

塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组构造-岩相古地理特征

胡明毅^{1,2,3}, 孙春燕^{1,2,3}, 高达^{1,2,3}

(1. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100;
3. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:为了查明塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组构造-沉积响应特征与演化规律,为该区深层油气勘探寻找新的接替区,以海相碳酸盐岩层序地层学和储层沉积学理论体系为指导,在岩心、薄片、测录井以及地震等资料的基础上,结合构造古地貌特征,明确下寒武统肖尔布拉克组主要发育局限-半蒸发台地、开阔台地、台地边缘与斜坡-盆地相,又可划分为多个亚相和微相,沉积相的分布具有典型的分带性和继承性。基于横跨盆地的二维地震测线精细解释,确定了塔里木盆地寒武系主要沉积相类型的地震响应特征,识别出了6种地震相(Seismic Facies)类型,分别为台内(丘)滩(SF1)、台内洼地(SF2)、丘(滩)间海(SF3)、膏盐湖(SF4)、台地边缘(SF5)和斜坡-盆地(SF6),进而圈定了各相带的平面沉积相边界,揭示了各相带发育分布与古构造和古地貌的联系。根据肖尔布拉克组厚度分布,明确了盆地南部存在东西走向的古隆起区,东部和中部存在两个洼陷区;盆地西南部存在一级阶地,以宽缓的一级坡折向中部低洼区过渡;盆地中部存在窄陡的二级坡折,向东快速过渡为深洼区。再结合地震解释成果、野外露头、取心井观察和室内镜下岩石薄片鉴定等资料,编制下寒武统肖尔布拉克组岩相古地理图,为塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组深层碳酸盐岩油气勘探提供了有利证据。

关键词:构造-岩相古地理;地震相;台内洼地;台内(丘)滩;肖尔布拉克组;下寒武统;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography in the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

Hu Mingyi^{1,2,3}, Sun Chunyan^{1,2,3}, Gao Da^{1,2,3}

(1. Research Center of Sedimentary Basins, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The study aims to discover new prospective areas for deep oil and gas exploration based on the understanding of tectonic and sedimentary response characteristics and evolution patterns of the Xiaerbulake Formation in Tarim Basin. Under the guidance of marine carbonate rock sequence stratigraphy and reservoir sedimentology, it's made certain that the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation mainly develops restricted-semi-evaporitic platform, open platform, platform margin, slope-basin facies according to core, logging and seismic data and thin section observation, combined with the features of tectonic paleo-geomorphology. These sedimentary facies can in turn be subdivided into multiple subfacies and microfacies, and their distribution is characteristic of zonation and inheritance. The fine interpretation of the two-dimensional seismic lines across the basin helps to identify the features of seismic responses of the main Cambrian sedimentary facies in Tarim Basin, and recognize six types of seismic facies, namely the intra-platform microbial mound/shoal (SF1), intra-platform low (SF2), inter-mound/bank sea (SF3), gypsum-salt lake (SF4), platform margin (SF5) and slope-basin (SF6). Then the boundary of sedimentary facies for each facies zone was delineated and the relation of facies zones distribution with paleostructure and paleogeomorphology was revealed. According to the isopach map of the Xiaerbulake

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-10-10。

第一作者简介:胡明毅(1965—),男,教授、博士研究生导师,沉积学与层序地层学。E-mail:humingyi65@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41772103, 41372126);国家科技重大专项(2016ZX05007-002);湖北省创新群体基金项目(2015CFA024)。

Formation, it's made clear that there is an EW-trending paleo-uplift in the southern basin, and two depressions in the eastern and central basin. The First Terrace lies in the southwestern basin, which transits from the wide and gentle Level 1 slope-break towards the central depression, while the narrow and steep Level 2 slope-break in the central basin rapidly transfers to a deep depression towards the east. In addition, the seismic interpretation results, analysis of outcrop, observation of cores as well as microscopic observation of thin sections were used to generate the lithofacies paleogeographic map of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation, providing favorable evidences for the exploration of deep carbonate oil and gas in the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation of Tarim Basin.

Key words: tectonic-lithofacies paleogeography, seismic facies, intra-platform low, intra-platform mound/shoal, Xiaoerbulake Formation, Lower Cambrian, Tarim Basin

近年来,随着塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩认识程度的提高^[1],其中中深1井在下寒武统6 597.63~6 785.00 m井段,获日产气30 281 m³;随后侧钻中深1C井,下寒武统6 861~6 944 m井段,获日产气158 545 m³;在该区寒武系盐下白云岩油气勘探取得战略性突破^[2]。因而,肖尔布拉克组作为寒武系盐下白云岩发育的主要层位,成为塔里木盆地有利的勘探重点层系。在塔里木盆地寒武统地层研究中,陈永权等^[3]和杜金虎等^[4]均认为塔里木盆地早寒武世塔北-柯坪地区发育缓坡型台缘,中部台内滩呈大面积连片分布,南部发育斜坡-盆地相沉积。沈安江等^[5]认为塔里木盆地早下寒武统整体为缓坡-弱镶边型台缘,台地内部主要由混积潮坪、膏云坪、台内丘滩和台内洼地构成,各相带分布区域与前人差异较大。前人的研究工作大多针对肖尔布拉克组白云岩储集层方面的研究^[6-7],针对塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组岩相古地理分布和演化研究还缺乏统一的认识。

本文以塔里木盆地地震、露头、岩心、薄片和测井等资料的分析为基础,结合沉积相标志,对典型单井和野外露头剖面进行沉积相划分。根据地震相识别和钻井标定,精细刻画台缘滩、台内滩、台内丘、滩间海和膏盐湖等主要亚相的地震相特征,通过追踪不同地震相在测线上的分布,结合台内同沉积断层对台内丘滩体的控制等因素,明确其分布范围。结合构造古地貌和地层厚度特征,明确古陆和台内洼陷的发育范围,从而编制下寒武统肖尔布拉克组岩相古地理图,进而掌握该区肖尔布拉克组台缘滩和台内丘滩储层的分布规律,以期对塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组油气勘探提供较好的地质依据。

1 地质概况

塔里木盆地是一个由古生代克拉通盆地和新生代

前陆盆地组合而成,经历了多期次沉降-隆升形成的大型复合式叠合盆地^[8],位于新疆维吾尔自治区南部,由南向北被昆仑山、阿尔金山、天山和库鲁克塔格山围绕。构造单元上,其内部可划分为“四隆五坳”9个二级构造单元(图1a),分别为塔北隆起、塔中隆起、巴楚隆起、塔东南隆起、库车坳陷、北部坳陷(阿瓦提坳陷、顺托果勒鞍部、满加尔坳陷)、塘古孜巴斯坳陷、塔东南坳陷及西南坳陷。

塔里木盆地寒武系可划分为两个地层小区:塔东盆地地区和塔西台地地区^[9]。该分区以轮南-古城台缘带为界(图1a)。塔东盆地地层肖尔布拉克组岩性以泥岩、泥灰岩、黑色页岩和硅质岩为主。塔西台地相同层位自下而上主要以发育薄层泥晶白云岩、晶粒白云岩、中厚层颗粒白云岩及藻白云岩为主(图1b)。

2 沉积相类型及特征

2.1 沉积相类型

塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组碳酸盐岩类较为发育。现有的资料点相对较少,根据前人的资料和沉积相研究成果^[4-5],认为在塔西南古陆周缘,盆地的南部和西部发育小范围的陆源碎屑的混积潮坪沉积,主要为含陆源碎屑的砂质白云岩,其中在中深5井录井岩屑中见有膏质白云岩、泥质白云岩中夹杂陆源碎屑的石英,均指示周缘的混积潮坪相的沉积。根据沉积物的岩石类型、原生沉积构造和沉积微相标志等特征^[10-11],本文重点针对盆地内发育的蒸发台地和开阔台地、台地边缘、斜坡-盆地等主要相带进行阐述(图2)。

混积潮坪在研究区发育较为局限,主要分布在盆地西南缘或西缘,由于该区靠近塔西南古陆,距陆碎屑的供应区较近,加上水体较浅,因此形成了小范围的混积潮坪沉积区。混积潮坪在研究区主要以碳酸盐与陆源碎屑交互沉积为特征。陆源碎屑潮坪主要由泥质石

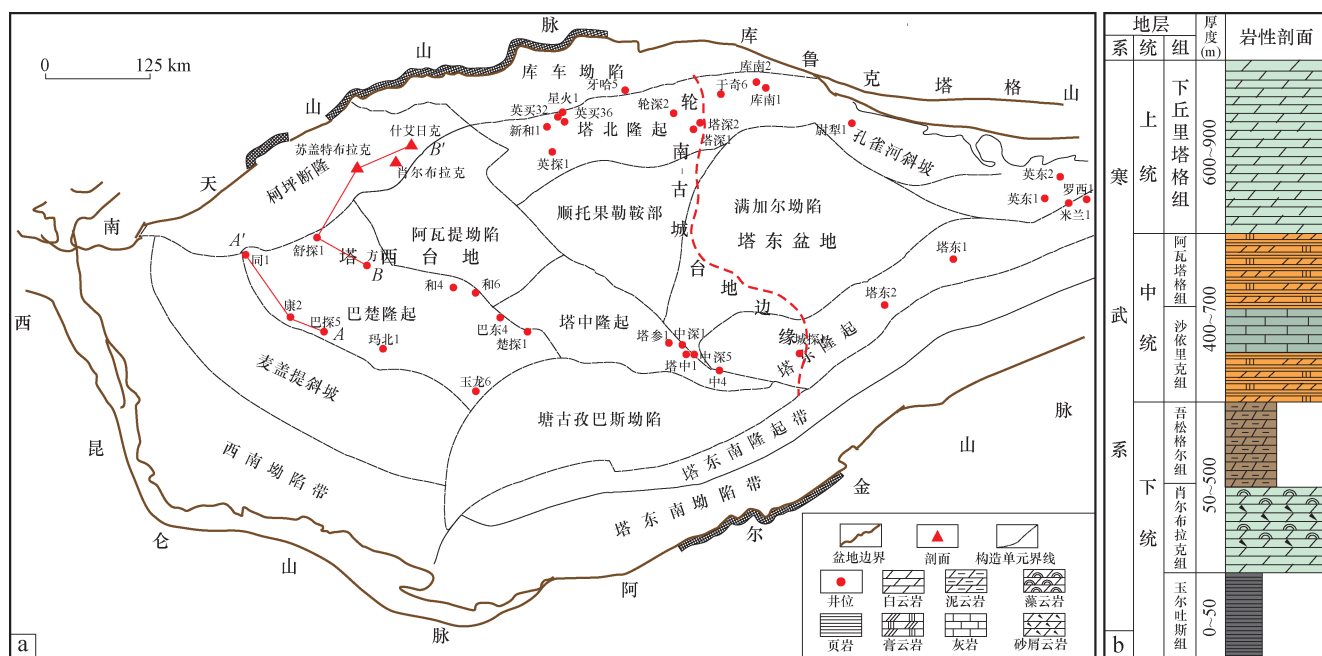


图1 塔里木盆地构造分区示意图及寒武系岩性柱状图

Fig. 1 Schematic diagram of structural division and the Cambrian lithologic column of Tarim basin

a. 塔里木盆地构造分区和各地层小区划分; b. 塔西台地寒武系岩性柱状简图

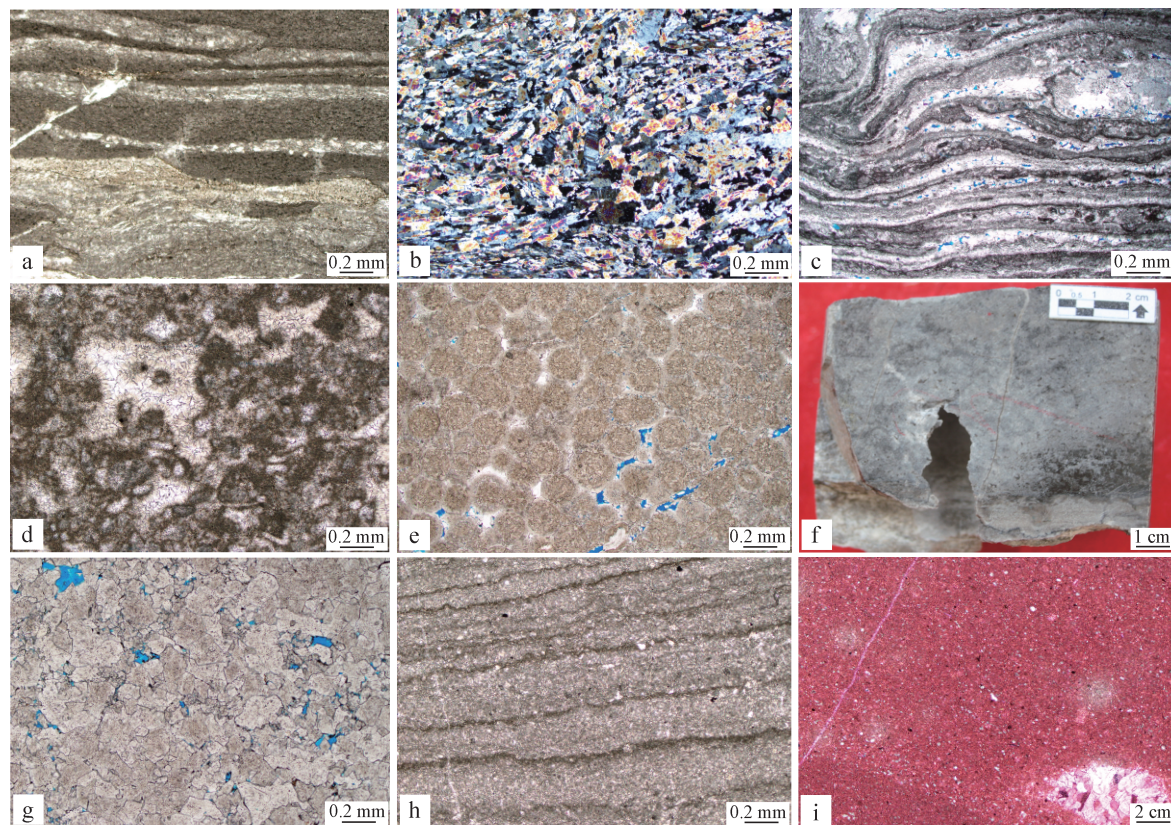


图2 塔里木盆地地下寒武统肖尔布拉克组典型沉积相标志

Fig. 2 Typical markers of sedimentary facies of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 膏质白云岩,发育膏质纹层,中深5井,埋深6 550 m, C_{1x} ,局限-蒸发潮坪; b. 膏岩,巴探5井,埋深6 595.3 m, C_{1x} ,膏盐湖; c. 藻纹层白云岩,舒探1井,埋深1 884.1 m, C_{1x} ,台内丘相; d. 藻粘结白云岩,牙哈5井,埋深6 396.5 m, C_{1x} ,台内丘相; e. 鲕粒白云岩,发育粒间溶孔,楚探1井,埋深7 757 m, C_{1x} ,台内滩相; f. 砂屑白云岩,埋深5 267 m,罗西1井, C_{1x} ,台缘滩相; g. 残余砂屑中-细晶白云岩,发育溶蚀孔洞,埋深5 268.1 m,罗西1井, C_{1x} ,台缘滩相; h. 纹层状泥晶灰岩,埋深7 356.5 m,新和1井, C_{1x} ,斜坡-盆地; i. 泥晶灰岩,埋深7 643 m,新和1井, C_{1x} ,斜坡-盆地

英粉砂岩泥岩等沉积组成,偶含石膏斑块,常见水动力条件变化形成的沉积构造。碳酸盐潮坪沉积主要以泥质或砂质白云岩、泥质灰岩与白云岩的不等厚薄互层为特征,生物化石稀少,偶可见石膏斑块。研究区发育的混积潮坪序列由单一的碳酸盐潮坪和碎屑潮坪组合而成,推测其可能是对海平面频繁升降变化、物源供应和古气候变化的响应。

局限-半蒸发台地与广海之间连通较差,由于干旱炎热的气候条件,海水蒸发作用剧烈,主要发育膏岩、盐岩、膏质白云岩、膏质泥岩和泥云岩等。但受外来海水的不断泛侵,带来部分泥质沉积物,使得蒸发台地内膏盐岩层中可见薄层准同生膏质白云岩、薄层含膏质泥岩与泥质白云岩等夹层^[12](图2a,b)。根据相带内部沉积环境和沉积物的差异,可细分为蒸发潮坪与膏盐湖两种亚相,进一步分为膏云坪、膏盐坪和泥云坪微相。

开阔台地相与广海连通较好,在肖尔布拉克组中较为发育,受海平面升降和古地貌环境控制^[13]。该相带岩性主要为鲕粒白云岩、砂(砾)屑白云岩、藻白云岩、叠层石云岩、砂屑灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、泥岩和泥质云岩等组成(图2c-e)。开阔台地相主要发育台内丘滩、丘滩间与台内洼地等亚相,以及砂屑滩、鲕滩、生屑滩、藻丘与静水泥、泥云坪等微相。

台地边缘受波浪作用动荡和潮汐水流冲刷改造导致水体能量较高,是礁滩储层十分发育的高能地带,该相带内沉积物主要为藻砂屑白云岩、鲕粒白云岩、藻格架白云岩和藻粘结白云岩等^[14](图2f,g);但局部能量较低地带为滩丘间沉积,沉积物主要为泥晶白云岩、泥晶灰岩和泥质灰岩等。主要发育台缘丘滩亚相,以及鲕粒滩、砂屑滩与藻丘微相。

斜坡-盆地相在塔里木盆地东部地区大范围发育,位于台缘带外侧,盆地中部和东部近南北向展布。该相带岩石类型主要以灰质泥岩、泥灰岩、泥云岩、泥岩、灰质云岩、射虫硅岩、硅质泥岩、炭质泥岩和灰质泥岩为主(图2h,i)。

2.2 单井相

根据取心观察、薄片鉴定、测井和地震等资料分析,对研究区钻遇下寒武统肖尔布拉克组的单井进行沉积相划分。以楚探1井为例进行解剖,肖尔布拉克组主要发育开阔台地相沉积,进一步分为台内滩与滩间海亚相,台内滩主要包括鲕粒滩、砂屑滩和砾屑滩微相。楚探1井岩性剖面表明下寒武统肖尔布拉克组发育大套的台内滩沉积,具有明显的残余颗粒结构特征,

从图3中单井柱状图中可以看出肖尔布拉克组孔隙较发育,为较好的优质储层发育段(图3)。测井曲线上表现为明显箱型的低GR段、低电阻率略低,局部出现锯齿状高值,揭示该套储层具有分布规模大、稳定性好的特点。同时依据前人研究肖尔布拉克组储集层层位分布和储集空间类型的特征,推测该井段储集层成岩时期可能发生明显的暴露溶蚀作用。

2.3 连井沉积相

在针对下寒武统肖尔布拉克组的典型单井进行沉积相划分和野外露头剖面分析的基础上,编制了两条典型丘(滩)体演化和膏盐湖演化的连井沉积相剖面。通过连井对比研究进一步探讨研究区内沉积相的分布规律,为肖尔布拉克组平面沉积相的分布和演化提供依据。

从方1井-舒探1井-苏盖特布拉克剖面-什艾日剖面的连井沉积相对比大剖面(图4),可以看出横向上肖尔布拉克组厚度具有向什艾日克剖面方向减薄的趋势;垂向上岩性主要为大套厚层的藻云岩和砂屑白云岩互层发育的特征,其中方1井、苏盖特布拉克剖面、什艾日剖面藻云岩和砂屑白云岩主要发育在肖尔布拉克组中上部,而舒探1井在全井段均具有丘滩发育的特征。台内丘(滩)体在塔里木盆地的西北部呈连片分布,肖尔布拉克组时期台地较为开阔,广泛发育台内丘、台内滩以及台内丘滩复合体,主要以砂屑滩、藻丘和鲕粒滩沉积为主,该区域为较为有利的储集相带分布区^[15-16]。

从巴探5井-康2井-同1井的连井沉积相对比大剖面(图5),可以看出横向上肖尔布拉克组厚度具有向同1井方向增厚的趋势。垂向上岩性主要为泥云岩、白云岩、膏岩、盐岩或膏质白云岩互层发育的特征,巴探5井、康2井一带发育厚层的盐岩,为膏盐湖微相发育特征,同1井一带主要以膏质白云岩、膏盐互层发育为主,为膏云坪微相发育特征。根据各单井沉积相的划分,结合区域内连井剖面对比表明在盆地的西南部肖尔布拉克组发育局限-蒸发台地相沉积,主要以发育局限-蒸发潮坪亚相沉积为主,进一步可以划分为膏盐湖、膏云坪与泥云坪微相。

3 地震-沉积响应特征

3.1 地震相类型及特征

地震相是反映特定沉积相在地震剖面上的响应特征,不同响应特征可对应不同的地质解释^[17]。由于塔

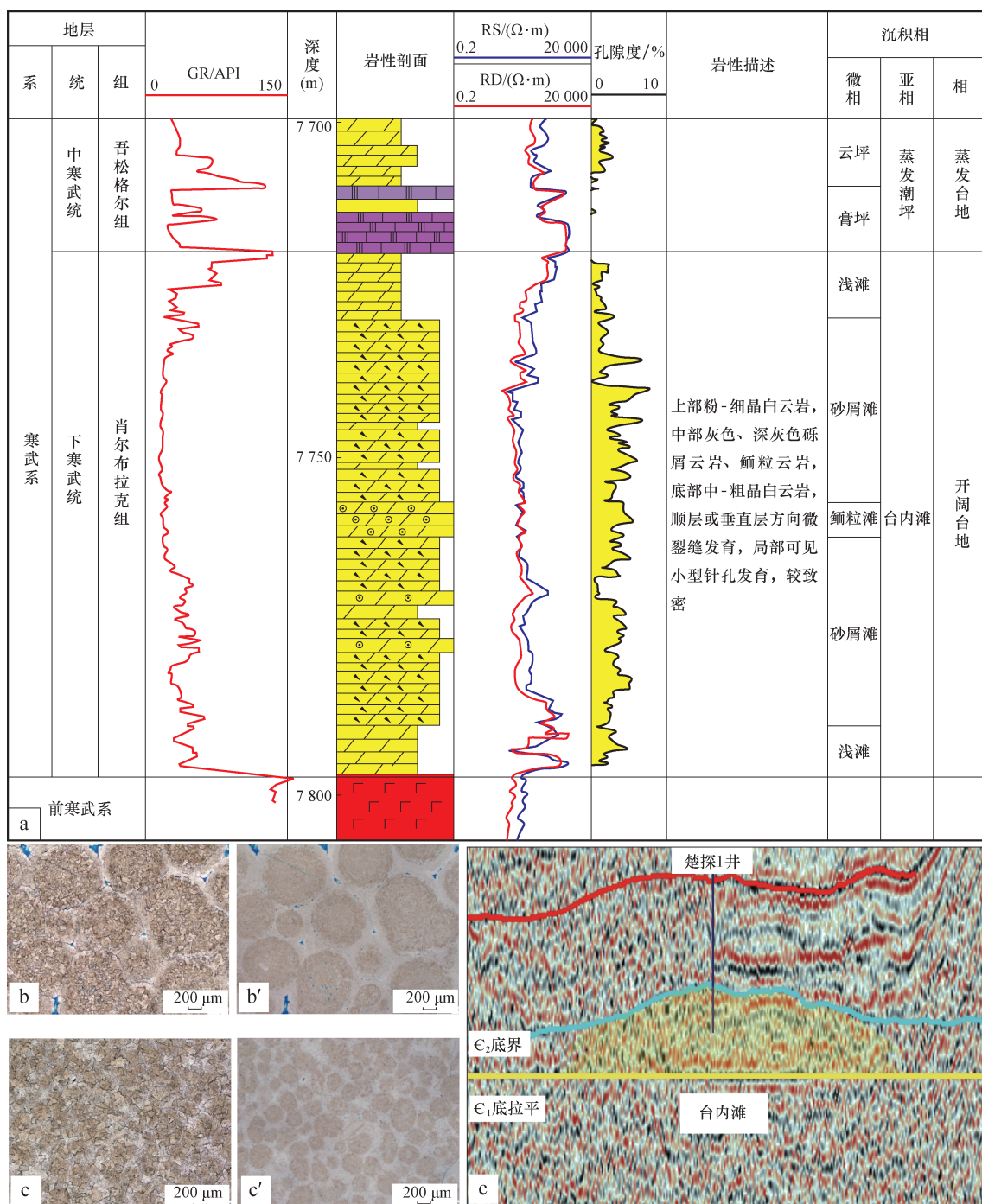


图3 塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组典型单井沉积相分析(楚探1井)

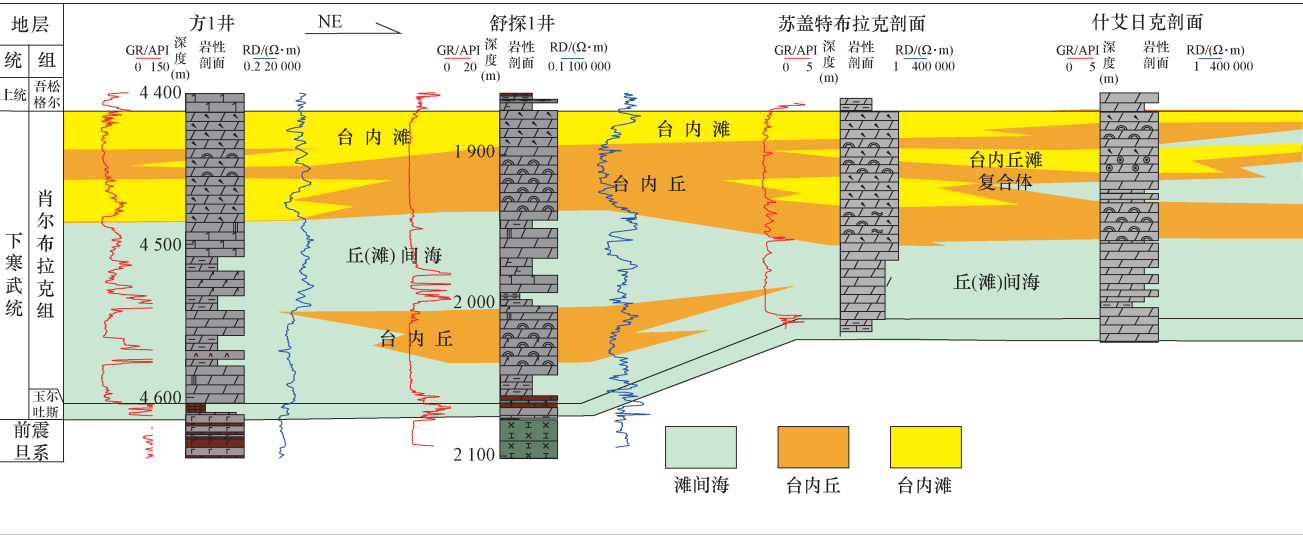
Fig. 3 Typical single well sedimentary facies analysis of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin (Well Chutan 1)

a. 楚探1井沉积相; b. 鲕粒白云岩, 埋深7 757 m, b'为图b原岩恢复后的图像; c. 残余砂屑白云岩, 埋深770.8 m, c'为图c原岩恢复后的图像; d. 楚探1井地震剖面

里木盆地下寒武统埋藏深, 碳酸盐岩岩性复杂、差异大、识别难度大, 目前钻遇肖尔布拉克组的钻井较少, 有些地震相还没有钻井揭示, 因此通过地震相解释分析沉积相, 并来确定其分布特征, 在研究区来说是比较难但重要的手段。

本次研究以碳酸盐岩台地模式理论为指导, 结合钻井标定和二维地震资料, 从地震相外部形态、内部结

构和内部反射特征三个方面入手, 对横跨盆地的东西向和南北向的地震大测线进行精细解释, 共识别出6种地震相 (Seismic Facies) (表1), 分别为台内丘 (滩) (SF1)、台内洼地 (SF2)、丘 (滩) 间海 (SF3)、膏盐湖 (SF4)、台地边缘 (SF5) 和斜坡-盆地 (SF6)。台内丘和台内滩、滩间和丘间具有相似的地震反射特征, 主要是根据钻井和野外露头的标定来区分不同的沉积相。



塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘(滩)体连井剖面(方 1 井—舒探 1 井—苏盖特布拉克剖面—什艾日剖面,见图 1BB'剖面)

Fig. 4 Well tie profile of intra-platform microbial mound/shoal of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin
(Well Fang 1, Well Shutan 1, Sugaitebulake and Shi' airike profiles)

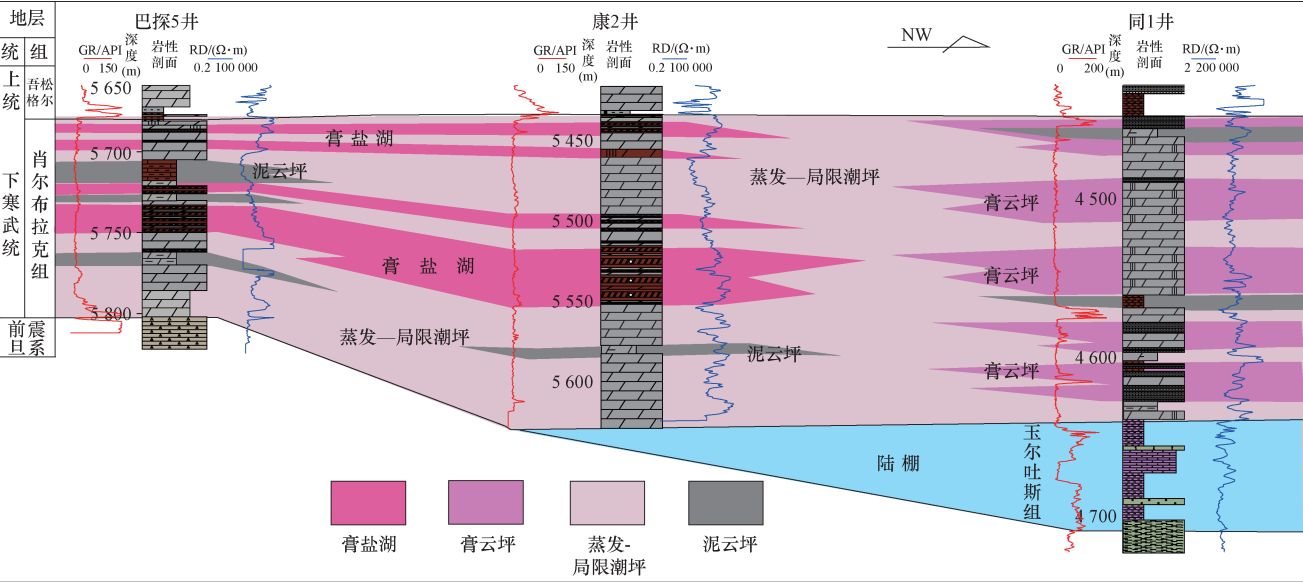


图 5 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组膏盐湖连井剖面(巴探 5 井—康 2 井—同 1 井,见图 1AA'剖面)

Fig. 5 Well tie profile of intra-platform gypsum-salt lake of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin
(Well Batan 5, Well Kang 2 and Well Tong 1)

3.2 构造古地貌特征及演化

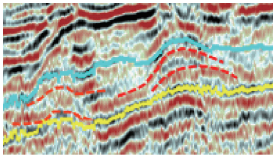
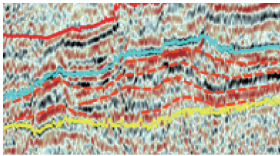
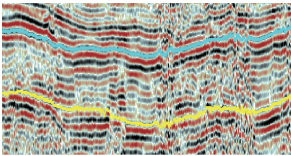
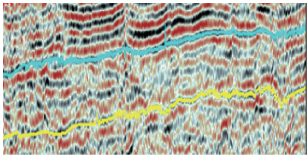
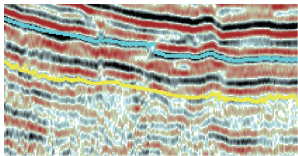
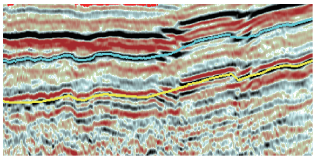
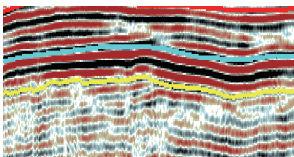
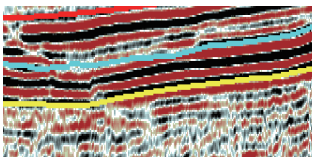
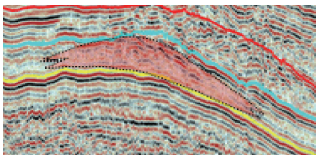
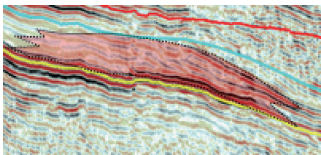
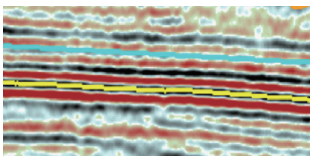
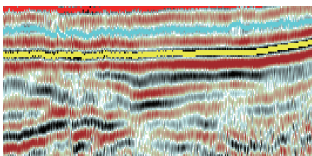
通过识别和总结出不沉积相对应的地震相发育特征的基础上,追踪不同地震相在大测线上的分布,进而在平面上圈定出对应沉积相的发育范围(图 6a),建立肖尔布拉克组地震解释方案。本次研究的地震相解释和沉积相标定方案主要包括三个方面(图 6)。① 通过识别下寒武统上超尖灭点,确定盆地南部古陆的分布范围(图 6b);② 根据下寒武统厚度变化趋势,圈定台内洼地的发育范围(图 6c);③ 根据钻井标定,结合

钻井取心和薄片标定的优势沉积相,以及野外剖面的优势沉积相,对过井或井旁、过野外露头或临区露头地震测线上对应层位的地震相进行标定(图 6d),精细研究台内滩、台内丘、滩(丘)间海与膏盐湖等主要台内亚相的地震相特征,并明确其分布范围。

依据钻井与露头地质资料,结合地震解释成果,平面上,塔西台地地区向塔东盆地地区依次为和田河古陆、一级阶地、一级坡折、中部低洼、二级坡折与东部深洼。一级阶地发育在盆地西南部,地势平缓;一级坡折为主要受断层控制的构造坡折带,主要控制台洼周缘

表1 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组典型沉积相地震响应特征

Table 1 Typical seismic response features of sedimentary facies in the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

主要亚相	典型地震剖面		地震相特征		
			外部形态	内部结构	反射特征
台内丘 (滩) (SF1)			丘状	叠瓦状 - 弱前积	中 - 强振幅、 高频 中 - 低连续性
台内洼地 (SF2)			连续稳定 厚层	亚平行	中 - 弱振幅、 高频 中 - 连续性
丘(滩) 间海 (SF3)			连续稳定 中 - 薄层	亚平行 - 平行	中 - 强振幅、 中 - 低频、 中 - 高连续性
膏盐湖 (SF4)			连续稳定 中 - 薄层	平行	强振幅、低频 高连续性
台地边缘 (SF5)			丘状 楔状	斜交 - 叠瓦状 前积	中振幅 中 - 高频 低连续性
斜坡 - 盆地 (SF6)			连续稳定 薄层	平行	中 - 强振幅、 低频 高连续性

台内滩的发育范围;二级坡折为地貌控制的地形坡折,主要控制肖尔布拉克组台缘滩的发育范围。

受前寒武系裂陷槽构造古地貌和玉尔吐斯组沉积补偿的双重控制,肖尔布拉克组古地貌呈现出南高北低、西高东低的沉积格局(图7)。台内洼地周缘坡折带广泛发育大面积分布的洼地边缘滩,在横向剖面上呈现出以台洼为中心的“双滩”沉积模式;因古气候以及海平面多期变化,在纵向上发育多套滩体垂向叠置模式。

和田河古陆整近东西走向,由南部向古陆上超尖灭,为肖尔布拉克组向盆地南部的超覆尖灭区(图7)。中 - 上寒武统一中奥陶统由北部向古隆起区减薄^[3],表明该古隆起在塔里木盆地寒武世 - 奥陶世具有继承性发育特点。

“一级阶地”主要发育混积潮坪、半蒸发潮坪、膏

盐湖与泥云坪(图7),岩性以陆源碎屑岩、泥质白云岩、膏质白云岩和膏盐岩为主。巴楚隆起南部的玉龙6井在岩心观察中发现有陆源碎屑石英,薄片镜下可见含砂质灰岩,整体表现为混积潮坪的沉积特征,结合前人的资料和研究成果^[4-5]表明混积潮坪相带规模较小,主要分布在古陆周缘一带。巴楚隆起西部巴探5井、康2井、同1井与中深5井均揭示潮坪和膏盐湖沉积,该类井钻遇大量膏质白云岩和膏盐岩,含膏盐地层厚度占总厚度比值可达4.5%~60.5%。地震剖面上可识别明显“连续稳定中 - 薄层、平行、中等振幅与低频与高连续性”的膏盐岩层系地震反射特征。

“一级坡折带”为台内正断层控制的构造坡折,总体位于断层上升盘,控制了台内丘(滩)体的发育。巴楚隆起西北部一间房构造带上的舒探1井在肖尔布拉克组取心,发育大规模藻白云岩、残余颗粒结构中 - 细

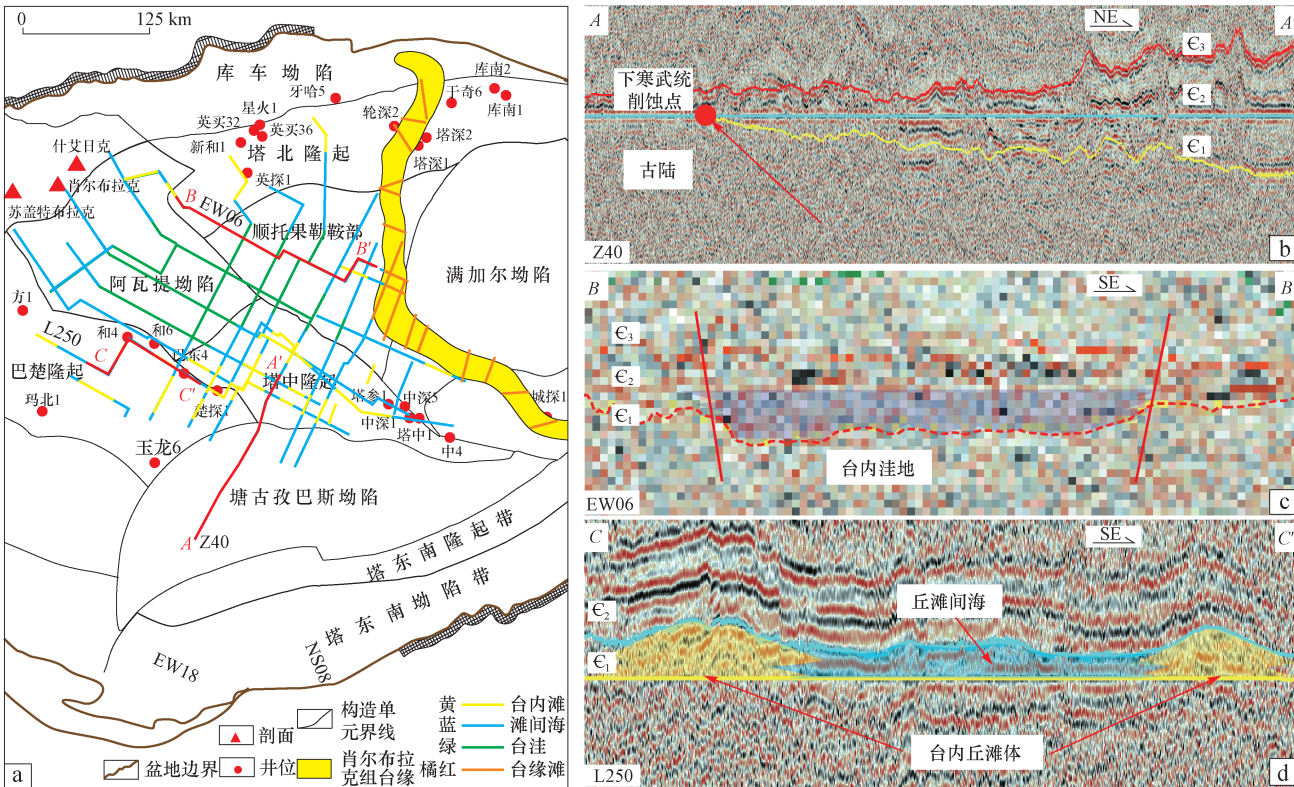


图 6 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组地震解释方案

Fig. 6 Seismic interpretation scheme of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 结构单元与沉积分布; b. 地层地震解释方案

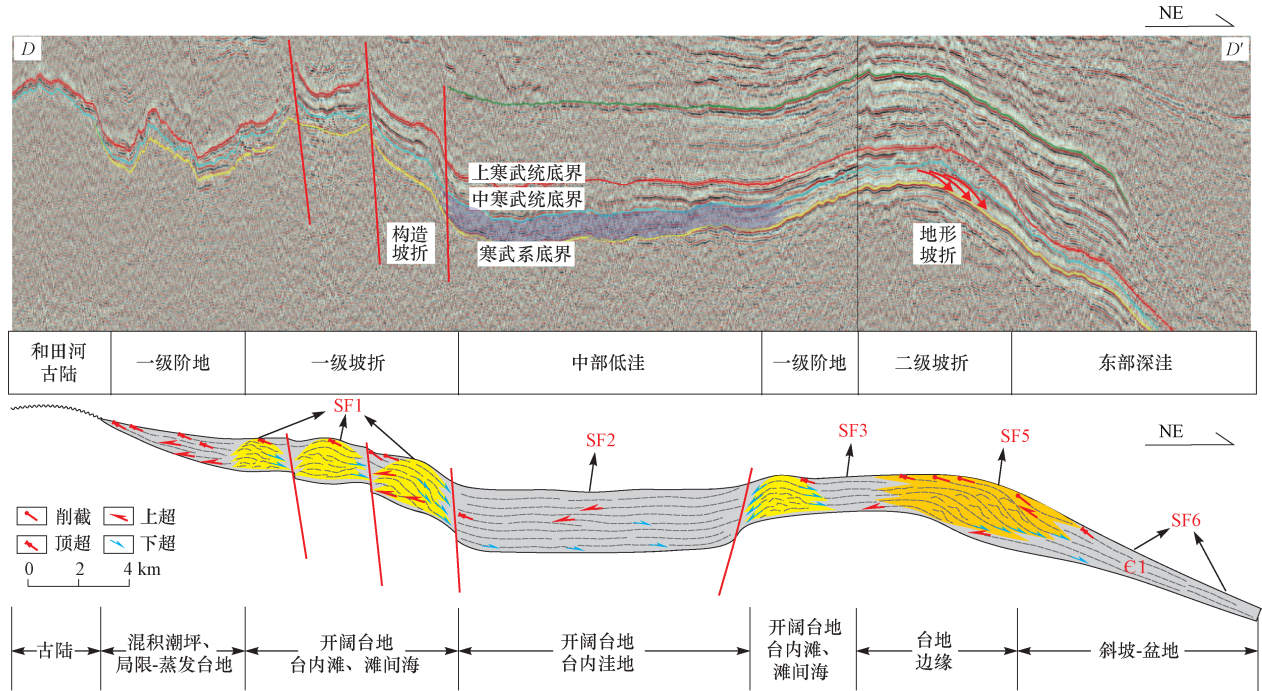


图 7 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组构造古地貌及地震相模式 (剖面位置见图 8)

Fig. 7 Tectonic paleogeomorphology and seismic facies model of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

(see Fig. 8 for the profile location)

晶白云岩,为台内丘沉积特征。巴楚隆起东南部楚探 1 井取心观察中发育大套砂屑白云岩与鲕粒白云岩,为台内滩沉积特点。地震剖面上表现为“丘状外形、叠瓦 - 弱前积”的丘滩相地震反射特征。根据钻井标定和地震

相刻画揭示台内丘(滩)体在塔中隆起、巴楚北部、柯坪地区和塔北隆起呈零星的片状或环带状分布。

“中部低洼”以发育台内洼地为特征,分布于塔中-巴楚隆起北部以及阿瓦提坳陷一带。台洼的沉积厚度明显大于同沉积正断层上升盘区域,过台内南北向和东西向地震大剖面均证实肖尔布拉克组厚度表现为由台洼向周缘柯坪、塔北、塔中和巴楚南部以及台缘带区域呈减薄的特点^[18]。地震剖面上表现为“连续稳定厚层、亚平行-平行、中-强振幅、中-低频和中-高连续性”的地震反射特征。

“二级坡折带”为古地貌控制的地形坡折,控制了台缘滩的发育。肖尔布拉克组台缘带主要分布在塔中-塔北一带(图6)。其中,根据前人研究成果中可知轮南-古城台缘带呈近南北走向^[19-20],长约500 km,宽约15~20 km。整体上,肖尔布拉克组发育缓坡台缘,以低缓长距离前积为特征,台缘带暴露不明显,主要发育薄的滩体。地震剖面上可见“丘状或楔状、内部断续、杂乱或叠瓦状前积”反射特征。

“东部深洼”以发育斜坡-盆地相为特征,分布于塔东满加尔坳陷一带。地震剖面上表现为明显的“连续稳定厚层、平行、中-强振幅、低频、高连续性”的地震反射特征。

4 肖尔布拉克组岩相古地理特征

4.1 地层厚度

基于地质与地震统层,通过对横跨盆地的二维、三维地震资料解释和连片成图的方法,根据陈永权^[3]修改,精细刻画了下寒武统厚度图(图8)。塔西台地内,下古生界两个地震层序界面较易追踪,一个为寒武系底界 T_g^8 ,一个是中寒武统底界 T_g^7 ;塔东盆地内,通过井震标定和精细追踪解释实现与塔西台地地震层位解释方案的统一。盆地二维地震剖面上,下寒武统厚度对应 $T_g^8-T_g^7$ 。

根据肖尔布拉克组残余地层厚度图显示(图8),塔里木盆地肖尔布拉克组地层厚度较为稳定,分布广泛,没有大规模的剥蚀。地层厚度呈现东西分异的特点,塔东盆地地区肖尔布拉克组整体沉积厚度较薄,为欠补偿的深水沉积特点。塔西台地地区地层沉积厚度相对较大,台地内部地层加厚区主要位于满西地区,地层厚度向周缘阿瓦提坳陷、塔北隆起、巴楚和塔中隆起南部减薄。

根据构造和古地貌特征表明,盆地南部存在古隆起区,为塔西南-麦盖提斜坡-塔中东南部-古城一

线呈近东西走向的超覆尖灭区,东部和中部存在两个洼陷区。盆地西南部存在一级阶地,以宽缓的一级坡折向中部低洼区过渡。盆地中部存在窄陡的二级坡折,向东快速过渡为深洼区。一级阶地的西部范围宽阔,发育半蒸发台地膏盐湖和膏云坪亚相,一级阶地的东部范围狭窄,发育局限台地膏云坪和泥云坪亚相,一级坡折带的中部和东部广泛发育台内滩和滩间海沉积,一级坡折带的西部和北部广泛发育台内丘和丘间海沉积,北部坡折带以外范围较宽,发育斜坡-深水盆地相,二级坡折控制着台地边缘,以低缓前积的缓坡型台缘为特征。

4.2 岩相古地理特征

塔里木盆地揭示下寒武统钻井和露头地质资料点约有22个。台地内取心地质资料点8个,其中楚探1井与新和1井为新增资料点,其余资料点在前人的研究中均有涉及^[21-22]。台盆内岩相以黑色页岩、泥岩、泥灰岩和硅质岩为主,结合地震相特征,代表斜坡-深水盆地相沉积物;塔北隆起新和1井和星火1井泥质灰岩、泥晶灰岩控制肖尔布拉克组斜坡-盆地相沉积范围,台地内部岩性以藻云岩、颗粒白云岩和晶粒白云岩为主,代表开阔台地台内丘亚相沉积物;巴楚隆起肖尔布拉克组岩性以晶粒白云岩、颗粒白云岩为主,夹薄层蒸发膏盐岩,为台内半蒸发膏云坪和膏盐湖沉积物;塔中东部中深1井、中深5井肖尔布拉克组以泥晶白云岩与砂质颗粒白云岩为主,为混积潮坪与台内滩过渡相;在东部根据地震和罗西1井取心证实罗西地区发育台缘相。

根据构造古地貌和沉积格局的认识,结合钻井岩心、薄片和野外露头等地质资料点以及地震解释成果,本文在前人的基础上研究修编了下寒武统肖尔布拉克组岩相古地理图(图9)。肖尔布拉克组沉积相与Wilson碳酸盐岩台地模式相似,主要表现为东部为盆地相沉积,西部为碳酸盐岩台地相沉积,由塔西台地向塔东盆地依次为和田河古陆、局限-半蒸发台地、开阔台地、台地边缘和斜坡-深水盆地,其中在东部罗西地区存在镶边型台缘发育。在台地内部主要表现为南北沉积分异,塔西南古隆起为地层超覆尖灭区;向北部古隆起周缘主要发育混积潮坪-蒸发台地泥云坪;巴楚地区西北部为蒸发云盐坪和膏盐湖分布区;巴楚地区东部至塔中隆起发育开阔台地台内滩、滩间海与台内洼地,台洼周缘发育受断裂坡折带控制的洼地边缘丘(滩),呈环带状分布。柯坪露头区苏盖特布拉克、什艾日克及周缘野外剖面均揭示该区肖尔布拉克组发育

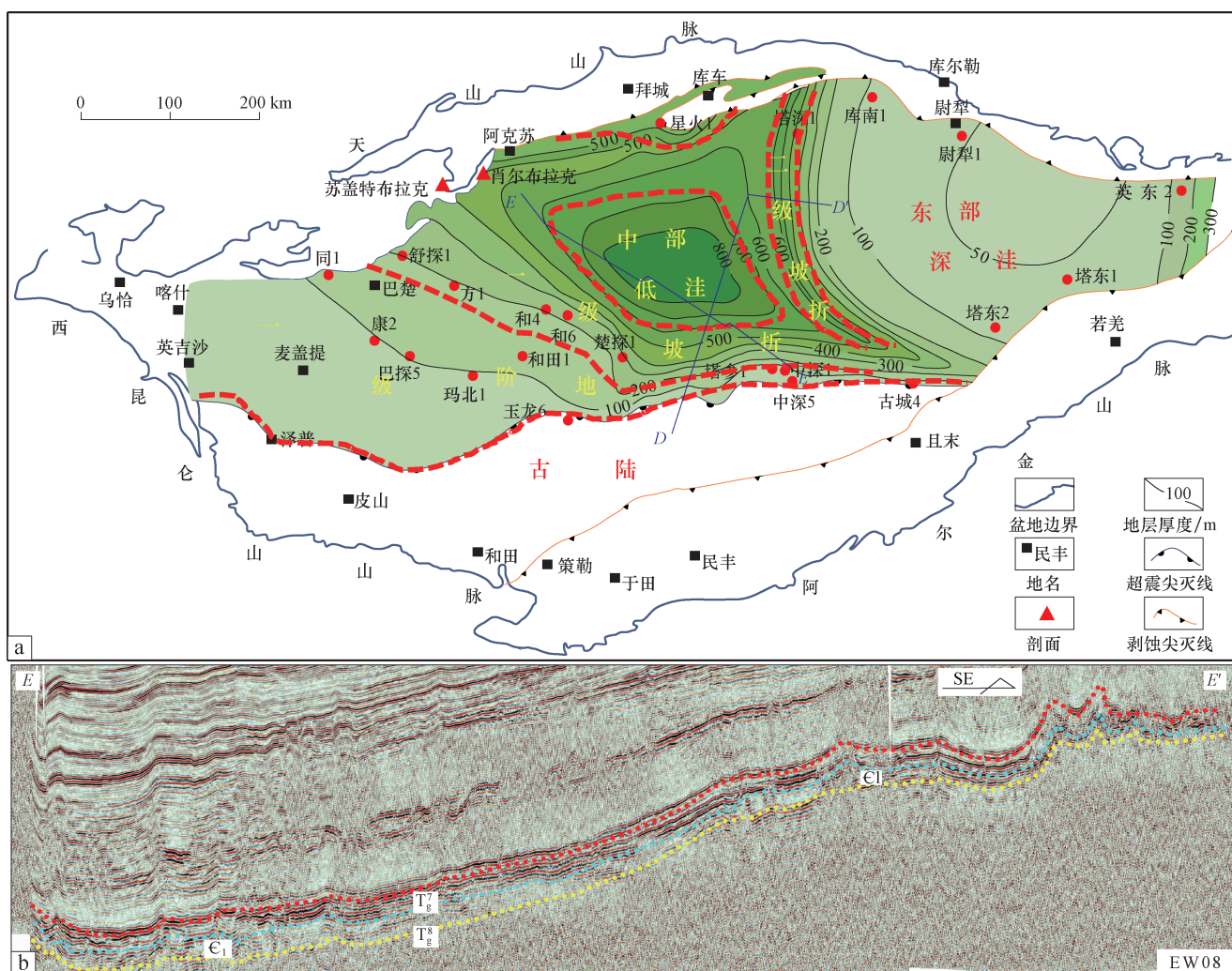


图8 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组残余地层厚度(据文献[3]修改)

Fig. 8 Residual thickness of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin(modified from reference [3])

a. 残余地层厚度分布;b. 地层地震特征

厚层块状微生物白云岩、藻粘结白云岩和砂屑白云岩^[23],指示该区广泛发育台内丘沉积。与前人编制的沉积相图对比可以发现,本研究早寒武世沉积相格局与陈永权等^[3]、杜金虎等^[4]和沈安江等^[5]有相似也有不同,都认为早寒武世肖尔布拉克组台地内部主要表现为南北分异特点,发育蒸发台地、局限台地和开阔台地,但台地内部相带的发育范围差异较大。本文基于高精度二维地震和区域三维地震资料精细解剖,认为北部不发育台缘带,台缘带主要位于轮南-古城一带,为缓坡型台缘沉积模式^[24]。

5 结论

1) 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组主要表现为西高东低、南高北低的构造古地貌格局发育混积潮坪、局限-半蒸发台地、开阔台地、台地边缘、斜坡-盆地相,又可划分为局限-半蒸发潮坪、膏盐湖、台

内丘(滩)、丘(滩)间海、台内洼地和台缘滩亚相及多个微相,沉积相的分布具有典型的分带性和继承性。

2) 基于横跨盆地的二维地震测线精细解释,确定了塔里木盆地肖尔布拉克组主要亚相类型的地震相响应特征,识别出了6种地震相类型,分别为台内丘(滩)体(SF1)、台内洼地(SF2)、丘(滩)间海(SF3)、膏盐湖(SF4)、台地边缘(SF5)和斜坡-盆地(SF6)。进而圈定了各亚相的平面沉积相边界,揭示各相带的发育分布与古构造和古地貌沉积格局的关系。

3) 编制了寒武统肖尔布拉克组岩相古地理图,明确了盆地南部存在东西走向古隆起区,东部和中部存在两个洼陷区;盆地西南部存在一级阶地,以宽缓的一级坡折向中部低洼区过渡;盆地中部存在窄陡的二级坡折,向东快速过渡为深洼区。台内洼地周缘坡折带广泛发育大面积分布的洼地边缘滩,在横向剖面上呈现出以台洼为中心的“双滩”沉积模式,在纵向上发育多套滩体垂向叠置模式,平面上呈零星的片状或环带状分布。

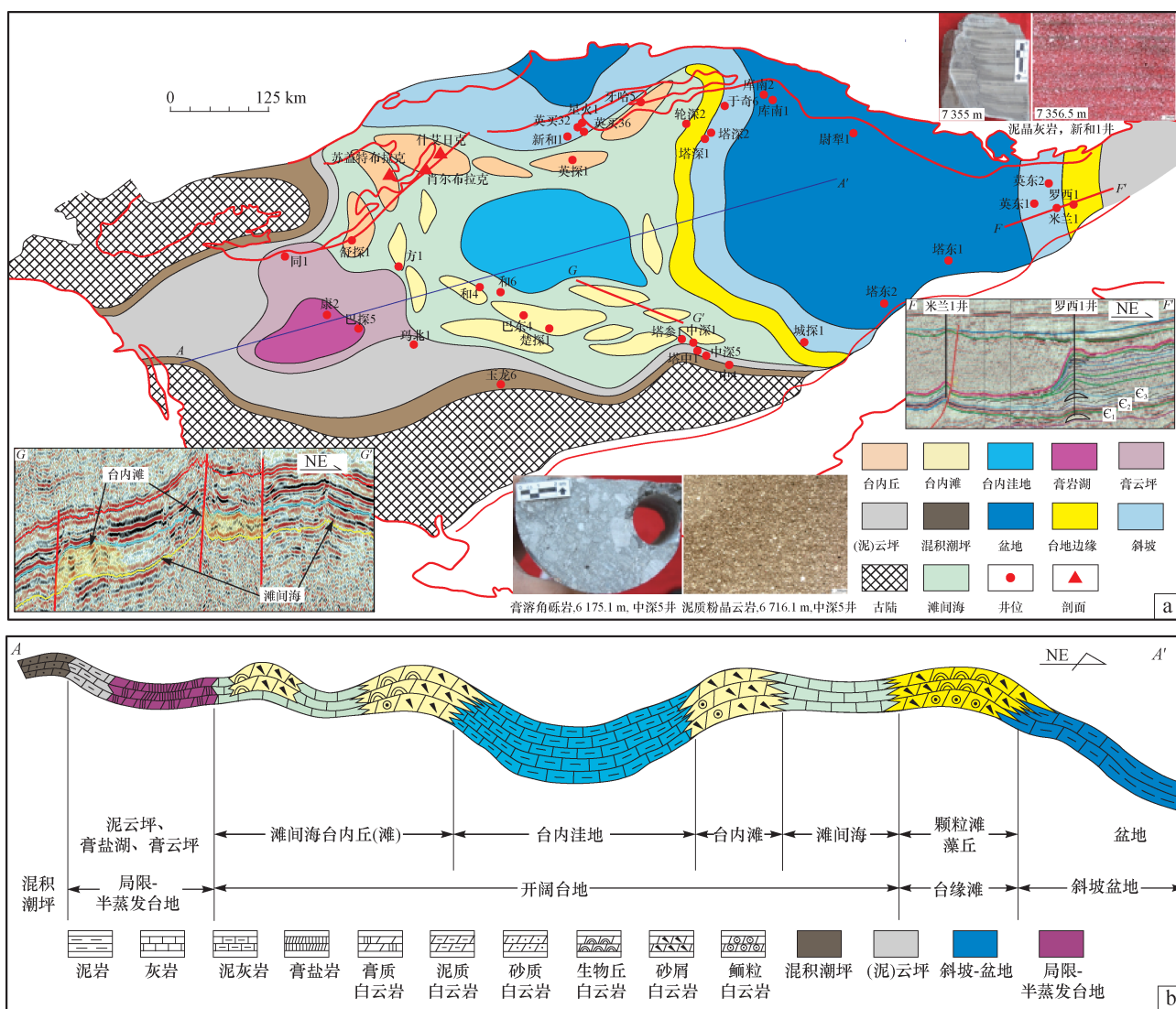


图9 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组岩相古地理与沉积模式

Fig. 9 Lithofacies palaeogeography and sedimentary model of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin

a. 岩相古地理; b. 沉积模式

参考文献

- [1] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 685-695.
Hu Guang, Liu Wenhui, Tengger, et al. Tectonic-sedimentary constraints for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 685-695.
- [2] 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.
- [3] 陈永权, 严威, 韩长伟, 等. 塔里木盆地寒武纪-早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定: 基于地震证据的新认识[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1831-1843.
Chen Yongquan, Yan Wei, Han Changwei, et al. Redefinition on structural paleogeography and lithofacies paleogeography framework from Cambrian to Early Ordovician in the Tarim Basin: A new approach based on seismic stratigraphy evidence [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1831-1843.
- [4] 杜金虎, 潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 327-339.
Du Jinhui, Pan Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 327-339.
- [5] 沈安江, 郑剑锋, 陈永权, 等. 塔里木盆地中寒武统白云岩储集层特征、成因及分布[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 340-349.
Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. Characteristics, origin and distribution of dolomite reservoirs in Lower-Middle Cambrian,

- Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 327-339.
- [6] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545-554.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545-554.
- [7] 金之钧, 周雁, 云金表, 等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 715-724.
- Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration target in the marine sequences of China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 715-724.
- [8] 郭光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等. 塔里木克拉通基底古隆起构造-热事件及其结构与演化[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 1-18.
- Wu Guanghui, Li Haowu, Xu Yanlong, et al. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-uplifts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 1-18.
- [9] 黄智斌, 吴绍祖, 赵治信, 等. 塔里木盆地及周边综合地层区划[J]. *新疆石油地质*, 2002, 23(1): 13-17.
- Huang Zhibin, Wu Shaozu, Zhao Zhixin, et al. The composite regional stratigraphic classification in Tarim Basin and its circumference [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2002, 23(1): 13-17.
- [10] Mancini E A, Parcell W C, Ahr W M, et al. Upper Jurassic updip-stratigraphic trap and associated Smackover microbial and nearshore-carbonate facies, Eastern Gulf Coastal Plain [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(4): 417-442.
- [11] 何镜宇, 孟祥化. 沉积岩和沉积相模式及建造[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 281-282.
- He Jingyu, Meng Xianghua. *Sedimentary rock and sedimentary facies and construction* [M]. Beijing: Geological Press, 1987: 281-282.
- [12] 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 89-98.
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, et al. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 89-98.
- [13] 蔡习尧, 李越, 钱一雄, 等. 塔里木板块巴楚隆起区寒武系盐下勘探潜力分析[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(3): 283-288.
- Cai Xiyao, Li Yue, Qian Yixiong, et al. Exploration potential of the salt-capped Cambrian strata in the Bachu high, Tarim block, NW China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(3): 283-288.
- [14] 赵文智, 沈安江, 周进高, 等. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义: 以塔里木和四川盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 257-267.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Zhou Jingao, et al. Types, characteristics, origin and exploration significance of reef-shoal reservoirs: A case study of Tarim Basin, NW China and Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 257-267.
- [15] 杨海军. 塔里木盆地地下古生界内幕白云岩勘探认识与勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1213-1224.
- Yang Haijun. Exploration acknowledgement and exploration direction research on Low Proterozoic inner dolostones, Tarim basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1213-1224.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Gao, Z. Q., Fan, T. L. Intra-platform tectono-sedimentary response to geodynamic transition along the margin of the Tarim Basin, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2014, 96: 178-193.
- [19] 熊益学, 陈永权, 关宝珠, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组北部台缘带展布及其油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 408-415.
- Xiong Yixue, Chen Yongquan, Guan Baozhu, et al. The distribution of northern platform margin and implications to advantaged exploration regions on Lower Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 408-415.
- [20] 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 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(1): 19-27.
- [21] 刘伟, 张光亚, 潘文庆, 等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理及沉积演化[J]. *古地理学报*, 2011, 13(5): 529-538.
- Liu Wei, Zhang Guangya, Pan Wenqing, et al. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Cambrian in Tarim area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(5): 529-538.
- [22] 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 palaeogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin [J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2011, 32(6): 937-948.
- [23] 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): 341-354.
- Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. Carbonate rock microbial construction of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Sugait-blak area, Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 341-354.
- [24] Gao Z Q, Fan T L. Carbonate platform-margin architecture and its influence on Cambrian-Ordovician reef-shoal development, Tarim Basin, NW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68: 291-306.