

塔里木盆地寒武系烃源岩沉积环境再认识

陈强路, 杨鑫, 储呈林, 胡广, 史政, 姜海健, 刘文汇

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:寒武系烃源岩是塔里木盆地海相油气最主要的来源之一, 长期以来对该套烃源岩发育的沉积环境表述多样, 对于极少资料控制的烃源岩预测带来诸多不确定性。利用露头和新钻井、地震资料, 在震旦纪—寒武纪成盆作用分析的基础上, 通过沉积结构及成烃生物组合研究寒武系烃源岩发育的沉积环境, 进而约束下寒武统烃源岩的分布。研究认为, 塔里木盆地寒武纪西“台”东“盆”的沉积格局, 经历了早寒武世缓坡到中—晚寒武世弱镶边台地的演化, 下寒武统泥质烃源岩主要分布于中—外缓坡。与盆地东部下寒武统西山布拉克组烃源岩一样, 盆地西部下寒武统玉尔吐斯组—肖尔布拉克组下段烃源岩的成烃生物组合表现为由底栖藻类占优向浮游藻类占优的转变, 与早寒武世海进—海退沉积序列相对应。塔里木盆地寒武系烃源岩主要发育于深水陆棚环境, 可进一步划分为陆棚相泥质烃源岩和陆棚相碳酸盐质烃源岩, 前者以底栖藻类生物相占优势, 后者以浮游藻类生物相占优势, 海平面升降变化导致两类烃源岩具有叠加、交错分布特征。

关键词:沉积环境; 烃源岩; 寒武系; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Recognition of depositional environment of Cambrian source rocks in Tarim Basin

Chen Qianglu, Yang Xin, Chu Chenglin, Hu Guang, Shi Zheng, Jiang Haijian, Liu Wenhui

(Wuxi Research Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The Cambrian source rocks are considered as one of the most important source of marine oil and gas in Tarim Basin. Previous literatures documented various descriptions of their depositional settings, causing confusion in prediction of source rocks, especially those with no sufficient data. Analyses of outcrops, new drilling and seismic data, and assumptions of prototype basin from the Sinian to Cambrian, were used to study the sedimentary environment of the rocks through a perspective of sedimentary texture and hydrocarbon generating organisms to work out constraints over their distribution. The results show that the Cambrian sedimentary framework of Tarim basin can be characterized as “Western Platform and Eastern Basin”. It evolved through a carbonate ramp in the Early Cambrian and a feebly rimmed platform in the Middle-Late Cambrian. The source rocks of the Lower Cambrian were widely distributed in the middle-outer ramp. The Lower Cambrian Xishanbulake Fm source rocks in eastern Tarim Basin and the Lower Cambrian Yuertusi-Xiaoerbulake Formation in western Tarim Basin have the same bio-precursors assemblage which change from benthic algae to planktonic algae, corresponding to the Early Cambrian progressive-retrogressive sedimentary succession. Regional sedimentary-tectonic evolution background and lithology and bio-precursors reveals that the Cambrian source rocks were developed in the deep shelf environment predominantly, and could be further divided into muddy source rocks and carbonate source rocks. The muddy source rocks were dominated by benthic algal, while the carbonate source rocks were dominated by planktonic algae. In vertical, the muddy source rocks and carbonate source rocks are superimposed on each other.

Key words: depositional environment, source rock, Cambrian, Tarim Basin

塔里木盆地是我国最大的含油气盆地, 总面积 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$, 剩余油气资源丰富。下古生界碳酸盐岩层系

具有广阔的勘探前景, 但是埋深大、直接资料少, 导致盆地整体地质认识还很低。诸多问题之中, 优质烃源

收稿日期: 2015-07-15; 修订日期: 2015-09-14。

第一作者简介: 陈强路 (1969—), 男, 博士、高级工程师, 沉积学及油气勘探综合研究。E-mail: Chenqianglu2006@126.com。

基金项目: 中国石化科技部项目 (P12004)。

岩发育和分布问题始终是制约勘探向南部、西部推进的关键和难点问题。尽管传统的有机地球化学指标在对塔里木盆地主力烃源岩的认识上一直存在较大分歧^[1-3],但近十几年来,普遍还是可以接受台盆区发育中-下寒武统、中-下奥陶统和上奥陶统3套烃源岩的认识^[2,4]。越来越多的研究表明,优质烃源岩的形成不仅要强调缺氧环境对有机质保存的重要性,另外高的生产力和输入量更是有机质富集的关键^[5]。

寒武系烃源岩分布广,在区域乃至全球范围内可以对比,被认为是塔里木盆地海相油气最主要的来源之一^[1-3]。地球化学特征上与奥陶系烃源岩也有一些区别,对寒武系烃源岩发育的沉积环境不同学者也有多种表述^[6-9]。硅质岩的微量元素含量特征显示,黑色岩系发育于大陆边缘陆棚环境,与上升洋流作用有关^[7,10]。基于区域构造和沉积背景的原型盆地分析表明,伸展盆地背景下的陆棚、盆地相区最有利于烃源岩的发育^[11]。稳定碳、氧同位素比值变化指示冰期、冰后期之交,古气候迅速变暖和海平面大幅度上升有利于烃源岩发育^[12]。相较而言,井、震资料约束下的西“台”东“盆”沉积格局更被业内认可,这种沉积模式严格将烃源岩分布限定在东部满加尔一带的盆地相区^[13]。尽管西部台地相区范围内同1、方1、和4、巴探5和玛北1等多口穿过寒武系的钻井,确实没有揭示到寒武系-奥陶系优质烃源岩,但是这又与塔里木西部已有的油气发现规模显然是不匹配的^[14],因此,烃源岩形成的沉积环境更应该是当前值得关注的基础问题。

采用新技术、应用新资料从全盆、全局的角度重新认识塔里木盆地烃源岩发育,并预测其分布已成必然。本文综合运用露头、钻井、地球物理和地球化学资料,通过成盆作用、沉积结构和成烃生物分析,采用微观与宏观相结合,进一步判识烃源岩发育的沉积环境,以期对当前下古生界碳酸盐岩层系油气勘探决策提供依据。

1 震旦纪—寒武纪成盆作用

下寒武统烃源岩发育于震旦系、寒武系之交, Rodinia 超大陆裂解背景对塔里木盆地下寒武统烃源岩的发育和分布有显著控制作用。新元古代早期盆地周缘地区双峰式火山岩^[15-17]、大陆拉斑基性岩墙^[18]和A型花岗岩^[19]都指示了大陆开始大规模裂解。进入震旦纪以后,库鲁克塔格地区仍有薄层玄武岩间歇式喷发^[20],但是在西南天山的那拉提断裂附近,以及西昆仑库地和于田苏巴什一带均出现600 Ma左右的蛇绿混杂岩^[21],说明岩浆活动指示的构造环境明显不同。上述裂谷差异演化过程在塔里木盆地周缘露头区也有完整的沉积响应^[22]。柯坪地区和塔西南叶城地区的南华系-震旦系沉积建造都反映了陆内断陷到初始被动大陆边缘的盆地演化序列,火山活动不发育,夹多层冰碛岩段。库鲁克塔格地区与之截然不同,南华系-震旦系沉积自下至上反映了裂谷演化的初始裂陷、快速裂陷和拗陷阶段。

寒武纪早期盆地原型呈继承性发展,钻井和露头剖面显示塔西台地上的玉尔吐斯组(C_{1y})主要是一套含磷的硅质岩、细晶白云岩组合。而塔东盆地内发育的西山布拉克组和西大山组($\text{C}_{1x}-\text{C}_{1xd}$)偶含磷,以硅质岩、泥岩为主,夹火山岩,白云岩含量较 C_{1y} 低得多。硅质岩的微量元素和稀土元素特征显示^[10], C_{1y} 沉积环境明显受上升洋流影响,而 $\text{C}_{1x}-\text{C}_{1xd}$ 主要与热水活动有关。结合盆地原型背景来看, C_{1y} 型含磷硅质岩-泥岩-碳酸盐岩组合主要与“营养型”被动大陆边缘的演化有关,而 $\text{C}_{1x}-\text{C}_{1xd}$ 型硅质岩-泥岩组合是裂陷槽拗陷阶段的产物(图1)。

寒武系沉积前的古构造格局正是裂谷差异演化的结果,塔东北地区裂陷中心向满加尔拗陷迁移逐渐导致了寒武纪西“台”东“盆”沉积格局的出现。寒武系底界(T_0 面)上、下地层接触关系反映在古构造格局控

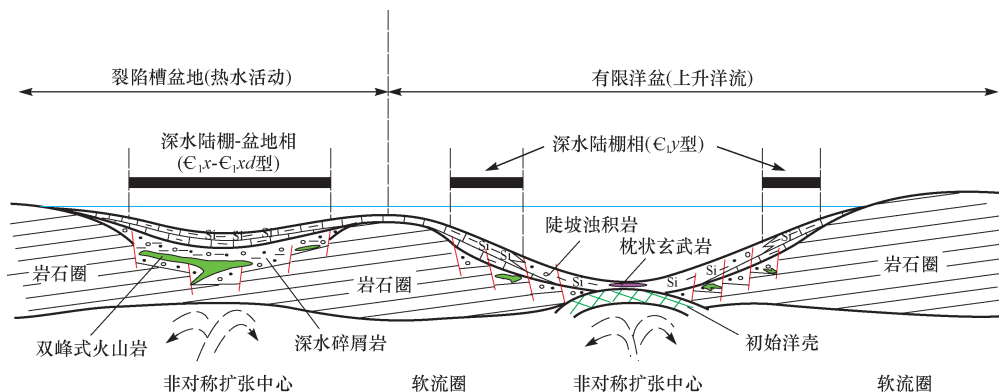


图1 塔里木震旦纪原型盆地与下寒武统烃源岩发育的关系

Fig. 1 Diagram showing relations between the Sinian basin prototype and the Lower Cambrian source rocks of the Tarim Basin

制下,下寒武统烃源岩的分布与下伏地层呈镜像对应^[23]。对于塔西台地而言,震旦系残余厚度越大,下寒武统烃源岩厚度越大,上震旦统白云岩保留越好,上覆烃源岩发育越有利,下震旦统碎屑岩、火山岩裸露地区,下寒武统泥页岩段厚度很小,变质基底的古隆起区都缺失下寒武统烃源岩。

2 寒武系沉积结构

寒武纪发生了多个海进-海退的变化(表1),玉尔吐斯组、西山布拉克组、西大山组和莫合尔山组是寒武系烃源岩发育的主要层位。下寒武统是在震旦纪末古地貌基础上发育起来的一套填平补齐沉积,原型盆地和沉积相带控制下的岩性组合具有较大变化。下寒武统底部玉尔吐斯组在柯坪露头是一套含磷硅质岩、泥岩和中-薄层泥质白云岩的岩性组合。星火1井在塔北隆起也揭示到这套地层,上、下地层组合在地震剖面上表现为平行-亚平行、强振幅、连续反射特征,地震相对比显示玉尔吐斯组广泛分布在塔北隆起、顺托果勒和塔中北坡一带。但是在巴楚隆起上的巴探5井、玛北1井,以及塔中隆起上的塔参1井均缺失玉尔吐斯组沉积,反映早期古隆起高地特征。玉尔吐斯组在巴楚隆起北缘发生相变,同1井表现为近岸的砂、泥岩组合,和4井一带揭示到潮坪相藻白云岩。塔东北库鲁克塔格地区出露的下寒武统底部西山布拉克组为一套硅质岩、泥岩夹火山岩的岩性组合,向上云质含量逐渐增高,尉犁1井、库南1井在孔雀河斜坡上也有所揭示。总体上看,自北而南、由东向西水体逐渐变浅,沉积向中央隆起带超覆、尖灭。

肖尔布拉克组及其上覆的中 - 上寒武统在塔里木盆地中、西部主要发育局限 - 蒸发台地相的膏盐岩 - 白

云岩组合,但是在盆地东部对应的西大山组-突尔沙克塔格组则为一套灰黑色灰质泥岩、泥质白云岩和泥灰岩互层的岩性组合,向上水体变浅。这套地层在岩性组合上的差异导致塔里木盆地的寒武系一直被认为具有西“台”东“盆”的沉积格局。事实上,早寒武世早期沉积格局还具有一定的特殊性,决定了下寒武统烃源岩的分布并不局限于东部的盆地相区。大量地震剖面显示塔里木盆地沉积结构经历了早寒武世缓坡到中-晚寒武世弱镶边台地沉积模式的演化过程(图2)。

塔里木陆块在早寒武世早期从腹部向东北方向依次展布内-中缓坡、外缓坡和盆地相。肖尔布拉克组沉积期内-中缓坡开始逐渐向台地相转化,出现了弱镶边的台地边缘-台缘斜坡的沉积结构,具楔状前积反射特征,并在海退背景下台地范围不断向东部扩展。中寒武世短暂海进之后又发生大规模的海退,以台缘建隆为主要特征,形成杂乱的丘状-楔状地震反射组合,在早期台缘斜坡之上发育低位域。晚寒武世晚期再次海进,先前的低位域之上又叠置了高位域沉积,地震反射呈弱连续的蚯蚓状。

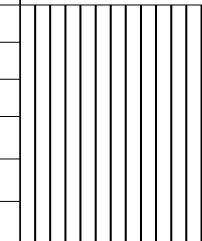
3 寒武系成烃生物特征

烃源岩中的成烃生物不仅是生烃的直接贡献者,同时也提供了烃源岩发育的沉积环境信息^[24-26]。连续的样品分析能深入了解成烃生物在时间和空间上的变化,进而约束烃源岩发育环境。钻井中烃源岩连续取心较少,因此分别选择柯坪和库鲁克塔格露头剖面对寒武系烃源岩的成烃生物进行系统研究。

在柯坪地区的苏盖特布拉克剖面,玉尔吐斯组黑色泥页岩段中成烃生物主要有底栖藻类残片、浮游藻类(光面球藻、小刺球藻、球状甲藻、团藻)和纹层状蓝

表1 塔里木盆地震旦系-寒武系地层序列

Table 1 Sedimentary succession and sequence stratigraphic framework of the Sinian-Cambrian in the Tarim Basin

系	统	地震界面	巴楚－塔中	柯坪－阿克苏	塔西南叶城	库鲁克塔格
奥陶系	中下统	T ₇ ⁸	鹰山组	鹰山组	博塔干组	黑土凹组
					坎迪里克组	
		T ₈ ⁰	蓬莱坝组	蓬莱坝组	恰特组	
寒武系	上统	T ₈ ¹	下丘里塔格群	下丘里塔格群		
	中统	T ₈ ³	阿瓦塔格组	阿瓦塔格组		莫尔山组
			沙依里克组	沙依里克组		
	下统	T ₉ ⁰	吾松格尔组	吾松格尔组		西大山组
			肖尔布拉克组	肖尔布拉克组		
			玉尔吐斯组	玉尔吐斯组		西山布拉克组
	震旦系	上统	T ₁₀ ⁰	奇格布拉克组		奇格布拉克组
						水泉组
下统		苏盖特布拉克组		苏盖特布拉克组	库尔卡克组	育肯沟组
					雨塘组	扎摩克提组

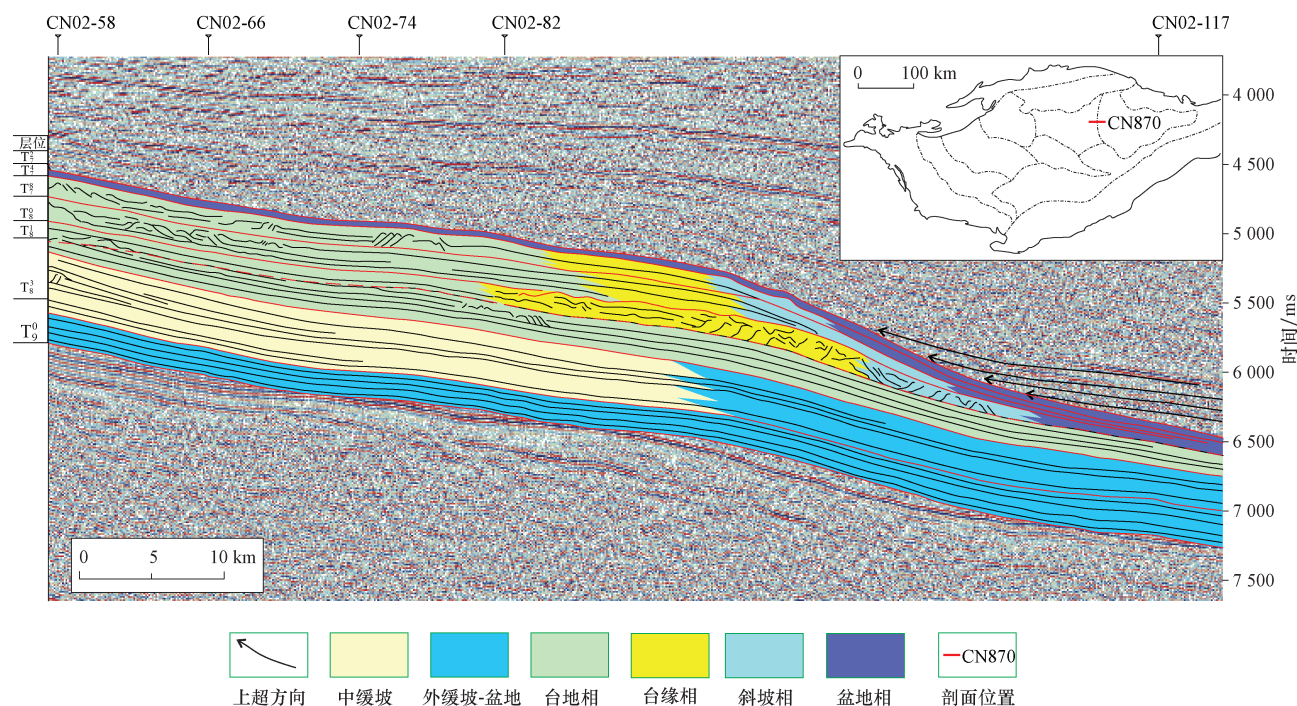


图2 满加尔坳陷西侧地震剖面反映的寒武系沉积结构演化特征

Fig. 2 Geologic interpretation of the Cambrian sedimentary evolution to the typical seismic section of the western Manerjia Sag (地震相特征: $T_9^0 - T_8^3$ 底部为平行反射, 连续性好, 向东均匀减薄, 反映了早期缓坡沉积结构, 中、上部为楔状的前积反射, 反映向弱镶边的台地边缘-台缘斜坡过渡; $T_8^3 - T_8^1$ 出现杂乱的丘状-楔状地震反射组合, 反映了大规模海退背景下台缘建隆的进积过程; $T_8^1 - T_8^0$ 早期低位域之上发育高位域, 呈弱连续的蚯蚓状。)

藻藻席。在个别样品中, 还发现有海绵骨针、介壳等动物残片。玉尔吐斯组底部以底栖藻为主, 仅含有少量浮游藻, 中部底栖藻类减少, 浮游藻类明显增多, 主要为球状甲藻和团藻, 上部以浮游藻类为主, 发育蓝藻形成的藻席, 见少量的底栖藻残片。成烃生物纵向发育具有从下向上底栖藻逐渐变少、浮游藻类逐渐增多的变化趋势, 反映了向上水体变浅的特征(图3)。

在库鲁克塔格地区的南雅尔当剖面, 下寒武统底部西山布拉克组的成烃生物类型多样, 底部主要以底栖藻类红藻、褐藻、叶藻为主, 中部开始出现詹氏似鼓囊甲藻, 宏观藻类逐渐减少, 顶部主要由蓝藻藻席和詹氏似鼓囊甲藻组成(图3)。西大山组与西山布拉克组整合接触, 成烃生物以浮游藻类为主, 含少量的底栖藻类碎片, 相对西山布拉克组出现了古胶甲藻, 具细胞壁的以单孢体和四孢体体制的绿藻开始繁盛, 球状结构不清晰的疑源类也开始出现。

突尔沙克塔格组和莫合尔山组的成烃生物组合都与西大山组类似(图3)。莫合尔山组以浮游藻类球状甲藻、单孢体绿藻和疑源类为主, 含少量的底栖藻类。突尔沙克塔格组以浮游藻类球状甲藻、单孢体绿藻和疑源类为主, 但线叶植物和底栖藻类的含量有所增加。

4 寒武系烃源岩沉积环境

现代海洋藻类研究表明^[27], 浮游藻类大部分漂浮生活, 生活在水体表层。在不同的海域, 浮游植物的组合及其属种也不一样, 但主要控制因素为藻体大小、营养组分和风浪强度。超微型浮游藻类个体小, 即使在营养贫瘠的海域, 依然能生长良好, 但对大型浮游藻类而言, 因不能够利用低浓度的营养物质, 所以数量极少。由于风浪的作用, 浮游藻类一般会聚集在近岸带, 但只有在氧化还原界面下的静水环境才能被保存下来。底栖藻类分布受水体深度的控制, 绝大多数生活在海岸带。红藻和褐藻一般生长在低潮线以下 30 ~ 60 m 的清水海区, 最深可生活在 200 m 深的海区。对于底栖藻的群落分布, 最主要决定因子是海浪、基质的情况和光的强度, 潮上带、潮间带和潮下带的种属是明显不一样的^[28]。

苏盖特布拉克剖面与南雅尔当山剖面成烃生物的演变与寒武纪海平面的变化具有一致的变化趋势。早寒武世最大海侵时, 玉尔吐斯组和西山布拉克组的底部均以底栖藻为主。随着海退的发生, 玉尔吐斯组上部和肖尔布拉克组下部, 以及西大山组和莫合尔山组浮游藻类的含量增加, 底栖藻类含量逐渐减少, 成烃生

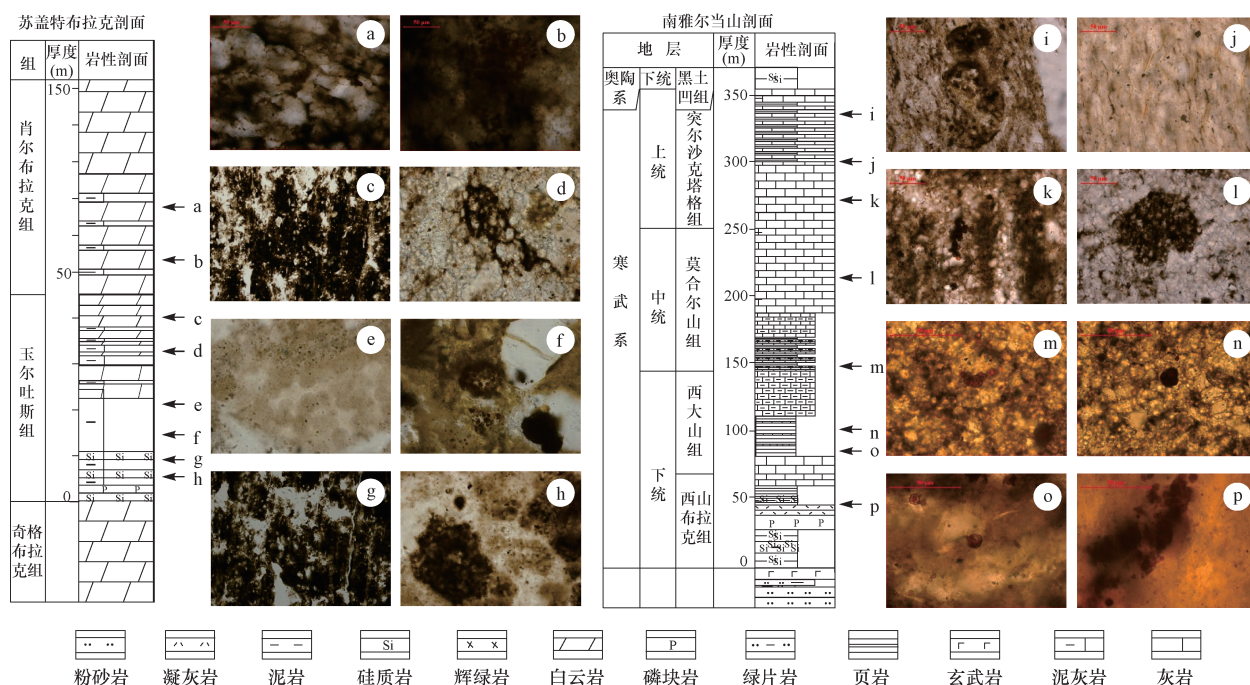


图3 塔里木盆地寒武系成烃生物组合特征

Fig. 3 Characteristics of bio-precursors of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin

a, b, e. 浮游藻球状甲藻; c, g. 底栖藻红藻残片; d. 底栖藻红藻; f. 浮游藻团藻; h. 底栖藻残片; i. 红藻囊果; j. 笔石; k. 浮游藻和藻席; l. 线叶植物; m, o. 浮游藻古胶甲藻; n. 浮游藻星球藻; p. 底栖藻叶藻

物组合的变化反映了海侵-海退序列的变化。烃源岩形成于低能、缺氧、有机质丰富的沉积环境,一般认为台内潟湖、深水陆棚和斜坡-盆地相是烃源岩发育的有利相区^[25],台缘斜坡和大陆斜坡坡度陡、范围小,重力流沉积常见,并不适宜有机质的保存。

海绵动物营固着底栖生活在洁净的弱-中等动荡水体^[27],钙质海绵动物主要生活在水深小于100 m范围之内,硅质海绵发育在滨海至半深海沉积环境。苏盖特布拉克剖面样品中杂乱无定向堆积着海绵骨针,亦见不到完整的化石,反映能量较高的快速堆积方式。另外在岩石矿物组成方面^[29],玉尔吐斯组以硅质和碳酸盐岩为主,粘土矿物含量小于50%。磷块岩矿物成分主要为胶磷矿,其次为磷灰石、石英和少量氧化铁。结构组分以砾屑为主,其次为砂屑和球粒,也说明相对高能的沉积环境。综合岩性组合、成烃生物和构造背景来看,玉尔吐斯组烃源岩应该主要发育于深水陆棚环境,具有富含底栖藻、有机碳丰度高的特征。在露头剖面获得的4块黑色碳质页岩样品的有机碳含量在13.89%~22.39%,平均高达17.99%。

西山布拉克组和西大山组岩石组合表现为硅质岩-页岩-泥质碳酸盐岩互层,矿物组成中石英含量高达75%,粘土矿物含量低于30%,碳酸盐岩矿物含量变化较大,含磷或不含磷。硅质岩为典型的热液成因^[29-30],下部生物相以底栖藻为主,向上过渡为底栖藻和浮游藻。这套烃源岩与玉尔吐斯组十分相似,但泥质含量更高一些,应该发育于深水陆棚环境的泥质

区。莫尔山组、突尔沙克塔格组岩石矿物组成中,碳酸盐岩矿物含量达75%以上,硅质岩和粘土矿物含量均小于15%。生物相以浮游藻类占优,沉积构造为纹层、薄层状,不发育重力流沉积,生物多样。高碳酸盐岩矿物含量及丰富的浮游藻类说明中-晚寒武世水体向上变浅,这套岩性组合发育在更靠近碳酸盐岩沉积的深水陆棚环境。

5 下寒武统烃源岩发育与分布

如前所述,塔里木盆地寒武系有效烃源岩主要发育于深水陆棚环境。在远离碳酸盐岩台地位置,受有限洋盆、裂陷槽扩张引起的上升洋流、热水作用的影响,主要沉积硅质岩、泥岩,底栖藻生物相占优势,发育高有机碳含量的烃源岩,称之为深水陆棚相泥质烃源岩。而近碳酸盐岩台地陆棚主要沉积泥质碳酸盐岩、灰泥岩,浮游藻类生物相占优势,有机碳含量相对较低,称之为深水陆棚相碳酸盐岩质烃源岩。同时,碳酸盐岩台地内也可能发育有效的潟湖相烃源岩,综合模式如图4所示。

海平面升降过程引起进积、退积的沉积变化,沉积相在纵向、横向上均发生迁移,形成交错、叠加的烃源岩分布特征。在早寒武世,海侵序列中塔里木盆地外缓坡-盆地相区广泛发育了玉尔吐斯组和西山布拉克组深水陆棚环境的泥质烃源岩(图5)。早寒武世中-晚期的海退序列中,在盆地西部的内-中缓坡基础上

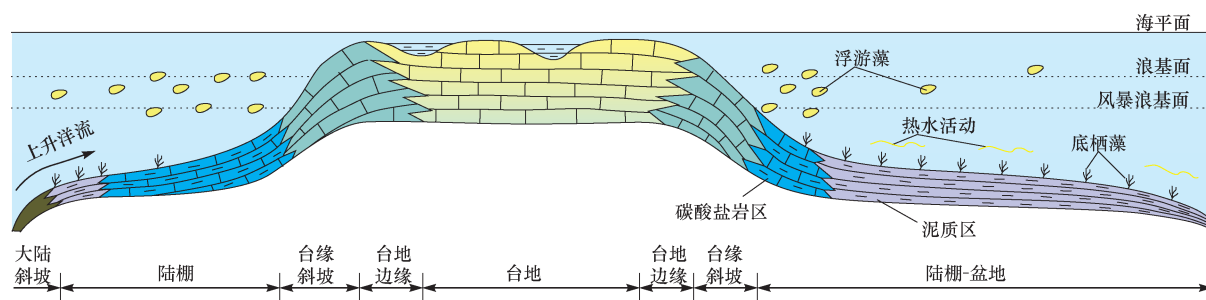


图4 塔里木盆地寒武系-奥陶系主要烃源岩发育模式

Fig. 4 Model showing development of source rocks in the Cambrian to Ordovician in Tarim Basin

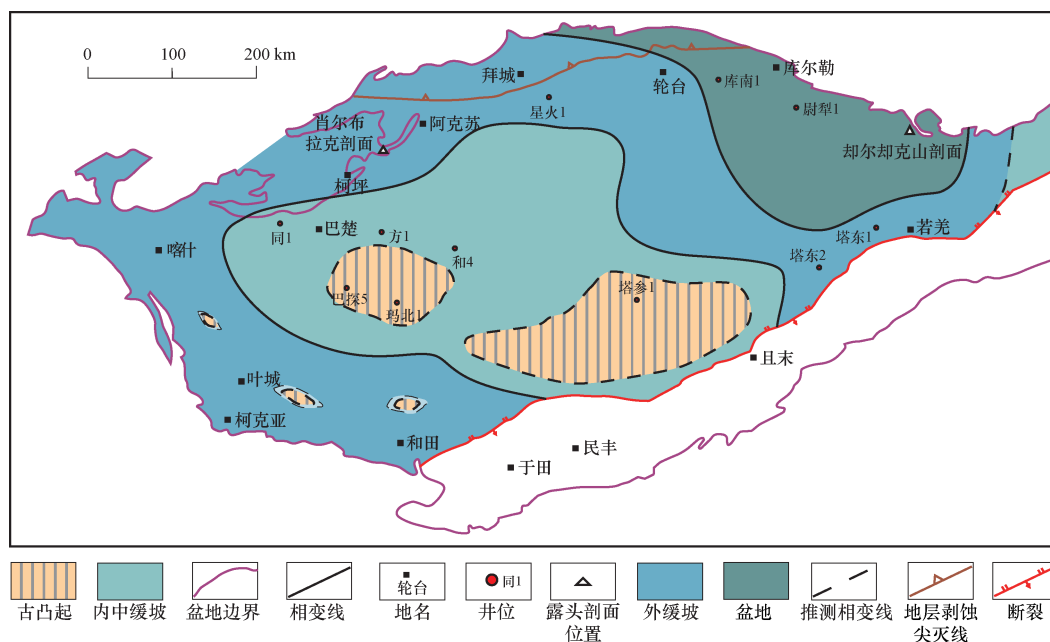


图5 塔里木盆地玉尔吐斯组沉积环境

Fig. 5 Sedimentary environment of the Yuertusi Formation in the Tarim Basin

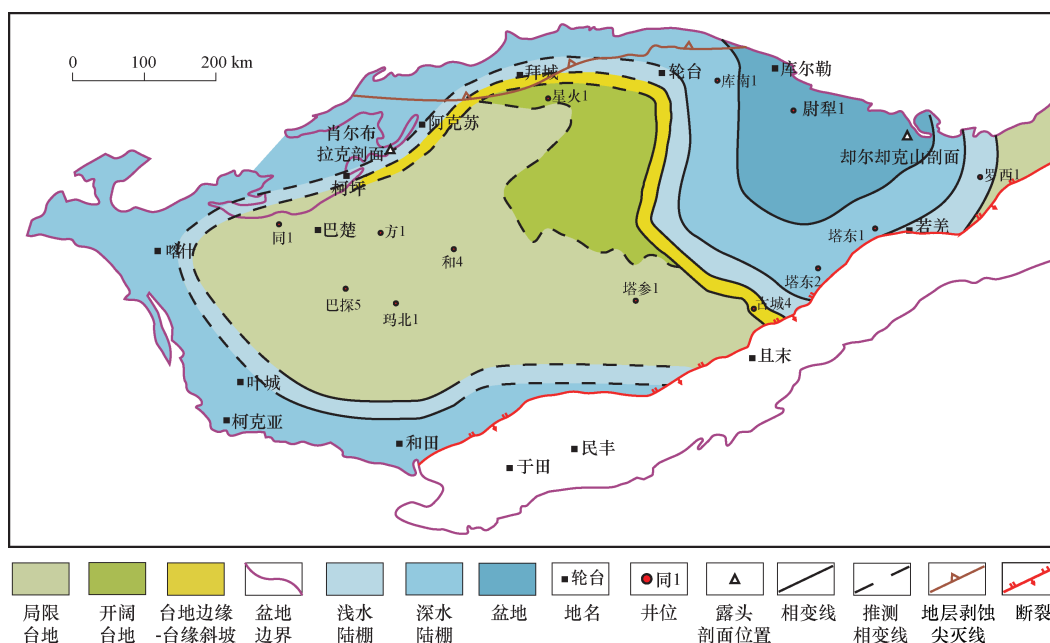


图6 塔里木盆地肖尔布拉克组下段沉积环境

Fig. 6 Sedimentary environment of the Lower Xiaoerbulake Formation in Tarim Basin

发育了肖尔布拉克组下段深水陆棚环境的碳酸盐岩烃源岩(柯坪地区出露的黑色薄层泥质灰岩),在盆地东部的中-外缓坡基础上也发育了西大山组深水陆棚环境的碳酸盐岩烃源岩(图6)。碳酸盐岩烃源岩的生、排烃效率问题一直存在较大争议,尽管现今看来以塔里木盆地寒武统底栖藻类为主的烃源岩的有机碳含量高于以浮游藻类为主的烃源岩,但是通过成烃生物组合约束下的烃源岩干酪根碳同位素与原油碳同位素对比研究发现(刘文汇等,另文发表),现今塔河油田原油来源与浮游藻类关系更为密切,说明以肖尔布拉克组下段浮游藻类为主的烃源岩可能具有重要的生烃能力。

6 结论与认识

1) 震旦纪-寒武纪裂谷差异演化控制了塔里木盆地寒武系沉积前的古构造格局,而后者是寒武系沉积结构及烃源岩发育的沉积环境的决定因素。寒武纪早期大规模海侵除巴楚、塔中地区发育基底隆起高地外,大部分地区接受了玉尔吐斯组或西山布拉克组沉积。寒武系沉积结构经历了早寒武世缓坡到中-晚寒武世弱镶边台地沉积模式的演化,在随后的海退沉积序列中沉积相带发生由西向东的迁移。

2) 塔里木盆地寒武系成烃生物主体为宏观底栖藻和浮游藻类。与盆地东部下寒武统西山布拉克组烃源岩一样,盆地西部下寒武统玉尔吐斯组-肖尔布拉克组下段烃源岩的成烃生物组合表现为由底栖藻类占优向浮游藻类占优的转变,与早寒武世海进-海退沉积序列相对应。此外,在盆地东部西大山组、莫合尔山组和突尔沙克塔格组烃源岩中,由下向上具有底栖藻类含量减少、浮游藻类逐渐增多的变化趋势,与沉积水体深度向上变浅的沉积序列基本一致。

3) 塔里木盆地寒武系烃源岩主要发育于深水陆棚环境,可进一步划分为陆棚相泥质烃源岩和陆棚相碳酸盐岩烃源岩,前者以底栖藻生物相占优势,后者以浮游藻类生物相占优势,海平面升降变化导致两类烃源岩具有叠加、交错的分布特征。在塔里木盆地西部地区,以浮游藻类为主的下寒武统碳酸盐岩烃源岩,如肖尔布拉克组下段成烃贡献可能很大,值得进一步关注。

参 考 文 献

- [1] 翟晓先,顾忆,钱一雄,等.塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J].石油实验地质,2007,29(4):329-333.
Zhai Xiaoxian, Gu Yi, Qian Yixiong, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in well Tashen 1, the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, 29(4): 329-333.
- [2] 顾忆,邵志兵,陈强路,等.塔河油田油气运移与聚集规律[J].石油实验地质,2007,29(3):224-230.
Gu Yi, Shao Zhibing, Chen Qianglu, et al. Oil migration and accumu-

- lation pattern in the Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, 29(3): 224-230.
- [3] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等.泥岩/页岩:中国元古宙-古生代海相沉积盆地主要烃源岩[J].地质学报,2013,87(7):905-921.
Chen Jianping, Liang Digang, Zhang Shuichang, et al. Shale and mudstone: Essential source rocks in the Proterozoic to Paleozoic marine basins in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(7): 905-921.
- [4] 金之钧.从源-盖控烃看塔里木台盆地油气分布规律[J].石油与天然气地质,2014,35(6):763-770.
Jin Zhijun. A study on the distribution of oil and gas reservoirs controlled by source/cap rock assemblage in unmodified foreland region of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 763-770.
- [5] 张宝民,张水昌,边立曾,等.浅析中国新元古-下古生界海相烃源岩的发育模式[J].科学通报,2007,52(增刊I):58-69.
Zhang Baomin, Zhang Shuichang, Bian Lizeng, et al. Initial discussion on the developmental model of Neoproterozoic-Lower Paleozoic marine source rocks in south China [J]. Science Bulletin, 2007, 52(S1): 58-69.
- [6] 赵宗举,周新源,郑兴平,等.塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J].石油学报,2005,26(3):10-15.
Zhao Zongju, Zhou Xinyuan, Zheng Xingping, et al. Evidences of chief source rock in Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2005, 26(3): 10-15.
- [7] 于炳松,樊太亮.塔里木盆地寒武系-奥陶系泥质烃源岩发育的构造和沉积背景控制[J].现代地质,2008,22(4):534-539.
Yu Bingsong, Fan Taijiang. Sedimentary-tectonic control on the development of muddy hydrocarbon source rocks of Cambrian-Ordovician from Tarim Basin [J]. Geoscience, 2008, 22(4): 534-539.
- [8] 高志前,樊太亮,李岩,等.塔里木盆地寒武系-奥陶系烃源岩发育模式及分布规律[J].现代地质,2006,20(1):69-76.
Gao Zhiqian, Fan Taijiang, Li Yan, et al. Development pattern and distribution rule of source rock of Cambrian-Ordovician in Tarim Basin [J]. Geoscience, 2006, 20(1): 69-76.
- [9] 高志勇,张水昌,张兴阳,等.塔里木盆地寒武-奥陶系海相烃源岩空间展布与层序类型的关系[J].科学通报,2007,54(1):70-77.
Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Zhang Xingyang, et al. Development pattern and distribution rule of source rock of Cambrian-Ordovician in Tarim Basin [J]. Science Bulletin, 2007, 54(1): 70-77.
- [10] 孙省利,陈践发,郑建京,等.塔里木下寒武统富有机质沉积层段地球化学特征及意义[J].沉积学报,2004,22(3):547-550.
Sun Xingli, Chen Jianfa, Zheng Jianjing, et al. Geochemical characteristics of organic matter-rich sedimentary strata in Lower Cambrian, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 547-550.
- [11] 云金表,金之钧,解国军.塔里木盆地古生界主力烃源岩分布[J].石油与天然气地质,2014,35(6):827-838.
Yun Jinbiao, Jin Zhijun, Xie Guojun. Distribution of major hydrocarbon source rocks in the Lower Palaeozoic, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 827-838.
- [12] 张水昌,金之钧,张宝民,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, Jin Zhijun, Zhang Baomin, et al. The relation between the Cambrian-Ordovician high TOC source rock development and paleoenvironment variations in the Tarim basin, western China;

- carbon and oxygen isotope evidence [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 459–466.
- [13] 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.
- [14] 漆立新. 塔里木盆地地下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.
- [15] Zhang C L, Li Z X, Li X H, et al. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: Age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(2): 167–179.
- [16] 刘函, 王国灿, 曹树钊, 等. 北阿尔金南华纪双峰式火山岩的发现及构造意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 12(5): 917–928.
- Liu Han, Wang Guocan, Cao Shuzhao, et al. Discovery of Nanhuaian bimodal volcanics in northern Altyn Tagh and its tectonic significance [J]. *Earth Sciences (Journal of China University of Earth Sciences)*, 2012, 12(5): 917–928.
- [17] 赵恒乐, 曹福根, 李佳, 等. 阿尔金红柳沟北南华纪火山岩地质特征及锆石 U–Pb SHRIMP 定年[J]. *西部探矿工程*, 2011, 23(9): 107–111.
- Zhao Hengle, Cao Fugen, Li Jia, et al. The zircon Shrimp U–Pb age of Nanhuaian volcanics in Northern Altyn Tagh[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2011, 23(9): 107–111.
- [18] Zhu W B, Zheng B, Shu L S, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the Precambrian Aksu blueschist terrane, northwestern Tarim, China: Insights from LA-ICP-MS zircon U–Pb ages and geochemical data [J]. *Precambrian Research*, 2011, 185(3): 215–230.
- [19] 周肖贝, 李江海, 傅臣建, 等. 塔里木西北缘南华纪—寒武纪构造背景及构造—沉积事件探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 900–910.
- Zhou Xiaobei, Li Jianghai, Fu Chengjian, et al. Discussions on the Cryogenian–Cambrian tectonic–sedimentary event and tectonic setting of northern Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 900–910.
- [20] 徐备, 寇晓威, 宋彪, 等. 塔里木板块上元古界火山岩 SHRIMP 定年及其对新元古代冰期时代的制约[J]. *岩石学报*, 2008, 12(12): 2857–2862.
- Xu Bei, Kou Xiaowei, Song Biao, et al. SHRIMP dating of the upper Proterozoic volcanic rocks in the Tarim plate and constraints on the Neoproterozoic glaciation [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 12(12): 2857–2862.
- [21] 杨海波, 高鹏, 李兵, 等. 新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征[J]. *新疆地质*, 2005, 23(2): 123–126.
- Yang Haibo, Gao Peng, Li Bing, et al. The geological character of the Sinian Dalubayi ophiolite in the west Tianshan, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(2): 123–126.
- [22] 钱一雄, 尤东华, 陈代钊, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克上震旦统苏盖特布拉克组层序界面与沉积相[J]. *地质科学*, 2011, 46(2): 1–10.
- Qian Yixiong, You Donghua, Chen Daizhao, et al. The stratigraphic and sedimentation analysis of Sugaitbulak Formation of the Upper Sinian at Xianerbulak of Aksu in Tarim Basin [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2011, 46(2): 1–10.
- [23] 杨鑫, 徐旭辉, 陈强路, 等. 塔里木盆地前寒武纪古构造格局及其对寒武统烃源岩发育的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1164–1171.
- Yang Xin, Xu Xuhui, Chen Qianglu, et al. Palaeotectonics pattern in Pre-Cambrian and its control on the deposition of the Lower Cambrian source rocks in Tarim Basin, NW China [J]. *Nature Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1164–1171.
- [24] 秦建中, 申宝剑, 陶国亮, 等. 优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价[J]. *石油实验地质*. 2014, 36(4): 465–472.
- Qin Jianzhong, Shen Baojian, Tao Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(4): 465–472.
- [25] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. *海油气地质*, 2009, 14(2): 1–19.
- Liang Diang, Guo Tonglou, Bian Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 3): Controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 1–19.
- [26] 殷鸿福, 谢树成, 颜佳新, 等. 海相碳酸盐烃源岩评价的地球生物学方法[J]. *中国科学(D辑)*, 2011, 41(7): 895–909.
- Yin Hongfu, Xie Shucheng, Yan Jiaxin, et al. Methods of geobiology in evaluation of marine carbonate source rocks [J]. *Scientia Sinica*, 2011, 41(7): 895–909.
- [27] 蔡雄飞, 顾松竹, 罗中杰. 陆棚环境与大陆斜坡环境的识别标志和研究意义[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(6): 10–14.
- Cai Xiongfei, Gu Songzhu, Luo Zhongjie, et al. The identification mark and research meaning of continental slope and shelf [J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(6): 10–14.
- [28] 福迪. 藻类学[M]. 罗迪安, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- Foday. Phycology [M]. Luo Di'an, translated. Shanghai: Shanghai Science Press, 1980.
- [29] 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等. 塔里木盆地下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.
- [30] 于柄松, 陈建强, 李兴武, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 59–66.
- Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, et al. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the Lower Cambrian in the northern Tarim Basin, northwest China: Implication for depositional environments [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 59–66.