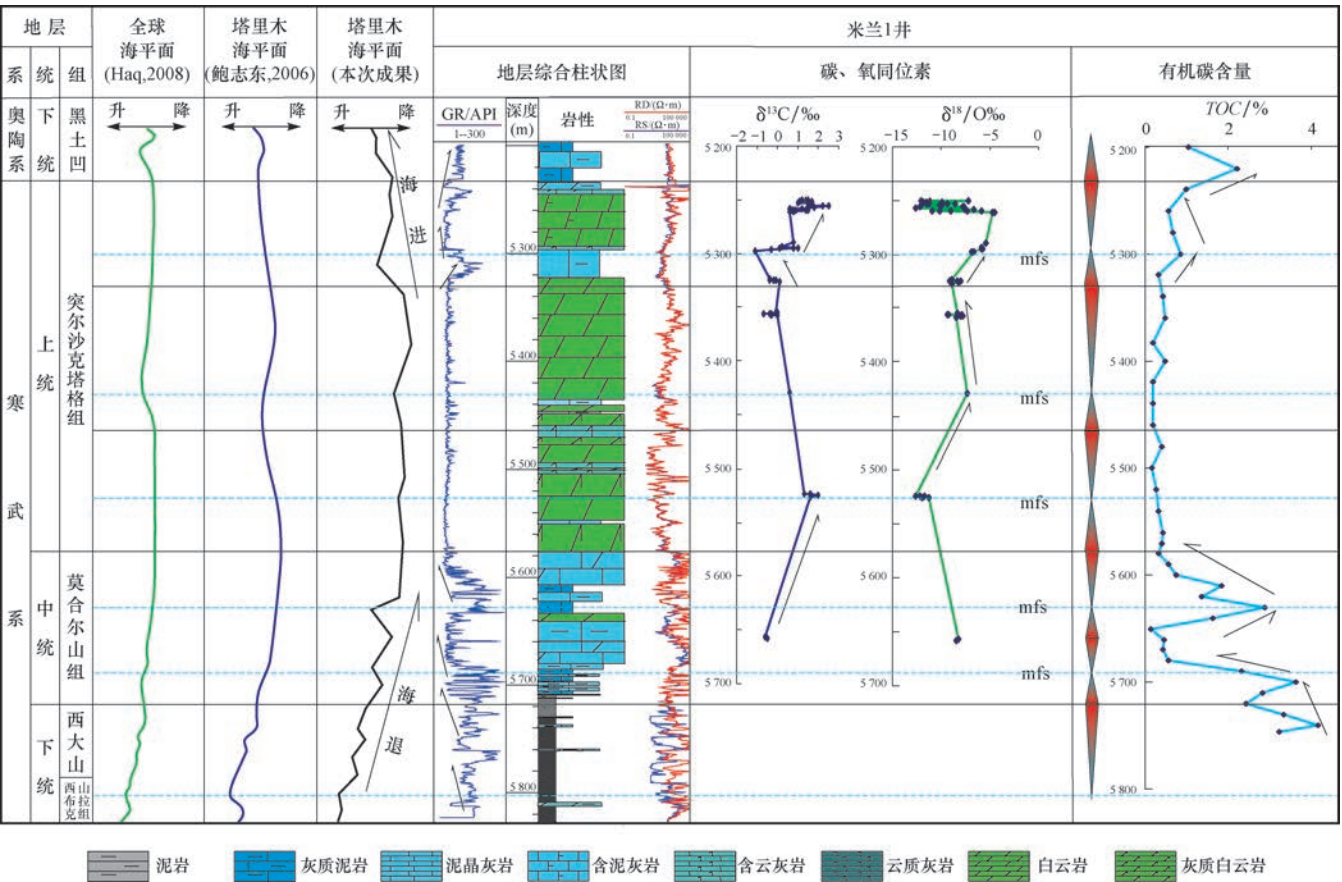


图7 塔里木盆地东南部米兰1井寒武系相对海平面变化曲线^[17,19,31]

Fig. 7 Relative sea-level change curves of the Cambrian in Well Minlan 2, southeastern Tarim Basin^[17,19,31]

构分析等方法对塔里木盆地寒武纪-奥陶纪相对海平面变化规律进行研究^[11-14,16-20]。塔东南地区存在3次大的海侵和2次较大的海退:早寒武世海侵,中晚寒武世海退;早奥陶世第二次海侵,中奥陶世海退;晚奥陶世再次海侵^[17,19-20]。

在全球及塔里木盆地海平面变化曲线的基础上,本文主要采用自然伽马能谱分析法,结合稳定碳氧同位素和有机碳百分含量,编制塔里木盆地塔东南地区寒武系-中下奥陶统相对海平面变化曲线。岩性和能量有较好的对应性,参数 $U/(Th+K)-Th/KTh$ 本身就是沉积环境能量的表征,它反映出水动力作用的强弱,泥质含量高低,颗粒粒度大小。砂屑灰岩对应高能环境,泥晶砂屑灰岩对应中等能量环境,泥晶灰岩对应低能环境。依托参数 $U/(Th+K)-Th/KTh$ 计算出古城6井、7井、8井和4井以及古隆1井的能量变化。古城7井和8井位于碳酸盐岩台地边缘,以高能、中-高能为主,为台地边缘环境;古城4井位于台地边缘前缘-台缘斜坡带,沉积能量稍低于古城7井和8井。古城6井位于台地边缘到台内的过渡位置,以中能为主,为台地边缘到台内的过渡环境;古隆1井位于台地内部,以低能、中高能为主,为台地沉积环境(图6)。

根据前人成果,结合 $U/(Th+K)-Th/KTh$ 、碳氧同位素及有机碳含量曲线,编制塔东南地区寒武系-中下奥陶统海平面变化曲线。在蓬莱坝组(O_{1p})中部看到古城7井、古城4井和古城8井能量都非常低,古城7井鹰山组(O_{1-2y})四段和蓬莱坝组有机碳含量高达1.2%,说明蓬莱坝和鹰四段在沉积期,海平面较高,以低能沉积环境为主(图6)。米兰1井下寒武统有机碳含量的值都非常高,普遍大于2.0%;上寒武统有机碳值变低,低于1.0%;蓬莱坝组有机碳含量又开始增加,大于2.0%,这说明从早寒武世至晚寒武世,海平面一直呈下降趋势,到蓬莱坝组沉积期海平面变深。米兰1井中寒武统(ϵ_2)的 $\delta^{13}C$ 值相对偏低, $\delta^{18}O$ 相对偏高,说明赋存丰富的有机质,沉积环境为相对深水区;上寒武统 $\delta^{13}C$ 值相对增加, $\delta^{18}O$ 值相对减小,海平面下降。米兰1井上寒武统顶部 $\delta^{13}C$ 值变低、 $\delta^{18}O$ 值增加拐点处正好对应洪泛面(图7)。

本次研究的海平面变化曲线与前人基本一致,但更为精细,并更能真实地反映小级别的海平面变化。从海平面变化曲线来看,塔东南地区寒武系-中下奥陶统主要经历了3次大的海侵,最大的海平面下降界面位于寒武系顶部、蓬莱坝(O_{1p})顶部和鹰山组(O_{1-2y})下段以及一间房组(O_{2yj})顶部(图6,图7)。寒武系整体为海平面下降的过程,早奥陶蓬莱坝沉积期,海平面开

始上升,鹰下段沉积期海平面持续下降,鹰上段沉积早期,海平面上升,鹰上段沉积中期海平面又开始下降,到晚奥陶世吐木休克组(O_3t)沉积期海平面快速上升。塔东地区海平面变化趋势总体可以和Haq编制的全球海平面旋回相对比,尤其是Haq认为全球海平面下降在中-晚奥陶世之间比较明显^[31],这与塔里木盆地的特征很相似,大致对应鹰山组的中部和顶部,即鹰山组上、下段之间存在明显的水退界面,这与塔东南地震剖面也较为吻合。

4 相对海平面变化对台地边缘带迁移的控制

综合利用钻井、地震剖面 and 地震属性以及伽马能谱测井、岩性组合特征、元素地球化学特征等信息,编制不同测线各个时期的台地边缘演化位置,探讨海平面变化对不同时期台地边缘迁移的控制作用(图8)。古城地区晚寒武世-奥陶纪台地向海一侧的边缘带迁移并不十分明显,边缘带基本不动,只有中寒武世到晚寒武世,靠海台缘带整体向东迁移。靠台地内部台地边缘带有明显的迁移特征,台缘相带的迁移基本可以反映出海平面变化对它的影响。塔东南地区中寒武世开始建隆,发育台地边缘相,台缘宽度20 km左右;晚寒武世礁(丘)台缘带有所增宽,台缘带向盆地方向迁移2~8 km,反映了水退的特征;蓬莱坝组(O_{1p})沉积期,台缘带变窄,反映了水进的特征;鹰山组(O_{1-2y})下段为持续水退期,台缘带向西迁移变宽,宽度达40 km;鹰山组(O_{1-2y})上段开始次一级的水退旋回,至一间房组(O_{2yj})达到最大水退,台缘向西迁移,台地边缘高能滩广泛发育,台缘带变宽;一间房组(O_{2yj})之后塔里木盆地进入了一次规模较大的广泛的海侵期,塔东南碳酸盐岩台地整体被淹没,台缘带消失。

5 碳酸盐岩台地边缘沉积演化模式

利用沉积能量变化曲线,结合有机碳、碳氧同位素和岩心测井曲线,编制了塔里木盆地东南部寒武系-中下奥陶统海平面变化曲线,反映了塔里木盆地东部寒武纪-奥陶纪碳酸盐岩台地演化与海平面升降具有密切联系(图9)。塔东南地区沉积相演化主要受海平面升降控制,表现为相带界限的东西向迁移,尤其是台缘斜坡相带的迁移和晚期陆棚相的逐渐消亡。早寒武世塔东南地区以斜坡-盆地相为主,台缘不发育;随着海平面不断下降,中寒武世台地类型为局限台地,台地

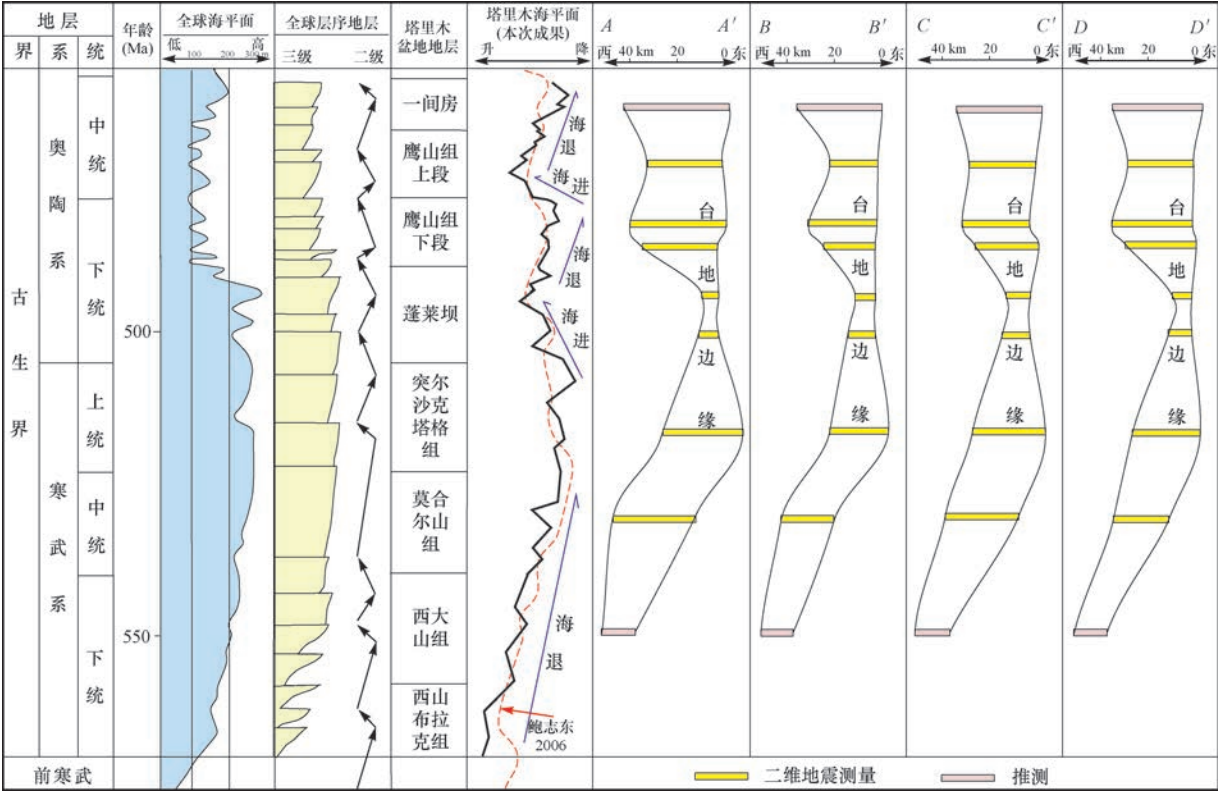


图8 塔里木盆地东南部相对海平面变化与台缘迁移的关系^[19,31] (剖面位置见图1)

Fig. 8 Relationship between relative sea-level change and platform margin migration in southeastern Tarim Basin^[19,31] (see Fig. 1 for the section location)

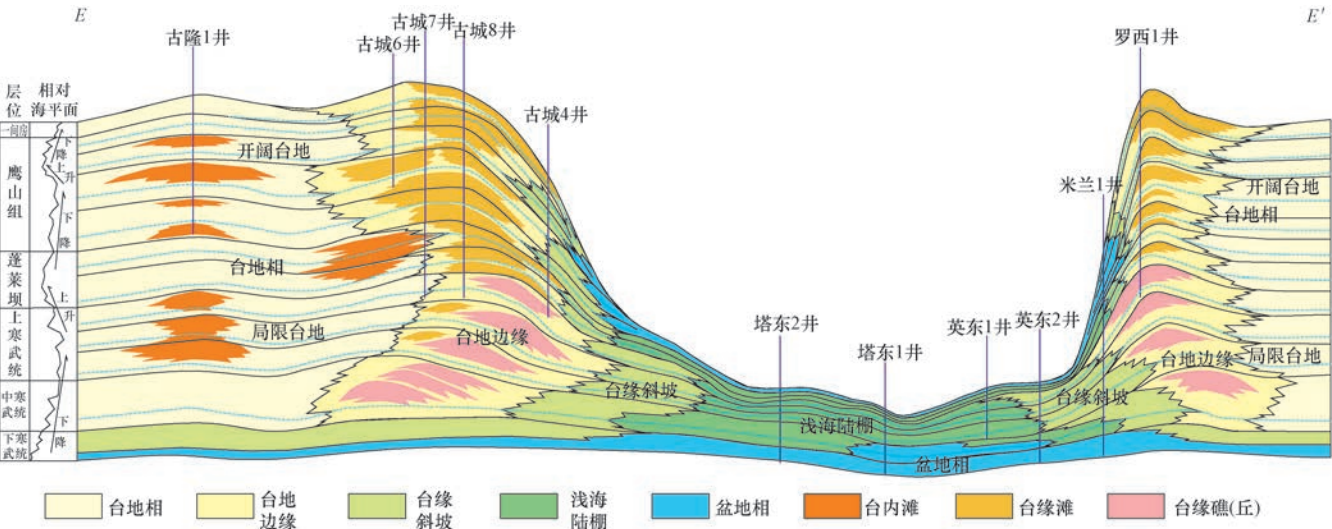


图9 塔里木盆地东南部寒武系-中下奥陶统碳酸盐岩台地沉积演化模式

Fig. 9 Sedimentary evolution model of the Cambrian and Middle-Lower Ordovician carbonate platform in southeastern Tarim Basin

边缘相发育且相带较宽;海平面继续下降,晚寒武世台地边缘向盆地方向迁移;早奥陶世全球海平面开始上升,蓬莱坝组沉积期台地边缘向台地方向迁移,宽度变窄;鹰山组下段沉积期,海平面下降,台地类型变为开阔台地,鹰山组下段台地边缘相带变宽;鹰山组下段沉积之后,经历了快速的水进,海平面又开始下降,台地

边缘相带向盆地内侧进一步加宽,至一间房组达到最大;一间房组沉积之后随海平面快速上升,台缘带消失。

塔东南地区(古城台地和罗西台地)早寒武世主要为斜坡相-深水盆地沉积,其中深海盆地分布广泛,发育深水碳酸盐岩、硅质岩和黑色泥页岩;中晚寒武世

时塔东南地区主要接受了一套海退沉积体系,沉积格局发生变化,开始出现台地边缘相区和陆棚相沉积,沉积格局为(半)局限台地相-开阔台地-台缘丘(礁)滩相-台缘斜坡相-浅海陆棚-盆地相;晚寒武世较中寒武世海平面进一步下降,台地边缘向盆地内迁移。早奥陶世开始海侵,礁滩体和灰泥丘沉积继续发育,而陆棚和陆棚斜坡相开始消失,沉积格局从西向东开始变为开阔台地-台缘滩相-台缘斜坡相-盆地相;从蓬莱坝组、鹰山组到晚奥陶世一间房组,古城地区台地边缘相带发育;鹰山组上段沉积期海平面开始下降,一间房组之后盆地进入快速海侵阶段,台地被淹没。

6 结论

1) 台缘带岩石类型主要为颗粒灰岩、生屑灰岩、鲕粒灰岩与泥晶灰岩等,主要发育台缘礁滩体和滩间海微相;地震上呈杂乱反射或空白反射特征,礁(丘)滩复合体外部呈丘状外形,内部为显杂乱反射或空白反射;较大的礁(丘)滩复合体快速生长形成地层厚度增大的建隆特征,以及向盆地区沉积厚度急剧减薄形成的陡坡或远端变陡特征是判断台地边缘的证据。

2) 本次研究的海平面变化曲线与前人成果大体一致,与中奥陶世全球海平面上升事件也表现出高度的一致性,但是更为精细,并更能真实的反映小级别的海平面变化。寒武系整体为海平面下降的过程,早奥陶世蓬莱坝组沉积期,海平面开始上升,鹰山组下段沉积期海平面持续下降,鹰山组上段沉积早期,海平面上升,鹰山组上段沉积中期海平面又开始下降,到晚奥陶世吐木休克组沉积期海平面快速上升。

3) 海平面变化对不同时期台地边缘迁移的具有控制作用:早寒武世塔东地区以斜坡-盆地相为主,台缘带不发育;中晚寒武世海平面不断下降,台地边缘相发育且向盆地方向迁移;早奥陶世全球海平面开始上升,蓬莱坝组沉积期台地边缘宽度变窄;鹰山组下段沉积期海平面下降,鹰山组下段沉积期台地边缘相带变宽;鹰山组上段沉积期经历了快速的水进,海平面又开始下降,台地边缘相带向盆地内侧进一步加宽,至一间房组达到最大;一间房组沉积之后随海平面快速上升,台地被淹没,台缘带消失。

参 考 文 献

- [1] Vail P R. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology-an overview[J]. *Cycles and Events in Stratigraphy*, 1991: 617-659.
- [2] Tucker M E, Wright V P. Carbonate sedimentology[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990: 482.
- [3] Sarg J F. Carbonate sequence stratigraphy[M]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea-level changes: An integrated approach. SEPM Special Publication 42. 1988: 155-181.
- [4] Moore H C. Carbonate reservoir-porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[J]. *Elsevier*, 2001: 74-78.
- [5] Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, and the hierarchy of stratigraphic forcing[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 102(2): 535-562.
- [6] Tcherepanov E N, Droxler A W, Lapointe P, et al. Carbonate seismic stratigraphy of the Gulf of Papua mixed depositional system: Neogene stratigraphic signature and eustatic control[J]. *Basin Research*, 2008, 20(2): 185-209.
- [7] Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. Tectonic and climatic control on growth and demise of the Phan Rang carbonate platform offshore south Vietnam[J]. *Basin Research*, 2009, 21(2): 225-251.
- [8] 顾家裕, 马锋, 季丽丹. 碳酸盐岩台地类型、特征及主控因素[J]. *古地理学报*, 2009, 11(1): 21-27.
Gu Jiayu, Ma Feng, Ji Lidian. Types, characteristics and main controlling factors of carbonate platform[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(1): 21-27.
- [9] Vail P R, Todd R G, Sangree J B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 5. Chronostratigraphic significance of seismic reflections: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation[J]. *AAPG Bulletin*, 1977: 99-116.
- [10] 漆立新. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 771-779.
- [11] 林畅松, 杨海军, 蔡振中, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩台地的层序结构演化及其对盆地过程的响应[J]. *沉积学报*, 2013, 31(05): 907-919.
Lin Changsong, Yang Haijun, Cai Zhenzhong, et al. Evolution of depositional architecture of the Ordovician carbonate platform in the Tarim basin and its response to basin processes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(05): 907-919.
- [12] 于炳松. 塔里木盆地北部寒武纪海平面变化研究[J]. *沉积学报*, 1996, 14(1): 33-39.
Yu Bingsong. Study on Sea-level Change of Cambrian in Northern Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(1): 33-39.
- [13] 高志前, 樊太亮, 焦志峰, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系碳酸盐岩台地样式及其沉积响应特征[J]. *沉积学报*, 2006, 24(01): 19-27.
Gao Zhiqian, Fan Taiyang, Jiao Zhifeng, et al. The structural types and depositional characteristics of carbonate platform in the Cambrian-Ordovician of Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(01): 19-27.
- [14] 高志前, 樊太亮, 李岩, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(04): 549-556.

- Gao Zhiqian, Fan Tailiang, Li Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian Ordovician in Tarim basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(04): 549-556.
- [15] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 59-88.
- [16] 杜小弟, 王璞君, 匡立春, 等. 塔里木盆地震旦-泥盆纪古海平面变化再造及形成机理分析[J]. 沉积学报, 1997, 15(03): 16-19.
- Du Xiaodi, Wang Pujun, Kuang Lichun, et al. The reconstruction and origin of sealevel changes of Sinian period to Devonian period in Tarimbasin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(03): 16-19.
- [17] 张水昌, WANGRL, 金之钧, 等. 塔里木盆地寒武纪-奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系: 碳氧同位素新证据[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 459-466.
- Zhang Shuichang, Wang Ruiliang, Jin Zhijun, et al. The relationship between the Cambrian-Ordovician high-TOC source rock development and paleoenvironment variations in the Tariat Basin, Western China: carbon and oxygen isotope evidence[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 459-466.
- [18] 赵宗举, 周新源, 王招明, 等. 塔里木盆地奥陶系边缘相分布及储层主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 738-744.
- Zhao Zongju, Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, et al. Distribution of marginal facies and main controlling factors of reservoirs in the Ordovician, the Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 738-744.
- [19] 鲍志东, 金之钧, 孙龙德, 等. 塔里木地区早古生代海平面波动特征: 来自地球化学及岩溶的证据[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 366-373.
- Bao Zhidong, Jin Zhiyun, Sun Longde, et al. Sea-level fluctuation of the Tarim area in the early Paleozoic: response from geochemistry and karst[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 366-373.
- [20] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, 32(01): 36-42.
- Jiang Maosheng, Zhu Jingquan, Chen Daizhao, et al. Carbon and strontium isotope characteristics of Ordovician carbonate rocks in Tarim Basin and respond to sea-level change[J]. Science in China Series D: Earth Science, 2002, 32(01): 36-42.
- [21] Fertl W H. Gamma ray spectral logging: a new evaluation frontier Part III—Measuring source rock potential[J]. World Oil (United States), 1983, 196(6).
- [22] 陈中红, 查明, 金强. 自然伽马及自然伽马能谱测井在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1145-1150.
- Chen Zhonghong, Cha Ming, Jin Qiang. Application of natural gamma ray logging and natural gamma spectrometry logging to recovering paleoenvironment of sedimentary basin[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2004, 47(6): 1145-1150.
- [23] 郭余峰, 单秀兰. 利用自然伽马能谱确定地层岩性的方法[J]. 物探与化探, 1996, 03: 198-201.
- GuoYufeng, Shan Xiulan. The determination of lithologic character of strata by means of natural gamma spectral[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(3): 198-201.
- [24] 阳孝法, 林畅松, 杨海军, 等. 自然伽马能谱在塔中地区晚奥陶世碳酸盐岩层序地层分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 384-391.
- Yang Xiaofa, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Application of natural gamma ray spectrometry in analysis of Late Ordovician carbonate sequence stratigraphic analysis in middle Tarim Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 384-391.
- [25] Schnyder J, Ruffell A, Deconinck J F, et al. Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic-early Cretaceous palaeoclimate change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 229(4): 303-320.
- [26] 张月巧, 贾进斗, 靳久强, 等. 塔东地区寒武-奥陶系沉积相与沉积演化模式[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 229-233.
- Zhang Yueqiao, Jia Jindou, Jin Jiuqiang, et al. Characteristics of Cambrian-Ordovician sedimentary facies in Tadong region and its sedimentary model[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2): 229-233.
- [27] 余宽宏, 金振奎. 地震相在塔里木盆地古城地区碳酸盐岩台地演化及特征分析中的应用[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 115-121.
- Yu Kuanhong, Jin Zhenkui. Application of seismic facies analysis method in studies of evolution and characteristics of Gucheng platform in TarimBasin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 115-121.
- [28] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 753-762.
- Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 753-762.
- [29] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788-797.
- Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788-797.
- [30] 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木早古生代原盆地古隆起地貌和古地理格局与地层圈闭发育分布[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 189-197.
- Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleohigh geomorphology and paleogeographic framework and their controls on the formation and distribution of stratigraphic traps in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 189-197.
- [31] Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.

(编辑 董立)