

塔西北下寒武统肖尔布拉克组层序划分及 台地沉积演化模式

白莹^{1,2}, 罗平^{1,2}, 周川闽¹, 翟秀芬¹, 王石³, 杨宗玉^{1,2}, 王珊¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 基于野外露头观察和室内薄片鉴定工作, 详细描述了塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组微生物碳酸盐岩的展布特征, 建立了层序地层格架, 分析了肖尔布拉克组碳酸盐台地的演化过程。研究认为, 肖尔布拉克组可分为两个三级层序: 下部层序 SQ1 整体为一套波状微生物席, 处于中-内缓坡沉积环境, 对应缓坡型台地发育阶段; 上部层序 SQ2 的海侵期是缓坡型台地向弱镶边台地的转变阶段, 斜坡以风暴沉积为主, 微生物岩不发育, 而高地则以大型进积微生物礁建隆为主, 主要通过丛状表附菌的自身骨架生长和微生物粘结方式成隆。高位期是弱镶边台地发育阶段, 台缘和台内相分异明显。台缘区早期发育房室状表附菌层, 晚期发育小型进积微生物礁群, 由微生物粘结成礁, 而台内区为低能微生物滩, 缺乏高位早期建造, 晚期以层纹石建造、泡沫绵层石和叠层石建造为主, 其形成与粘性微生物席有关。

关键词: 微生物岩; 层序; 肖尔布拉克组; 下寒武统; 碳酸盐台地; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Sequence division and platform sedimentary evolution model of the Lower Cambrian Xiaerbulak Formation in the NW Tarim Basin

Bai Ying^{1,2}, Luo Ping^{1,2}, Zhou Chuanmin¹, Zhai Xiufen¹, Wang Shi³, Yang Zongyu^{1,2}, Wang Shan¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the outcrop observation and thin section identification, the distribution of microbial carbonate is described and sequence stratigraphy framework is established in the Lower Cambrian Xiaerbulak Formation in the Aksu area, Tarim Basin. Finally the carbonate platform evolution during the deposition period of the Xiaerbulak Formation is summarized and rebuilt. The results show that the Xiaerbulak Formation can be subdivided into two third-order sequences. The lower part, SQ1, corresponds to a set of microbial mats which are middle-inner ramp deposition corresponding to the stage of ramp carbonate platform. The upper part is SQ2, which is a TST, and represents a transition from ramp carbonate platform to slightly rimmed shelf carbonate platform. On the slope the tempestite deposited without microbial carbonate, while on the paleokarst highland, the large-scale transgressive microbial reef was built through the microbial skeleton growth and correlatively bonding effect. The HST represents the stage of slightly rimmed shelf carbonate platform, where the margin and inner-platform are sharply different. On the platform margin, the EHST is characterized with chambered Epiphyton bioherm, while the LHST features some small-scale transgressive microbial bonding reefs. The inner-platform developed microbial shoal facies during the high stand, and its EHST is absent. The inner-platform LHST is characterized by laminites, spongiostromata stromatolites and stromatolites. Their formation is related to the sticky microbial mats.

Key words: microbialite, sequence, Xiaerbulak Formation, Lower Cambrian, carbonate platform, Tarim Basin

微生物岩 (microbialite, microbolite) 是由底栖微生物群落通过捕获、粘结碎屑物或自身的钙化作用在原

地形成的沉积物, 主要发育在后生生物群体出现之前或者灭绝期之后。目前, 国内外科学家的主要研究对

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2016-12-05。

第一作者简介: 白莹 (1990—), 女, 博士研究生, 碳酸盐沉积学与储层地质学。E-mail: baiying81@163.com。

基金项目: 中国石油天然气集团公司院级科技项目 (2015yj-09); 国家科技重大专项 (2016ZX05004-001)。

象为微生物碳酸盐岩,包括与微生物活动密切相关的微生物-碳酸盐沉积构造,如叠层石、层纹石、枝状石等,以及某些鲕粒、团粒、球粒和泥晶等^[1-3]。近年来,巴西桑托斯盆地和美国阿拉巴马州,以及东西伯利亚地区的油气勘探实践表明,微生物碳酸盐岩可作为良好的储层^[3]。目前,我国的微生物碳酸盐岩油气田主要分布在上扬子地区和华北地区,如四川盆地的资阳气藏、威远气田,以及渤海湾盆地的华北油田^[3]。随着研究范围的扩大和勘探工作的不断深入,中深1井和中深5井在肖尔布拉克组台盆区微生物碳酸盐岩中发现油气显示,标志着塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组微生物岩也成为了重点研究对象^[4-5]。

前人对该层位的台盆区微生物碳酸盐岩进行了较为详细的研究,研究范围多集中在阿克苏露头区,研究对象多为单一微生物礁或微生物层,侧重点为微生物建造的演化特征剖析以及岩石结构类型和储集物性特征分析等,并没有对微生物碳酸盐岩的展布特征和相关碳酸盐台地的演化方式做过多的研究^[3]。因此,本文以位于塔西北的阿克苏露头区下寒武统肖尔布拉克组为主要研究层位,依据层序地层学原理对其进行基本单元划分,并在单元内部对微生物碳酸盐岩的沉积特征进行描述,最后以此为基础建立下寒武统肖尔布拉克组缓坡型-弱镶边型台地沉积模式,力求明确微生物碳酸盐岩的展布特征与台地演化方式的时空相关性,为微生物碳酸盐台地的结构分析提供典型范例,并为微生物碳酸盐岩的演化分布和预测识别提供思考。

1 区域地质背景

早寒武世塔里木板块漂移至冈瓦纳古陆西部,大致位于赤道附近。受张裂运动的影响,塔里木板块自边缘裂解,板块北侧为南天山洋,南侧为古特提斯洋,内部形成了数个被盆地相和外缓坡相分隔的孤立碳酸盐台地(图1a)^[6]。阿克苏露头区位于塔西台地北部,隶属柯坪断隆东段,在早寒武世早期经历了大规模海侵后,不整合面上沉积了分布广泛的黑色页岩、含磷硅质岩和磷块岩,形成了碳酸盐缓坡,之后受持续海退的影响逐渐演变为浅水镶边碳酸盐台地。研究层位肖尔布拉克组的沉积时间约为521~515 Ma,下伏玉尔吐斯组,上覆吾松格尔组,属于下寒武统^[7]。

2 肖尔布拉克组层序地层特征

2.1 层序界面特征

三级层序界面是可以进行全盆对比的不整合面以及相应的整合面,被其限定的沉积单元就是三级层序。其中,Ⅱ型层序界面是以地表暴露及沉积滨线坡折向陆侧发生海岸上超向海迁移为特征,但缺少河流回春侵蚀与岩相向海迁移证据的层序界面^[8]。肖尔布拉克组沉积时期的阿克苏露头区可由台缘区和台内区组成。其中,台缘区的层序界面之上表现为水体明显加深,而台内区则不明显^[7-8]。沉积环境的突变导致层

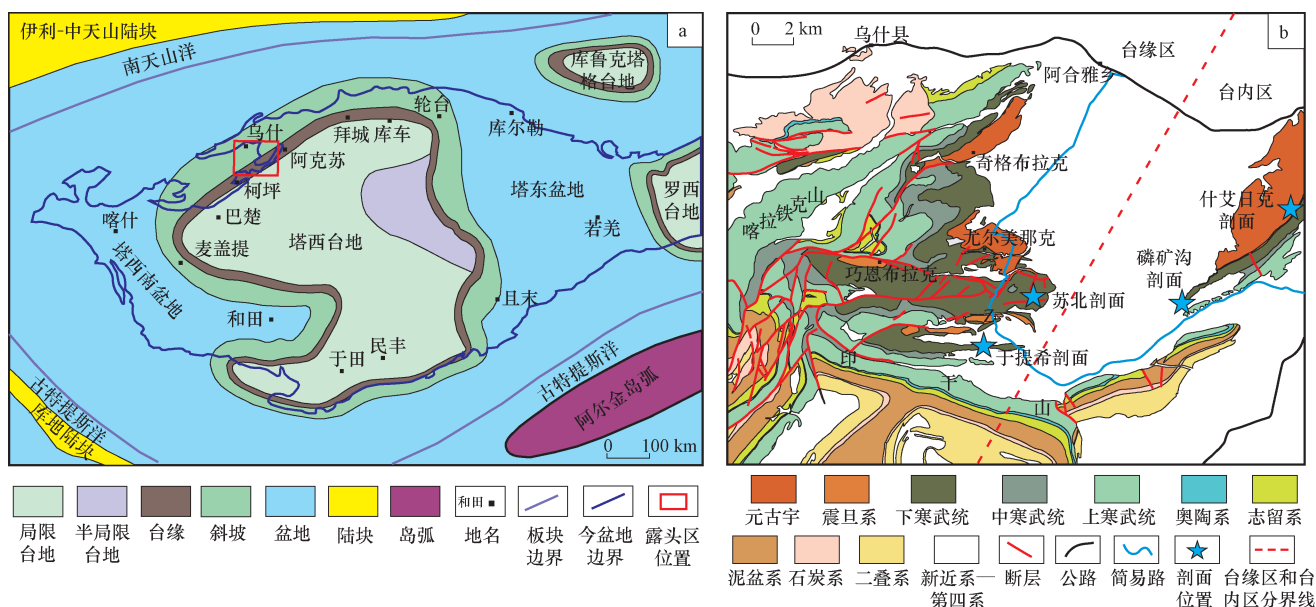


图1 塔里木盆地阿克苏地区早寒武世古地理及剖面位置

Fig. 1 Paleogeography of the Early Cambrian and stratigraphic section location of Aksu area, the Tarim Basin

a. 肖尔布拉克组岩相古地理(据文献[6]修改); b. 阿克苏露头区地质简图及相关剖面位置

序界面上、下部的微生物碳酸盐岩也出现了明显的差异。以台内什艾日克剖面为例,出露的下寒武统中可识别出多个三级层序界面以及三级层序。其中 SB0, SB1, SB2 这 3 个 II 型层序界面将肖尔布拉克组分成了 SQ1 和 SQ2 这 2 个三级层序,并将肖尔布拉克组分为上、下两段。

层序界面 SB0 为下寒武统玉尔吐斯组与肖尔布拉克组的分界。玉尔吐斯组上部为中缓坡相再沉积物,以薄至中层浅灰色细晶白云岩为主。该界面为岩性转换面(图 2a,b),上覆肖尔布拉克组与下伏地层明显不同,其底部为浅灰色薄层状砂屑白云岩,向上以微生物岩为主要特征,具明显的平行、波状纹层结构,平行层面晶洞较为发育,为外缓坡相沉积物。

层序界面 SB1 为肖尔布拉克组内部的一个区域性古喀斯特岩溶面(图 2c),把肖尔布拉克组分为“下黑上白”两段。其中,肖下段为中缓坡相深灰色块状包壳凝块石白云岩,肖上段为内缓坡相浅灰色块状凝块石白云岩。

层序界面 SB2 为肖尔布拉克组顶部的古喀斯特岩溶面,岩性由肖上段内缓坡相灰白色中层状泡沫绵层白云岩转变为吾松格尔组潮坪相浅灰色中层状叠层石白云岩,为一定水深下、弱局限环境的产物(图 2d)。

2.2 体系域及微生物岩性组合特征

下寒武统玉尔吐斯组、肖尔布拉克组以及吾松格尔组构成了一个 II 级层序。其中,肖尔布拉克组处于该 II 级层序的早期高位体系域,发育了 SQ1 和 SQ2 这两个分布较广的 III 级层序^[9]。由于台缘和台内具有较为明显的古地貌差别和沉积差异,导致不同剖面的 III 级层序体系域中的岩性组合呈现出多样性^[9]。笔者选取了 2 条台缘区剖面和 1 条台内区剖面,其体系域及微生物岩组合特征如下。

2.2.1 于提希剖面

于提希剖面位于台缘带,大致位于工区南部(图 1b,图 3a)。层序界面 SB0 为古喀斯特岩溶面(图 3b),是水下地层在短暂暴露于地表后遭受风化剥蚀而成的^[10],下部玉尔吐斯组为外缓坡—中缓坡相紫灰色极薄层状粉屑白云岩夹纹层状白云质泥岩—深灰色极薄层状粉晶白云岩,上部肖尔布拉克组为中缓坡相浅灰色块状具溶孔凝块石粉晶白云岩。层序界面 SB1 为凹凸不平的古喀斯特岩溶面(图 3c),肖下段顶部为中缓坡相中—浅灰色薄层状砂屑泥晶白云岩,发育大量溶蚀孔洞,指示短暂曝露环境,肖上段底部为中缓坡相

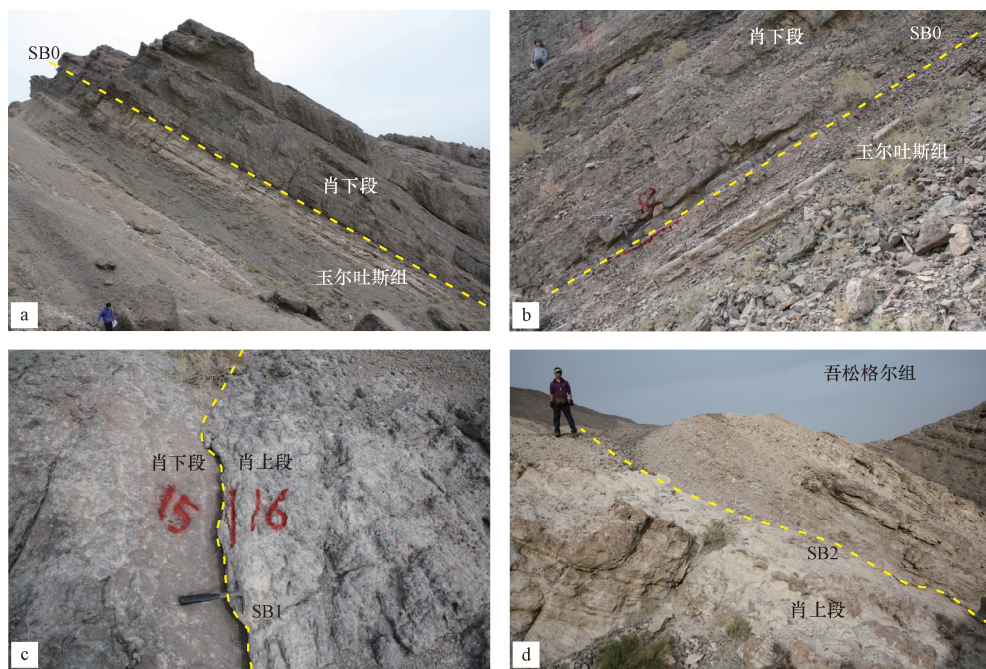


图2 塔西北什艾日克肖尔布拉克组层序界面野外识别图版

Fig. 2 Outcrop sequence boundaries identification of the Xiaerblak Formation in Shiirike section of the NW Tarim Basin

a. 玉尔吐斯组与肖下段层序界面 SB0, 岩性转换面, 玉尔吐斯组顶部为薄层状瘤状白云岩, 肖下段底部为深灰色中—薄层砂(粉)屑白云岩; b. 玉尔吐斯组与肖下段层序界面 SB0, 局部放大, 深灰色中—薄层砂(粉)屑白云岩; c. 肖上段和肖下段层序界面 SB1, 为不平的古喀斯特岩溶面, 下深上浅, 上段底部为浅灰色凝块石白云岩, 下段顶部为中—深灰色包壳凝块石白云岩; d. 层序界面 SB2, 古喀斯特岩溶面, 肖上段顶部为浅灰白色叠层状溶孔泡沫绵层白云岩, 吾松格尔组底部为浅灰色叠层石白云岩

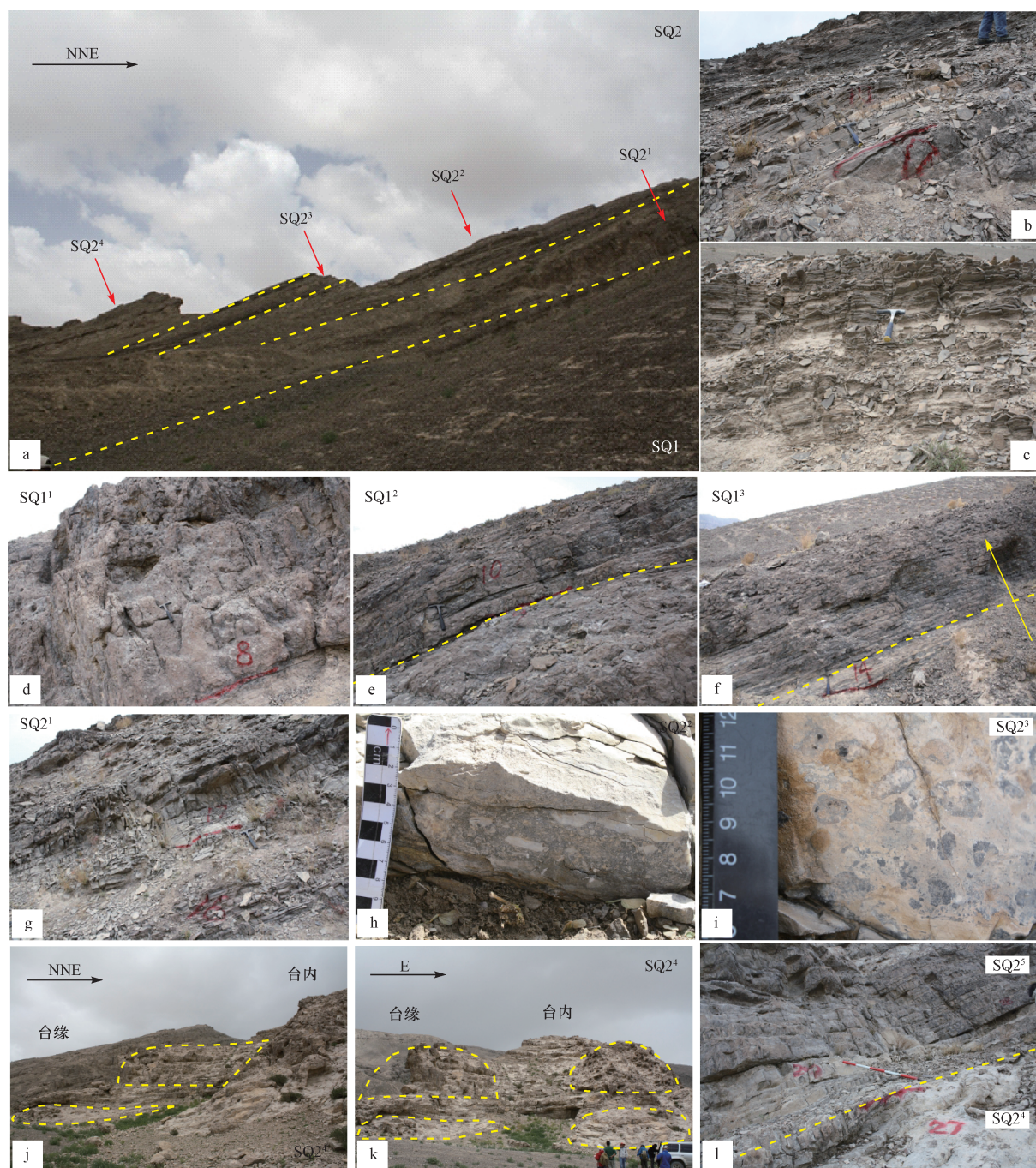


图4 塔西北于提希剖面肖尔布拉克组层序特征图版

Fig. 4 Sequence characteristics of the Xiaerblak Formation in Yutixi section of the NW Tarim Basin

a. SQ2 被海泛面划分为若干个准层序; b. 初始海泛面, 深灰色薄层灰岩; c. 最大海泛面, 由黑灰色极薄层泥灰岩组成的凝缩段; d. SQ1¹, 浅灰色块状砂屑孔洞凝块石白云岩; e. SQ1², 下部为浅灰色块状砂屑孔洞凝块石白云岩, 上部为深灰色薄层状层状孔洞粉晶白云岩; f. SQ1³, 浅灰色薄层状波状条纹白云岩 - 深灰色薄层状层状孔洞粉晶白云岩; g. SQ2¹, 浅灰色薄层状泥晶白云岩; h. SQ2², 风暴砾屑灰岩; i. SQ2³, 浅灰色块状表附菌凝块石粉晶白云岩, 见房室状表附菌; j. SQ2⁴, 纵向上沿缓坡向盆内依次前积的微生物礁, 礁之间以层状微生物岩相隔; k. SQ2⁴, 横向上微生物礁呈 E - W 向并排分布, 之间以层状微生物岩相连; l. SQ2⁵, 微生物滩沉积, 中深灰色含砂屑薄层层纹石

面之上的近源风暴砾屑沉积(图 5f—h), 序列 2 指示风暴浪基面之下的远源风暴浊流沉积(图 5i, j)^[16]。SQ2² 的顶部为一套浅灰色薄层状泥晶灰岩(图 4c), 代表最大海泛面^[15]。由此可见 SQ2¹ 至 SQ2² 是一个水体逐渐加深的过程, 这两个 4 级层序共同构成了海

侵体系域。SQ2³(图 4i, 图 5k)为浅灰色块状房室状表附菌凝块石粉晶灰岩^[17], 微生物的出现指示水体具有变浅的趋势, 对应早期高位体系域。晚期高位体系域对应 SQ2⁴ 和 SQ2⁵, 其中 SQ2⁴ 为微生物礁沉积, 可见两期小型微生物礁组成了弱镶边台缘。纵向上强烈海

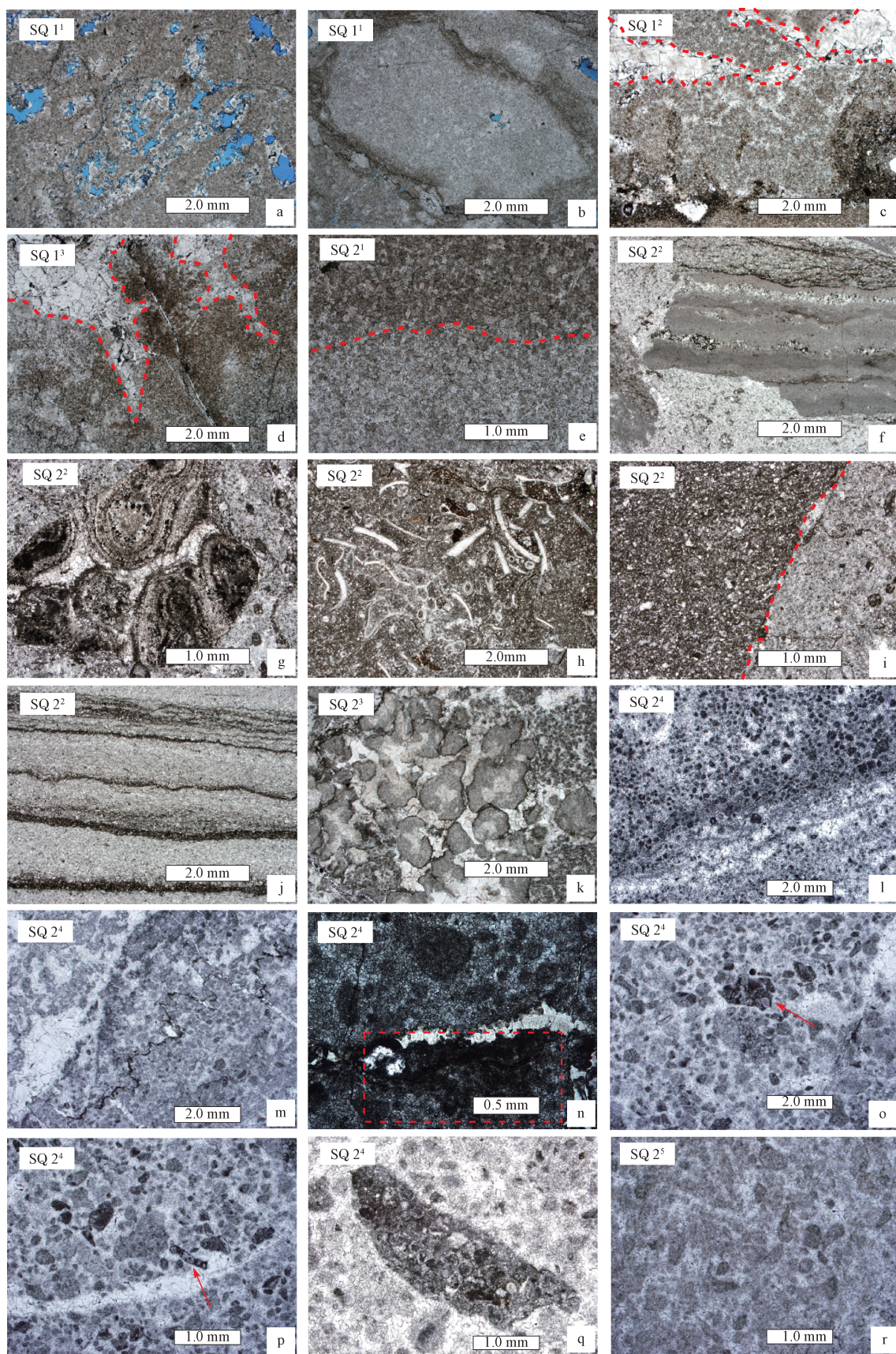
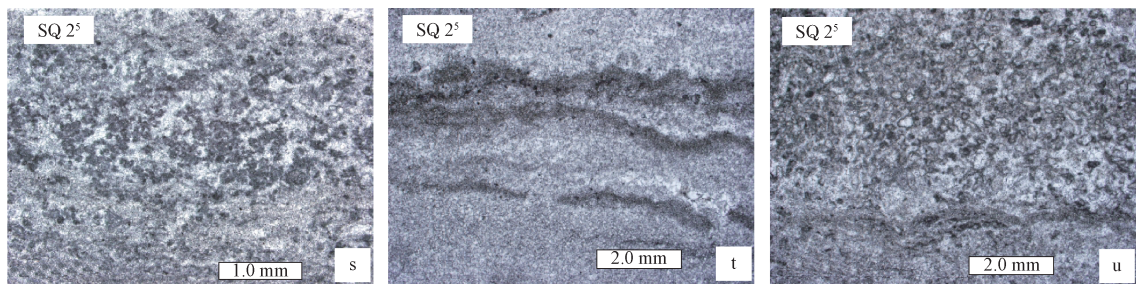


图 5 塔西北于提希剖面肖尔布拉克组微观图版

Fig. 5 Microscopic characteristics of the Xiaerblak Formation in Yutixi section of the NW Tarim Basin



续图5 塔西北于提希剖面肖尔布拉克组微观图版

Fig. 5 (continued) Microscopic characteristics of the Xiaerblak Formation in Yutixi section of the NW Tarim Basin

a, b. SQ1¹, 包壳凝块石由亮晶核心和泥晶包壳组成, 溶孔倾向于发育在包壳凝块内部的亮晶核心处; c. SQ1², 层状孔洞。红色虚线为被充填的层状孔洞; d. SQ1³, 层状孔洞, 红色虚线为被充填的层状孔洞; e. SQ2¹, 泥晶白云岩, 红色虚线指示微剥蚀面; f. SQ2² 风暴序列1, 砾屑泥晶灰岩, 砾屑由泥晶灰岩组成, 边缘呈锯齿状, 之间主要由粉屑-泥晶充填, 呈放射状排列, 基质支撑; g. SQ2² 风暴序列1, 砾屑泥晶灰岩, 砾屑由核形石碎片组成, 具有一定的磨圆度; h. SQ2² 风暴序列1, 生屑泥晶灰岩, 分选不好, 分布杂乱, 之间由粉屑充填; i. SQ2² 风暴序列2, 深灰色极薄层砂屑生屑泥晶灰岩→深灰色极薄层粉屑泥晶灰岩, 红色虚线为冲刷面; j. SQ2² 风暴序列2, 深灰色极薄层粉屑泥晶灰岩, 亮层以粉屑结构为主, 暗层以泥晶结构为主; k. SQ2³, 由房室状表附菌组成的表附菌凝块; l, m. 微生物礁基底, 由定向排列的包壳颗粒粘结成层纹结构; n. 微生物礁顶部, 见不甚清晰的管状葛万菌(?)缠绕成网状; o. SQ2⁴, 微生物礁主体, 由团状-椭圆形肾形菌组成的凝块; p. SQ2⁴, 微生物礁主体, 管孔状肾形菌; q. SQ2⁴, 由复合核形石和单一核形石组成的凝块; r. SQ2⁵, 具包壳结构的砂屑; s. SQ2⁵, 由球粒组成的凝块; t. SQ2⁵, 由泥晶组成的纹层结构; u. SQ2⁵, 由泡沫绵层和包壳结构组成的纹层结构

退背景下的微生物礁群沿缓坡向盆内依次前积, 方向为SSW至NNE, 礁间以层状微生物岩相隔(图4j), 横向上微生物礁呈东西向并排分布, 之间以层状微生物岩相连(图4k)。每个微生物礁的基底为中深灰色薄层状砂屑层纹石白云岩, 具显微纹层结构和包壳结构(图5l, m), 主体为中-浅灰色块状凝块石白云岩, 镜下凝块可由肾形菌及核形石组成(图5o—q)^[18-19], 顶部和底部类似, 为中深灰色薄层状砂屑层纹石白云岩, 见葛万菌^[1,2](图5n); SQ2⁵为微生物台内滩沉积(图4l), 具两种向上变浅的序列, 序列1为浅灰色中层状含砂屑细晶白云岩(图5r) - 浅灰色块状砂屑细晶白云岩(图5s), 多分布在层序下部, 序列2为浅灰色含砂屑粉晶白云岩 - 浅灰色块状砂屑孔洞凝块石白云岩 - 中深灰色含砂屑层纹石(图5t, u), 多发育在层序上部, 指示半局限半开阔环境。

2.2.2 苏北剖面

苏北剖面位于苏盖特布拉克地区的北部(图1b), 位于台缘带。该剖面与于提希剖面相比, 具有类似的层序界面特征(图6a—d), 同时SQ1的发育情况也较为类似。SQ2则有较大区别, 其中SQ2¹对应自北向南展布的大型微生物礁, 由4个依次向盆地内部前积的亚期礁体组成(图6b), 自下而上水体逐渐变浅, 呈现出“颗粒滩—原地生长的附枝菌礁—凝块石—叠层石”的演化规律^[13]。这种进积型礁与SQ2¹的海侵背景相悖, 这是因为在海平面整体上升的背景下, 台缘区的微生物开始充分生长、造岩、建礁, 然而由于微生物

的自身建造速度过高, 大于海平面的上升速度, 导致台缘区的可容纳空间不足以容纳微生物礁的继续生长, 最终导致了微生物礁的进积发育, 这也从侧面说明在该时期苏北地区的古地貌位置是高于于提希地区的。因为SQ2¹发育时期位于斜坡处的于提希剖面受氧气匮乏、光照不足的影响, 加之水动力较强导致水体浑浊, 虽然有可容纳空间的产生, 仍然无法建礁成隆^[2], 仅仅随着海平面的上升而表现出微弱的上超特征。代表海侵体系域的SQ2²和代表早期高位体系域的SQ2³在苏北剖面缺失, 同样是受限于可容纳空间的缘故。晚期高位体系域包括SQ2⁴和SQ2⁵, 其中SQ2⁴下部发育一套上超于SQ2¹之上的海侵沉积, 之上为进积小型点礁群(图6e, f), 可与于提希剖面对应^[13,20]。SQ2⁵为一套泡沫绵层—叠层石白云岩(图6d), 指示较为开阔的滩相—潮坪沉积环境^[12-14]。

2.2.3 磷矿沟剖面

磷矿沟剖面位于台内带(图1b, 图7a, 图7b)。SB0为古风化壳(图7c), 是由海平面下降导致地层暴露, 经长期风化剥蚀之后又被重新埋藏的地质体^[21]。古风化壳约5 cm, 可分为3层: 下部为未被改造完全的碳酸盐岩残块, 中部为黄褐色残余土壤层, 上部见残余铁质层。该界面下部为玉尔吐斯组中缓坡相灰绿色薄层状粉屑泥晶白云岩, 上部为肖尔布拉克组中缓坡相浅灰色中-薄层状砂屑中晶白云岩。SB1对应一套不甚典型的疏松黏土层(图7d), 局部可见铁质、磷质结核, 是由海平面下降导致的前期暴露剥蚀

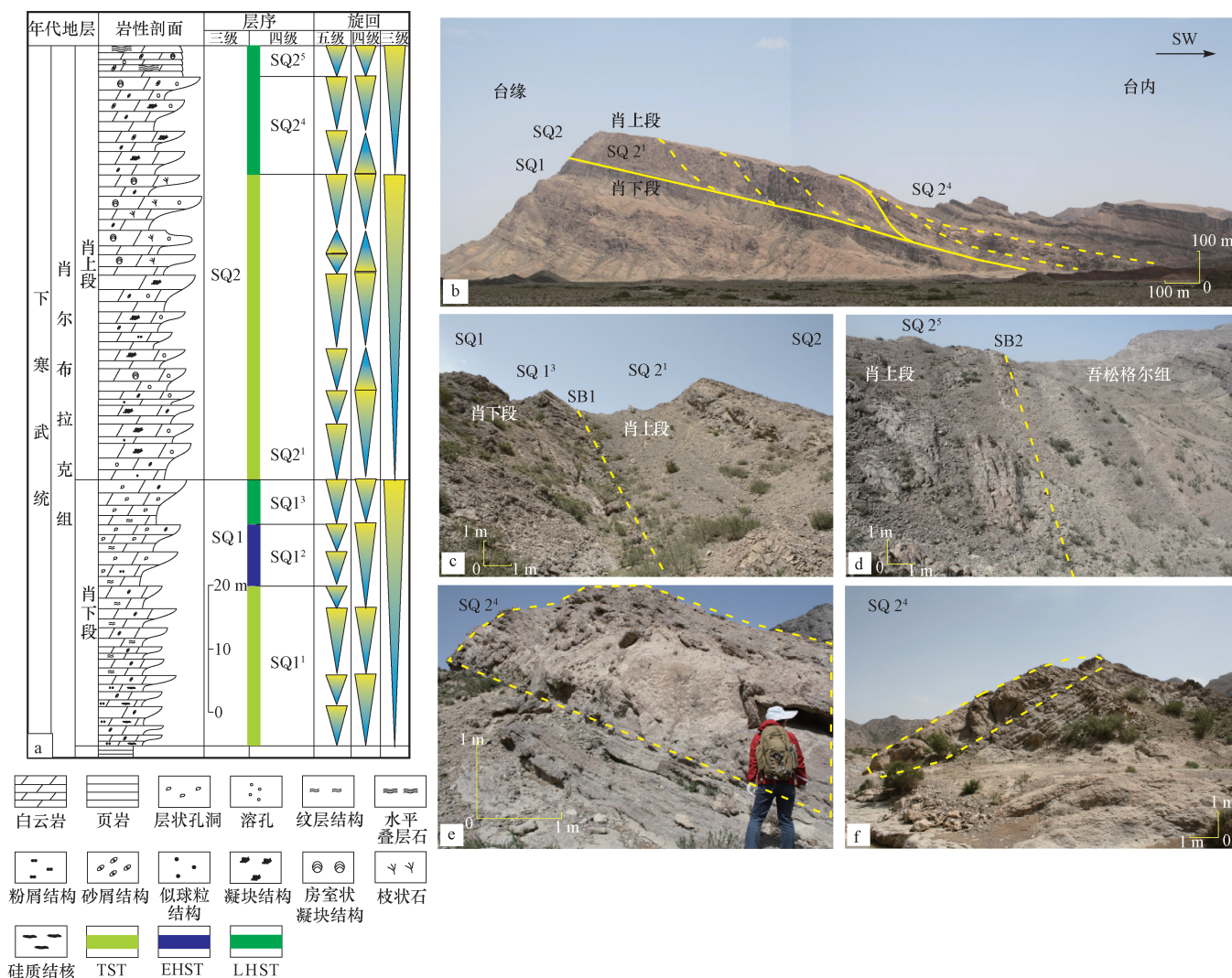


图6 塔西北苏北剖面肖尔布拉克组层序界面野外识别图版

Fig. 6 Outcrop sequence boundaries identification of the Xiaerblak Formation in Subei section of the NW Tarim Basin

a. 苏北剖面肖尔布拉克组岩性示意图(据文献[12],有修改);b. 苏盖特布拉克地区北部剖面,可见SQ2¹为发育于海退背景的大型微生物礁,具有4个期次;SQ2²和SQ2³缺失,SQ2⁴为发育在海侵背景之下的小型微生物礁;c. SQ1和SQ2的分界,SB1为古喀斯特岩溶面,将肖尔布拉克组分为上、下两段;d. SQ2⁵,中-薄层凝块石,层序SQ1和层序SQ2的分界SB2为古喀斯特岩溶面;e. SQ2⁴,丘状微生物礁;f. SQ2⁴,层状微生物礁

和后期淡水淋滤溶解等地质作用共同形成的^[9,11]。该界面之下为肖下段中缓坡相深灰色块状砂屑粉晶白云岩,之上为肖上段台内滩相下部中灰色块状砂屑凝块石。SB2附近由于地层塌陷而导致界面不易识别。根据前人的研究成果可知SB2为一古喀斯特岩溶面,可发育溶蚀凹坑、皮壳和干裂构造^[9],其下部为肖上段台内滩相上部灰白色中层状中晶叠层石白云岩。

磷矿沟剖面的暗色海侵层不发育。其中SQ1与台缘区类似。SQ2中,SQ2¹为台内滩相(图7c,d),岩性组合为中灰色薄层状包壳凝块石白云岩-中灰色薄层状砂屑凝块石白云岩(图8a),指示水动力逐渐增强,水体逐渐加深,对应海侵体系域。由于台缘

礁的阻挡作用,导致剖面处缺失SQ2²的海侵体系域风暴沉积以及SQ2³的早期高位体系域表附菌微生物建造。

SQ2⁴为晚期高位体系域的产物,以层纹石建造为主。虽然海平面整体处于较高的水平,然而由于台内地势较高导致相对水体深度较浅。SQ2⁴主要发育无扰动(下部)和扰动(上部)这两种层纹石序列,自下而上具有水体略微变浅的特征。

无扰动序列主要发育在SQ2⁴的下部(图7e,f),可分为a层和b层。其中a层为平行纹层状微生物席组合,边界鲜明,保存完整。单层席间距约0.2~0.5 cm,叠加厚度可达5~10 cm。b层砂屑含量较多,具普通沉积物特征,发育交错层理和平行层理。镜下a层

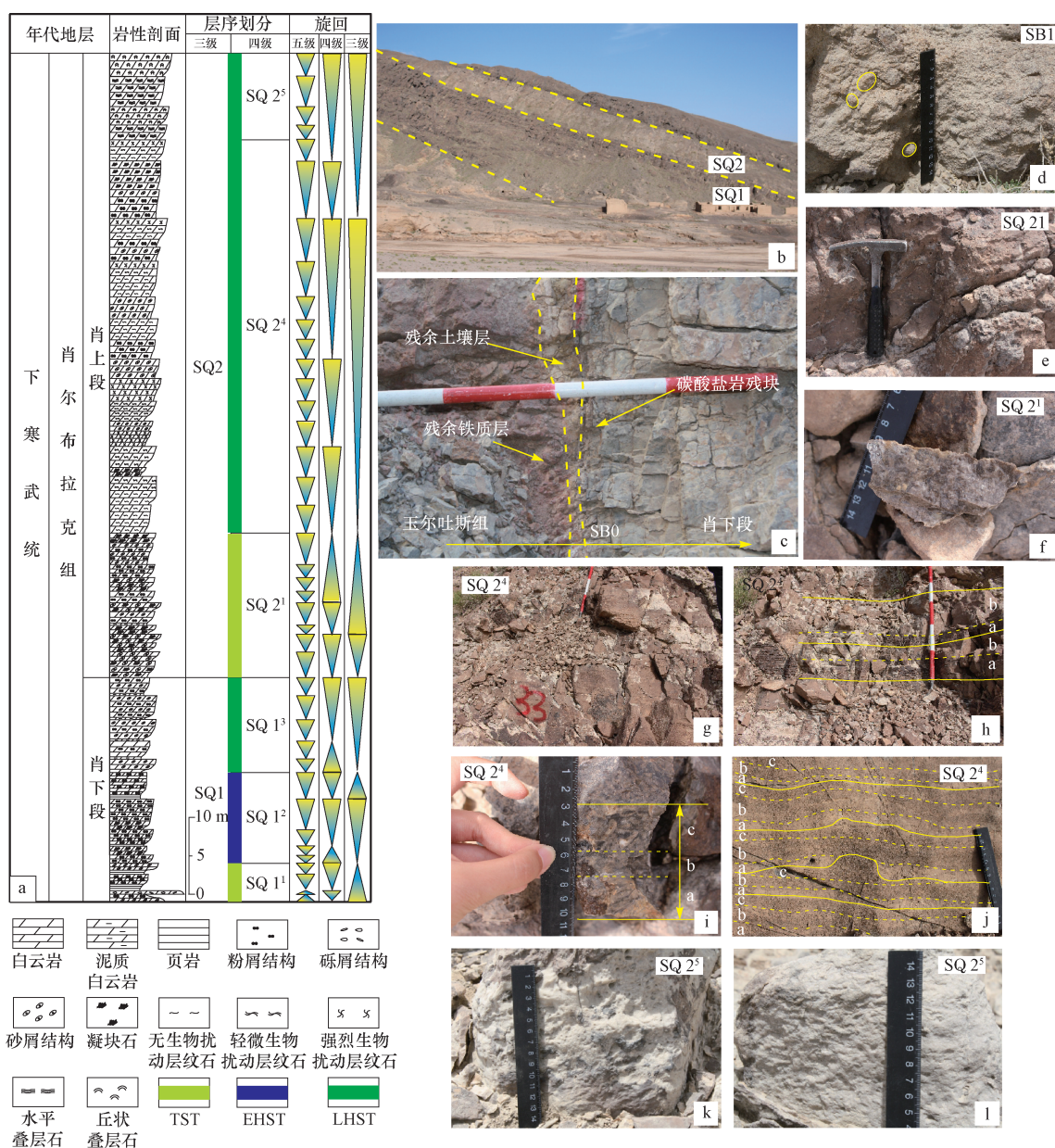


图7 塔西北磷矿沟剖面肖尔布拉克组层序特征图版

Fig. 7 Sequence characteristics of the Xiaerblak Formation in Linkuanggou section of the NW Tarim Basin

- a. 磷矿沟剖面肖尔布拉克组综合柱状图; b. 肖尔布拉克组可被分为 SQ1 和 SQ2 这两个层序; c. 层序界面 SB0, 古风化壳的三层结构, 虚线为层界; d. 指示层序界面 SB1 的渣状层, 黄色圆圈为铁质/磷质结核; e. SQ2¹, 薄层状砂屑凝块石; f. SQ2¹, 薄层状包壳凝块石, 黑色凝块被灰色包壳包覆; g. SQ2⁴ 光面, a 层为由微生物席组成的正常沉积层纹石, b 层为发育平行微生物席层面或与层面呈小角度的虫迹, c 层多发育垂直层面的虫迹; h. SQ2⁴ 剖面; i. SQ2⁴, 多为正常沉积物, 无扰动构造; j. SQ2⁴, a 层为平行纹层状微生物席组合, b 层微生物席发育不甚明显, 可发育交错层理和平行层理; k. SQ2⁵, 泡沫绵层叠层石; l. SQ2⁵, 波状-水平状叠层石

纹层较平直, 主要由暗色菌纹层集中组成, 与 b 层残余砂屑白云岩之间存在着一个弱侵蚀面 (图 8b)。

扰动序列主要发育在 SQ2⁴ 的上部 (图 7g, h), 可分为 3 个部分。其中, a 层由微生物席组成的沉积层纹石, 露头可见平行于底型、间距为 1~2 mm 的密集纹层; b 层发育基本平行于席面的虫迹, 多为管状或穴状, 一般宽约 2~3 mm, 长约 3~5 mm, 边缘轮廓明显, 自下而上由清晰单一状到杂乱叠置状, 但并未对原始

沉积纹层造成较大的破坏, 这是由于寒武纪早期虫迹多位于沉积界面附近, 沉积物具一定韧性, 可以依附于底形而改变形状, 但尚不能被低强度生物扰动完全破坏^[22-24]; c 层发育近乎垂直于席面的“个”字型虫迹, 宽约 2~3 mm, 长约 5~7 mm。扰动序列和典型元古代型软底底质 (发育完好的微生物席, 生物具有水平方向弱扰动, 上、下层沉积物平滑、固结) 具有明显的区别, 然而也显著区别于的典型显生宙型软底底质 (强烈

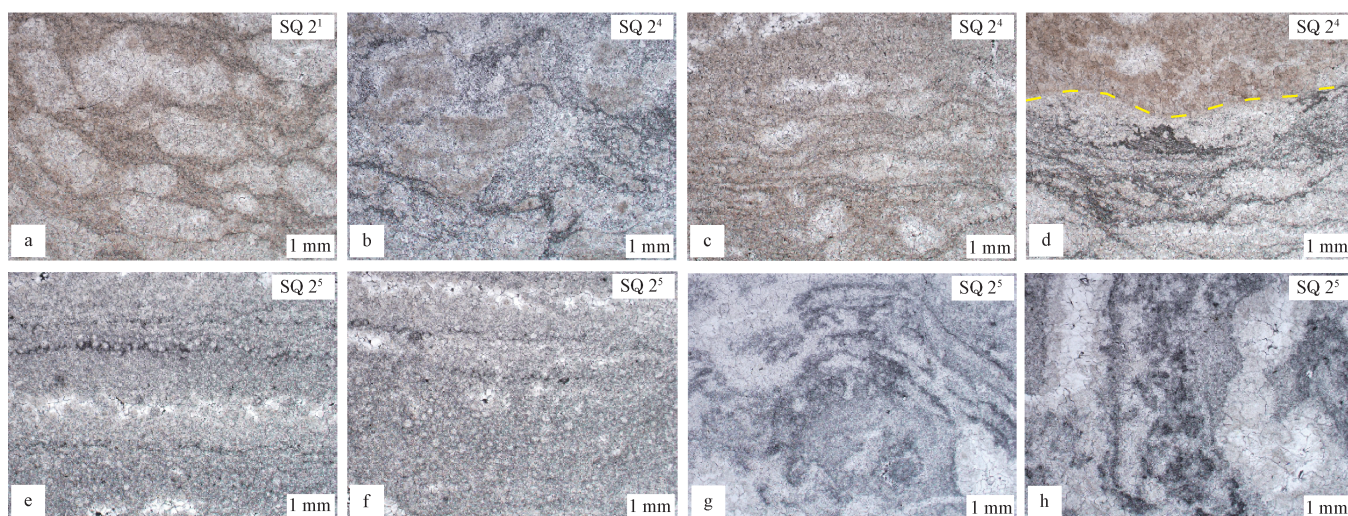


图8 塔西北磷矿沟剖面肖尔布拉克组微观图版

Fig. 8 Microscopic characteristics of the Xiaerblak Formation in Linkuangou section of the NW Tarim Basin

a. SQ2¹, 包壳凝块石, 具暗色泥晶包壳和亮晶核心; b. SQ2⁴, 黄色虚线为微剥蚀面, 之下为无扰动层纹石, 之上为正常沉积物; c. SQ2⁴, 扰动层纹石, 层面模糊; d. SQ2⁴, 扰动层纹石, 层面不平整; e, f. SQ2⁵, 泡沫棉层叠层白云岩; g. SQ2⁵, 波状叠层石; h. SQ2⁵, 水平状叠层石

水平和垂向扰动, 缺失微生物席底), 这种虫迹和生物席共生的现象为典型的新元古代—显生代过渡期底质^[24]。偏光显微镜下可见具纹层结构的微生物席由暗色和亮色显微纹层组成, 扰动强烈的纹层中, 暗层可将亮层包裹呈弱凝块状(图8c)。暗色纹层普遍呈起伏状(图8d), 分布在暗层之间的亮层可由微亮晶白云石组成, 或为显微似层状孔洞构造(图5d), 其中前者亮层呈渐变接触, 可能是由菌藻类粘结碳酸钙颗粒并聚集而成, 而后者亮层呈突变接触状, 可能源于微生物席的直接降解或由其腐烂产生的有机酸溶解而成^[14, 25]。

SQ2⁵ 同样为晚期高位体系域(图7i, j), 与 SQ2⁴ 相比位置较浅, 主要为潮坪沉积。SQ2⁵ 主要由泡沫绵层叠层石、波状—水平状叠层石构成。露头上泡沫绵层叠层石多具针状溶孔, 叠层结构侧向连续性不好, 而波状—水平状叠层石具明显的叠层结构。镜下泡沫绵层叠层石由泡沫状蓝细菌组成格架^[26-27], 单个“泡沫”呈圆状, 直径约为 0.1~0.2 mm, 由薄层暗色泥晶组成边缘, 透明粉晶组成体腔, 它们彼此相连叠置成叠层构造(图8e, f)。波状—水平状叠层石呈微波状, 亮暗相间的纹层连续性较好。亮层为微亮晶白云石组成, 暗层可能为葛万菌纹层, 包含模糊不清的团块状蓝细菌等相关物质(图8g, h)。

3 层序地层对比特征

在对阿克苏露头区单个剖面剖析的基础上, 将剖

面自南西—北东进行对比, 揭示层序地层内部微生物岩的分布特征, 建立该地区碳酸盐台地的沉积模式。

剖面对比结果显示(图9): ①北部磷矿沟剖面 and 苏北剖面的玉尔吐斯组和肖下段沉积厚度较小; ②于提希剖面玉尔吐斯组下部的黑色泥岩与硅质岩互层段, 至苏北剖面消失, 这是由于磷矿沟剖面 and 苏北剖面位于古岩溶高地, 而于提希剖面位于古岩溶斜坡的缘故。在这种古地理背景下, 肖下段发育了一套层状微生物席, 组成了 SQ1。海侵期为微生物席的初始建造阶段, 较多的砂屑含量使得层状构造不甚明显, 仅在凝块的周围发育包壳, 可看作是球状微生物席^[28-29]。高位期为微生物席的繁盛发展阶段, 微生物席在生长过程中局部腐烂, 形成了层状孔洞^[14]。之后进入微生物席的衰败阶段, 整体缺乏微生物席存在的直接证据。

SQ2 对应肖上段, 在台缘和台内具有较大区别。海侵期, 古岩溶斜坡底部的薄层含砂屑泥晶白云岩为初始海侵的产物, 之上发育一套砂屑含量较高的包壳凝块石层。之后古岩溶高地处发育一向盆地内部进积生长的大型微生物礁, 古斜坡处则以风暴沉积为主, 顶部发育最大海泛面, 这也从侧面说明微生物岩的建造和由海侵引起的可容纳空间增大有关, 然而古高地的可容纳空间增长有限导致了大型微生物礁的进积生长。高位期早期, 斜坡发育了由房室状表附菌组成微生物层, 高地则由于微生物礁的影响而缺失沉积物。高位期晚期, 于提希剖面 and 苏北剖面开始发育一套海退微生物点礁群, 其中前者后期发育礁前斜坡高能微生物滩沉积, 以砂屑, 凝块石和层纹石沉积为主, 后者

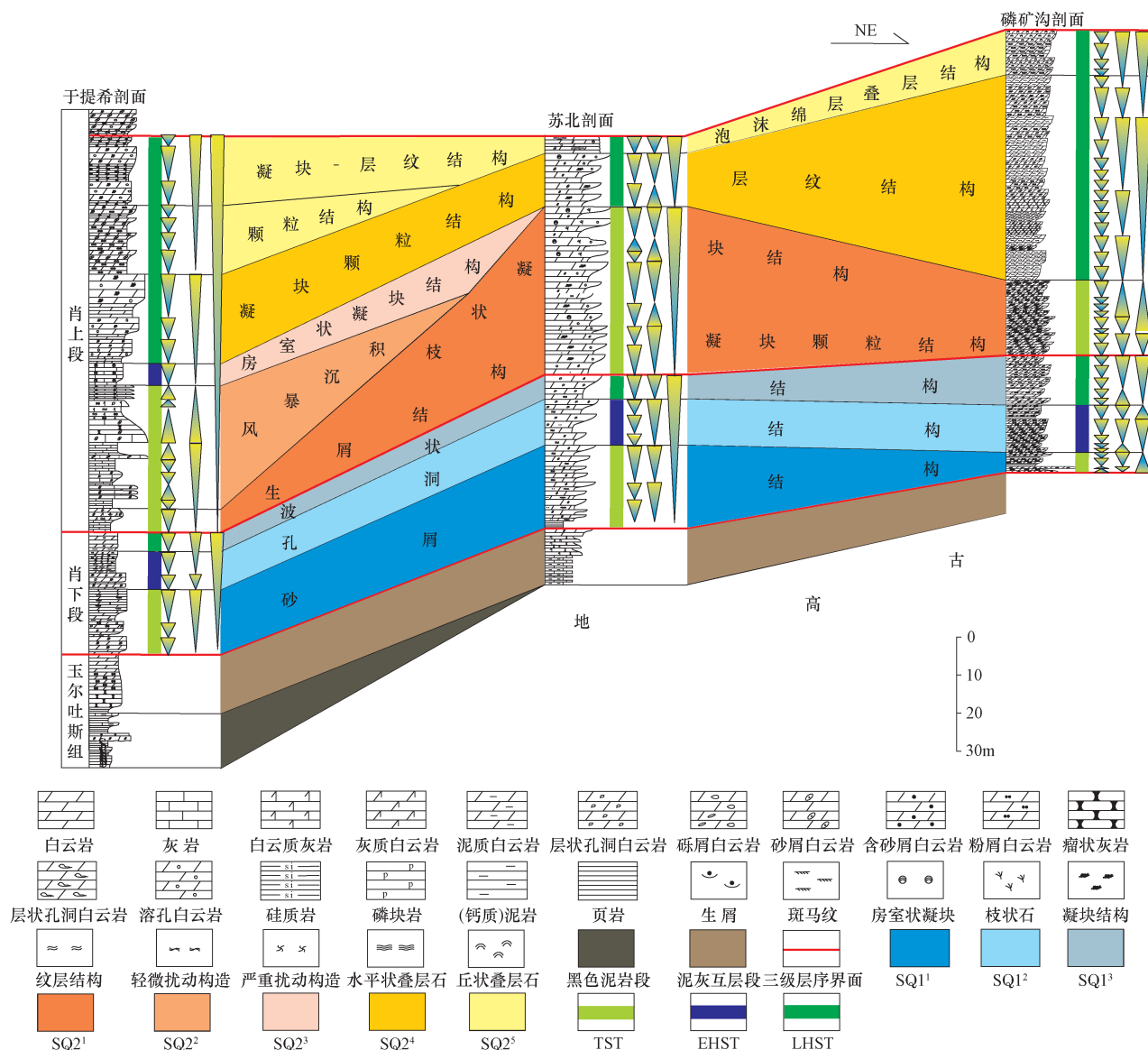


图9 塔西北台缘-台内剖面对比与微生物碳酸盐岩建造模式

Fig. 9 Comparison of sections and microbial carbonate buildup models between margin and inner-platform in the NW Tarim Basin

后期主要发育滩相-潮坪相泡沫绵层-叠层石白云岩;而磷矿沟剖面依次发育具有无扰动-扰动构造的层纹石层组成的台内滩,之上为低能潮坪沉积,主要由泡沫绵层叠层石构成,顶部发育少量波状-水平状叠层石。

4 碳酸盐台地沉积演化模式

塔里木阿克苏露头区下寒武统肖尔布拉克组经历了两种不同的碳酸盐台地结构形式的演变,可分为3个阶段:碳酸盐缓坡型台地发育时期、碳酸盐缓坡型台地向弱镶边台地的转变期和碳酸盐弱镶边台地发育时期。其中肖下段对应层序SQ1,为中-内缓坡沉积环境,处于碳酸盐缓坡型台地发育时期。缓坡型台地的

台缘坡折带不发育,表现为一个区域性的宽缓斜坡,因此古高地和古斜坡具类似的层序地层特征,并且海平面的升降变化是地层发育情况的主要控制因素。肖上段对应层序SQ2,其中海侵体系域代表的是缓坡型台地向弱镶边台地的转变期。古斜坡区发育初始洪泛面,以风暴沉积为主,微生物岩基本不发育,具有缓坡型台地的沉积特征。而古高地区台地斜坡明显增大,发育大型进积微生物礁,主要通过丛状表附菌的自身骨架生长和微生物粘结方式成隆。高位体系域代表的是弱镶边台地发育时期,台缘和台内相分异明显,具有较大的区别:台缘区在早期以房室状表附菌层建造为主,晚期以小型进积微生物礁群和高能微生物滩为主,主要以微生物粘结成礁;台内区为低能微生物滩建造,缺乏早期沉积物,晚期以层纹石建造至浅水泡沫绵层

石和叠层石为主,其形成与粘性微生物席有关。

5 结论

1) 根据露头 and 薄片资料,在塔里木盆地阿克苏露头区下寒武统肖尔布拉克组中识别出2个三级层序,8个四级层序。

2) 肖尔布拉克组下段,层序SQ1整体为一套波状微生物席,处于中-内缓坡沉积环境,对应碳酸盐缓坡型台地发育时期。

3) 肖尔布拉克组上段,层序SQ2的海侵期为缓坡型台地向弱镶边台地的转变期,斜坡以风暴沉积为主,微生物岩不发育,高地以大型退积微生物礁建隆为主。层序SQ2的高位期为弱镶边台地发育时期,台缘和台内相分异明显。其中早期台缘区以房室状表附菌层建造为主,晚期台缘区发育小型退积微生物礁群和高能微生物滩。台内区缺乏早期沉积物,晚期发育低能微生物滩,下部以层纹石建造为主,上部渐变为泡沫绵层叠层石和波状-水平状叠层石。

致谢:野外地质考察工作由中国石油勘探开发研究院塔里木分院的曹颖辉副主任、周波和杜德道等同志的协助完成,薄片鉴定工作中得到了杨式升高级工程师的指导以及实验中心罗忠主任、崔京钢、张响响等老师的帮助,论文撰写得到了邓宏文教授、王红亮副教授以及高志前教授的点评和修改,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Riding R. Classification of microbial carbonates[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [2] Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214.
- [3] 罗平,王石,李朋威,等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 807-823.
Luo Ping, Wang Shi, Li Pengwei, et al. Review and perspectives of microbial carbonate reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 807-823.
- [4] 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(1): 19-27.
Gao Zhiqian, Fan Tailiang, 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(1): 19-27.
- [5] 王招明,谢会文,陈永权,等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(2): 1-13.
Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt Dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(2): 1-13.
- [6] 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 Runbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(6): 937-948.
- [7] 宋金民,罗平,杨式升,等. 塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 404-413.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 404-413.
- [8] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 535-541.
Jiang Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 535-541.
- [9] 杨永剑. 塔里木盆地寒武系层序岩相古地理及生储盖特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Yang Yongjian. The research on lithofacies paleogeography of sequence and characteristics of source-reservoir-cap assemblage of Cambrian in Tarim Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [10] 田景春,时国,陈辉,等. 南华北地区奥陶系古喀斯特特征及其储层前景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(6): 598-604.
Tian Jingchun, Shi Guo, Chen Hui, et al. Palaeokarst characteristics and reservoir prospects of Ordovician in the south of North China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(6): 598-604.
- [11] 刘家铎,田景春,张翔,等. 塔里木盆地寒武系层序界面特征及其油气地质意义[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(4): 1-6.
Liu Jiaduo, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Characteristics and petroleum geologic significances of the sequence boundary surface of Cambrian strata in Tarim Basin[J]. *Mineral Petrol*, 2009, 29(4): 1-6.
- [12] 宋金民,罗平,杨式升,等. 塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 404-413.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 404-413.
- [13] 宋金民,罗平,杨式升,等. 苏盖特布拉克地区下寒武统微生物礁演化特征[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(6): 668-671.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Evolution characteristics of microbial reef of Lower Cambrian in Sugaitelak Area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 668-671.
- [14] 宋金民,罗平,杨式升,等. 塔里木盆地苏盖特布拉克地区下寒武统肖尔布拉克组碳酸盐岩微生物建造特征[J]. *古地理学报*, 2012, 14(3): 342-354.
Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Carbonate rock microbi-

- al construction of the Lower Cambrian Xiaerblak Formation in Sugaitblak area, Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14 (3): 342–354.
- [15] Sarg J F. Carbonate sequence stratigraphy [C]//Wilgus C, Hastings B, Kendall C, et al. Sea level changes—An integrated Approach. Tulsa: SEPM Special Publication, 1998: 155–181.
- [16] 宋金民, 罗平, 刘树根. 塔里木盆地苏盖特布拉克地区下寒武统风暴岩及其地质意义[J]. *地质前缘*, 2014, 21(6): 346–355.
Song Jin Min, Luo Ping, Liu Shugen. Lower Cambrian tempestites and their geological significances in Sugaitblak area, Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 346–355.
- [17] 韩作振, 陈吉涛, 张晓蕾. 鲁西寒武系第三统张夏组附枝菌与附枝菌微生物灰岩特征岩[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1097–1103.
Han Zuozhen, Chen Jitao, Zhang Xiaolei. Characteristics of Epiphyton and Epiphytonmicrobialites in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1097–1103.
- [18] Pratt B R. Epiphyton and renalcis – diagenetic microfossils from calcification of coccoid blue-green algae [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 54 (3): 948–971.
- [19] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 核形石研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 465–474.
Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, et al. Status and prospect of studies on oncoid [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5): 465–474.
- [20] 王凯, 关平, 邓世彪, 等. 塔里木盆地寒武统微生物礁储集性研究及油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(2): 386–396.
Wang Kai, Guan Ping, Deng Shibiao, et al. Reservoirs of the Lower Cambrian Microbial Reefs and Its Significance on Petroleum Exploration, Tarim Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(2): 386–396.
- [21] 贾振远, 蔡忠贤. 碳酸盐岩古风化壳储集层(体)研究[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4): 94–104.
Jia Zhenyuan, Cai Zhongxian. Carbonate paleo-weathered crust reservoirs (body) [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 94–104.
- [22] 梅冥相. 微生物席沉积学: 一个年轻的沉积学分支[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 586–597.
Mei Mingxiang. Microbial-mat Sedimentology: A Young Branch from Sedimentology [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 586–597.
- [23] 梅冥相. 微生物席的特征和属性: 微生物席沉积学的理论基础[J]. *地球科学进展*, 2014, 16(3): 285–304.
Mei Mingxiang. Feature and nature of microbial-mat; Theoretical basis of microbial-mat sedimentology [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 285–304.
- [24] 齐永安, 王敏, 李姐, 等. 寒武纪地质革命: 从微生物席底到生物扰动混合底[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(2): 159–164.
Qi Yongan, Wang Min, Li Da, et al. Cambrian substrate revolution: from matgrounds to bioturbated mixgrounds [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, 31(2): 159–164.
- [25] 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 1–9.
Mei Mingxiang. Discussion on Advances of Microbial Carbonates from the Terminological Change of Thrombolites [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 1–9.
- [26] 李朋威, 罗平, 陈敏, 等. 塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩储层特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 416–428.
Li Pengwei, Luo Ping, Chen Min, et al. Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 416–428.
- [27] 李朋威, 罗平, 宋金民, 等. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素——以塔里木盆地西北缘上震旦统—下寒武统为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1074–1089.
Li Pengwei, Luo Ping, Song Jinmin, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: a case study of Upper Sinian-Lower Cambrian in the northwestern margin of Tarim Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(9): 1074–1089.
- [28] 梅冥相. 微生物席沉积学: 一个年轻的沉积学分支[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 586–597.
Mei Mingxiang. Microbial-mat Sedimentology: A Young Branch from Sedimentology [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 586–597.
- [29] 梅冥相. 微生物席的特征和属性: 微生物席沉积学的理论基础[J]. *地球科学进展*, 2014, 16(3): 285–304.
Mei Mingxiang. Feature and nature of microbial-mat; Theoretical basis of microbial-mat sedimentology [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 285–304.

(编辑 张玉银)