

塔里木盆地沙雅隆起与柯坪露头 中上奥陶统地层对比及烃源岩分布

刘存革^{1,2}, 李国蓉¹, 罗明霞², 邵小明², 罗 鹏², 刘永立², 高利君²

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要:柯坪露头奥陶系地层是塔里木盆地大型碳酸盐岩台地的西延部分,两者经历了相同的沉积演化过程。以古生物资料为基础,通过碳同位素地层对比,认为沙雅隆起中奥陶统一间房组发育的中达瑞威尔阶碳同位素正漂移(MDICE)和上奥陶统良里塔格组内发育的凯迪阶早期古登伯格碳同位素正漂移(GICE),分别对应于柯坪露头萨尔干组下部和其浪组中下部的正漂移,推测其浪组上部存在加里东中期 II 幕构造运动的不整合面,不整合面之上的其浪组和印干组地层对应于沙雅隆起上奥陶统桑塔木组。受早—中奥陶世全球海平面上升的影响,塔里木盆地北部中下奥陶统台地东侧表现为陡坡,台地厚度向西北逐渐减薄,沙雅隆起西北地区和阿瓦提—柯坪北部地区属于斜坡—盆地沉积体系。萨尔干组海相烃源岩主要由达瑞威尔阶中晚期凝缩段沉积构成,结合露头和沙雅隆起钻井电性特征,认为该套烃源岩在阿瓦提和沙雅隆起西北地区也有分布。良里塔格组沉积时期,柯坪、塔中和沙雅隆起小型碳酸盐岩台地之间的凹陷是 GICE 对应的良里塔格组烃源岩有利发育地区。印干组烃源岩分布范围最广,在阿瓦提和沙雅隆起均有分布。

关键词: 萨尔干组; 中上奥陶统; 烃源岩; 柯坪断隆; 阿瓦提断陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE121.3⁴

文献标识码: A

Stratigraphic correlation and source rock distribution of the Middle–Upper Ordovician in the Shaya Uplift and Kalpin outcrop, Tarim Basin

Liu Cunge^{1,2}, Li Guorong¹, Luo Mingxia², Shao Xiaoming², Luo Peng², Liu Yongli², Gao Lijun²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration and Development, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Ordovician strata in the Kalpin outcrops are the westward extension of a large carbonate platform in the Tarim Basin, and they have experienced the same sedimentary evolution process as the basin. Based on biostratigraphy and carbon isotope stratigraphic correlation, the Middle Darriwilian Isotope Carbon Excursion (MDICE) of the Middle Ordovician Yijianfang Formation and the Guttenberg Isotope Carbon Excursion (GICE) of the Upper Ordovician Lianglitag Formation of the Shaya Uplift correspond to the positive excursions in the lower part of the Salgan Formation and the lower–middle parts of the Qilang Formation in the Kalpin outcrops, respectively. It was inferred that an unconformity of the second episode tectonic movement of the Middle Caledonian existed in the upper part of the Qilang Formation, and the Qilang and Yingan formations above the unconformity corresponded to the Sangtamu Formation of the Upper Ordovician in the Shaya Uplift. The eastern side of the Lower–Middle Ordovician platform in northern Tarim showed a steep slope due to the rise of global sea level in the Early–Middle Ordovician, and the platform thickness gradually thinned to the northwest. The northwestern Shaya Uplift and the Awat–northern Kalpin region belong to the slope to basin sedimentary system. The Salgan marine source rocks mainly comprise the condensed section of the middle–upper Darriwilian, and are distributed in the Awat and the northwestern Shaya uplift as indicated by the electrical characteristics of outcrops and drill cuttings. The depression between the small carbonate platforms of Kalpin, central Tarim and Shaya Uplift are favorable development regions of source rocks corresponding to GICE during the deposition of the Lianglitag Formation. The Yingan source rocks are most widely distributed in the Awat and Shaya uplift.

Key words: Salgan Formation; Middle – Upper Ordovician; source rock; Kalpin Fault Uplift; Awat Fault Depression; Tarim Basin

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2016-01-10。

作者简介: 刘存革 (1976—), 男, 高级工程师, 从事碳酸盐岩沉积与储层研究。E-mail: liucunge@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05005-004, 2016ZX05005-002) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2012CB214806) 资助。

塔里木盆地柯坪地区奥陶系露头剖面发育萨尔干组和印干组海相烃源岩,这2套烃源岩的分布范围,以及阿瓦提断陷是否生烃洼陷,对塔里木西部的勘探潜力评价具有重要意义。众多学者对这2套烃源岩开展了古生物^[1-3]、沉积相^[4-7]、地球物理响应^[7-8]、烃源岩地化特征^[9-11]等研究工作,认为柯坪地区中奥陶统大湾沟组、中上奥陶统萨尔干组和上奥陶统坎岭组对应于台盆区中奥陶统一间房组和上奥陶统恰尔巴克斯组,但上奥陶统其浪组和印干组与台盆区良里塔格组和桑塔木组的对应关系存在分歧^[2,7,12]。而且,除了古生物资料,其他的地层对比依据尚未见到报道。目前,普遍认为萨尔干组和印干组烃源岩在阿瓦提断陷内分布^[5,7],勘探前景较好^[5,13]。

本文以古生物资料为基础,应用碳同位素化学地层学,结合柯坪露头和沙雅隆起钻井电性资料,开展沙雅隆起井下和柯坪露头中—上奥陶统地层对比,在柯坪—阿瓦提和沙雅隆起奥陶系碳酸盐岩台地沉积演化背景下,探讨萨尔干组和印干组烃源岩的分布,以期对塔里木西部油气勘探评价提供借鉴。

1 柯坪与台盆区寒武—奥陶系沉积背景

柯坪块体与塔里木块体的关系、柯坪露头寒武—奥陶系碳酸盐岩台地是否盆地内大型碳酸盐岩台地的西延部分长期存在争论^[12,14-15]。舒良树等^[16]根据阿克苏900 Ma的洋壳玄武岩、700 Ma左右的高压蓝片岩带和蓝片岩基质的变质杂砂岩锆石年龄,认为柯坪块体属于新元古代洋壳块体,在700 Ma以来通过拼贴作用与塔里木块体聚合在一起。沙雅隆起西部XH1井揭示了下寒武统肖尔布拉克组和玉尔吐斯组、震旦系奇格布拉克组和苏盖特布拉克组以及前震旦变质岩^[17](图1),寒武—震旦系地层能够与柯坪地区相对比。因此,柯坪地区的寒武—奥陶系地层是盆地内大型碳酸盐岩台地向西延伸的一部分,两者经历了相同的沉积演化过程。

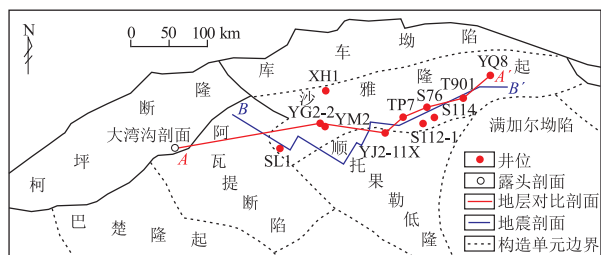


图1 塔里木盆地北部构造单元与钻井分布
Fig.1 Distribution of structural units and wells in the northern Tarim Basin

2 柯坪露头与沙雅隆起中上奥陶统地层对比

2.1 碳同位素地层对比

2.1.1 研究现状

由于海相碳酸盐岩碳同位素证明具有保存原始海水同位素组成的能力,碳同位素化学地层学已经广泛应用于区域或全球性碳酸盐岩地层对比研究^[18-20],且在奥陶系地层中识别出3个可全球对比的短期碳同位素正漂移:(1)中奥陶统达瑞威尔阶碳同位素正漂移(MDICE);(2)上奥陶统凯迪阶早期古登伯格碳同位素正漂移(GICE);(3)上奥陶统赫南特阶碳同位素正漂移(HICE)。MDICE和GICE普遍认为与有机质被大量埋藏有关^[21-25],而HICE与晚奥陶世赫南特期冰期和生物灭绝事件关系密切^[18,26]。

塔里木盆地奥陶系碳同位素地层学研究主要在柯坪和巴楚露头区开展^[27-30],因取样密度的差异,公布的碳同位素曲线略有差异,但总体趋势一致。台盆区因岩心资料少、不连续,碳同位素波动趋势、全盆及全球对比研究程度较低^[31-32]。

2.1.2 牙形石生物地层

柯坪露头和盆地内奥陶系生物地层研究较为详细,柯坪地区建立了相应的牙形石和笔石生物地层^[1-3],盆地内分地区建立了牙形石生物地层^[2]。柯坪大湾沟剖面大湾沟组岩性为浅灰、灰色中—薄层瘤状含泥质生屑泥晶灰岩,牙形石自下而上分为*Lenodus variabilis*-*Eoplacognathus crassus*带和*Eoplacognathus suecicus*带,时代为中奥陶统达瑞威尔期早期,与上覆萨尔干组整合接触。萨尔干组顶面以下2.81 m处为笔石*Nemagraptus gracilis*(Hall)的首现位置^[1],是中—上奥陶统的界限,该界线略高于通常使用的牙形石*Pygodus serra*带和*Pygodus anserinus*带的分界。沙雅隆起上S112-1井、S114井和T901井中上奥陶统地层中发现了中奥陶世达瑞威尔期牙形石*Pygodus serra*带、晚奥陶世桑比期早期牙形石*Pygodus anserinus*带和凯迪期早期牙形石*Belodina compressa*、*Belodina confluens*带(图2),这些典型的牙形石带能够与柯坪露头完全对比,与北美^[33-34]、南美^[25,35-36]以及欧洲^[19]等地区也存在较好的对比关系,为碳同位素地层对比提供了年代依据。

2.1.3 同位素正漂移对比

本次研究综合分析了沙雅隆起S112-1井、S114井和T901井岩心的全岩样品碳同位素数据,由于S112-1井和S114井距离较近(图1),将碳同

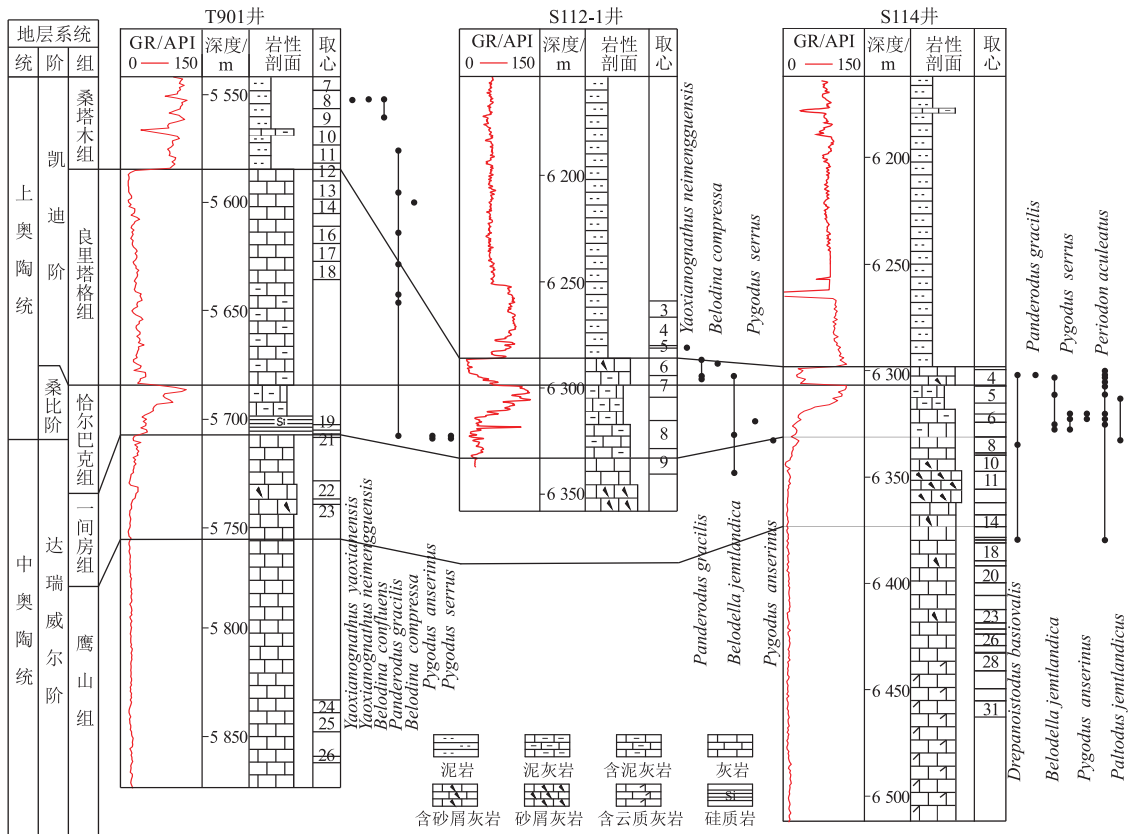


图 2 塔里木盆地沙雅隆起钻井中—上奥陶统岩性、牙形石对比

Fig.2 Comparison of Middle-Upper Ordovician lithology and conodonts in the Shaya Uplift, Tarim Basin

位素曲线拼接起来(图 3),代表良里塔格组厚度较薄地区中—上奥陶统碳同位素曲线,柯坪露头和全球大坪阶—凯迪阶碳同位素曲线引自前人公开发表的文献^[30,36]。从图 3 可以看出,S114 井在一间房组中上部,以及 S112-1 井在恰尔巴克组中部和恰尔巴克组顶部—良里塔格组上部分别发育 3 个碳同位素正漂移。T901 井反映了良里塔格组厚度较大地区的碳同位素曲线特征,该井在一间房组中部存在碳同位素正漂移的趋势,良里塔格组上部正漂移特征最为明显。

在牙形石生物地层的限定下,图 3 中 S114 井一间房组中上部碳同位素正漂移对应于中国南方、北美、南美和欧洲达瑞威尔期中晚期的 MDICE,与柯坪露头萨尔干组底部正漂移可以进行等时对比。S112-1 井中恰尔巴克组顶部至良里塔格组的正漂移对应于凯迪期早期的 GICE,与 T901 井、柯坪露头其浪组以及巴楚露头和塔中隆起良里塔格组^[29,32]中的正漂移可以等时对比。

T901 井良里塔格组上部—桑塔木组下部与柯坪露头其浪组—印干组碳同位素数据点连续分布(图 3),两者的曲线具有良好的相似性。在良里塔格组沉积末期,塔里木、华南和华北块体发生了一

次区域构造抬升事件^[37],在塔里木盆地称为加里东中期 II 幕构造运动。这期构造运动在沙雅隆起塔河地区表现最为典型,T901 井桑塔木组灰黑色泥岩直接覆盖在良里塔格组黄灰色微晶灰岩之上(图 2),存在明显的不整合;在塔河其他地区,部分钻井中良里塔格组被完全剥蚀,桑塔木组与恰尔巴克组或一间房组直接接触。因此,推测柯坪露头其浪组上部存在一个不整合面,不整合面之上的地层与印干组为连续沉积,对应于沙雅隆起上奥陶统桑塔木组。

在 S112-1 井中上奥陶统恰尔巴克组中部,桑比期早期牙形石 *Pygodus anserinus* 带内还发育一个正漂移(图 2,3),其波动幅度大于全球奥陶纪碳同位素曲线中相对应的波动,但该正漂移在露头曲线上不明显,可能是采样点较为稀疏的原因。在沙雅隆起西部 YM2 井区(图 1)有过此正漂移的报道^[31]。

在古海洋环境发生变化时,会造成生物大量死亡,其体内富含的¹²C 随即被埋入沉积物中,造成海水中的¹³C 相对富集,从而造成碳酸盐岩的碳同位素值变重^[25]。由于 MDICE 和 GICE 的成因与烃源岩关系较为密切,因此相同时期的盆地相区是有

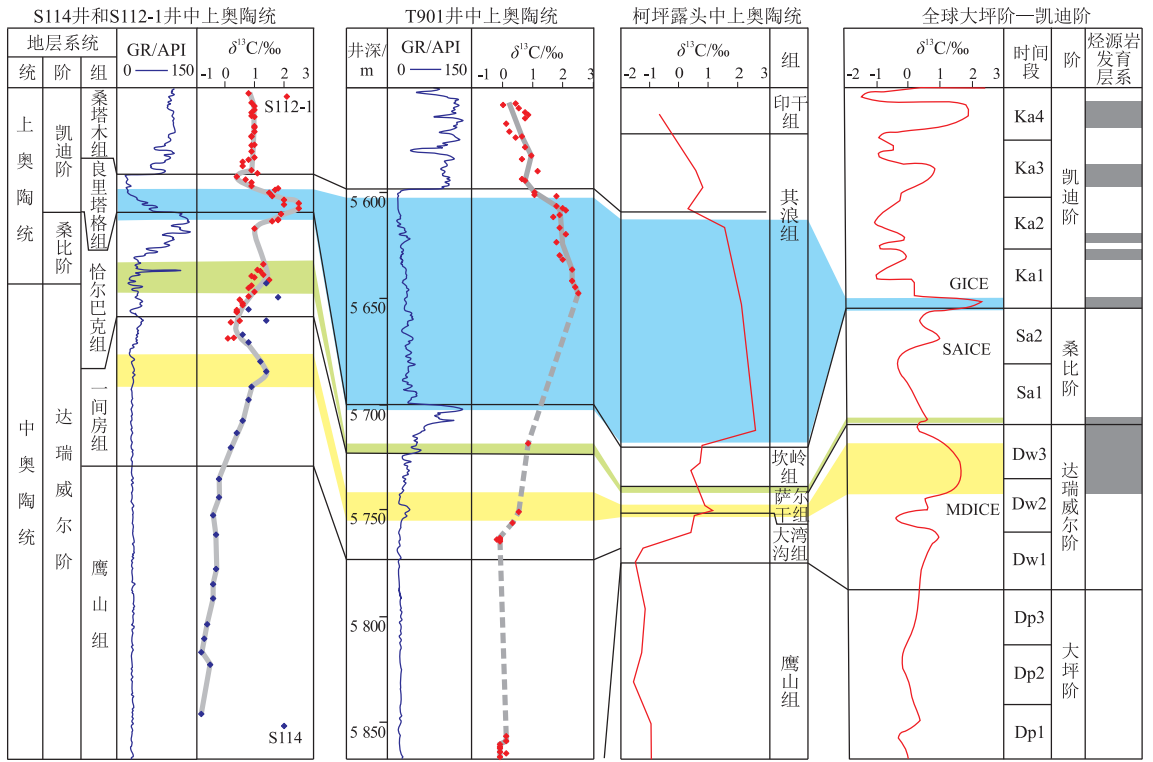


图 3 塔里木盆地沙雅隆起钻井与柯坪露头、全球中—上奥陶统碳同位素曲线对比

Fig.3 Carbon isotope curves of the Middle-Upper Ordovician from wells in the Shaya Uplift, the Kalpin outcrops and the world

利烃源岩的发育区(图 3)。

2.2 萨尔干组与恰尔巴克组地层对比

柯坪大湾沟剖面萨尔干组电性数据由前人使用便携式自然伽马能谱仪测量并公开发表^[8], 萨尔干组 GR 数值整体较高(图 4), 中上部为箱型特

征,底部为幅度较小的尖峰,两者对应的 U 元素数值表现为上高下低的特征。根据萨尔干组的生物地层划分方案^[1], 萨尔干组中奥陶统与上奥陶统的界线应在 GR 曲线箱型特征的顶部(图 4)。

恰尔巴克组在沙雅隆起奥陶系是一稳定的标

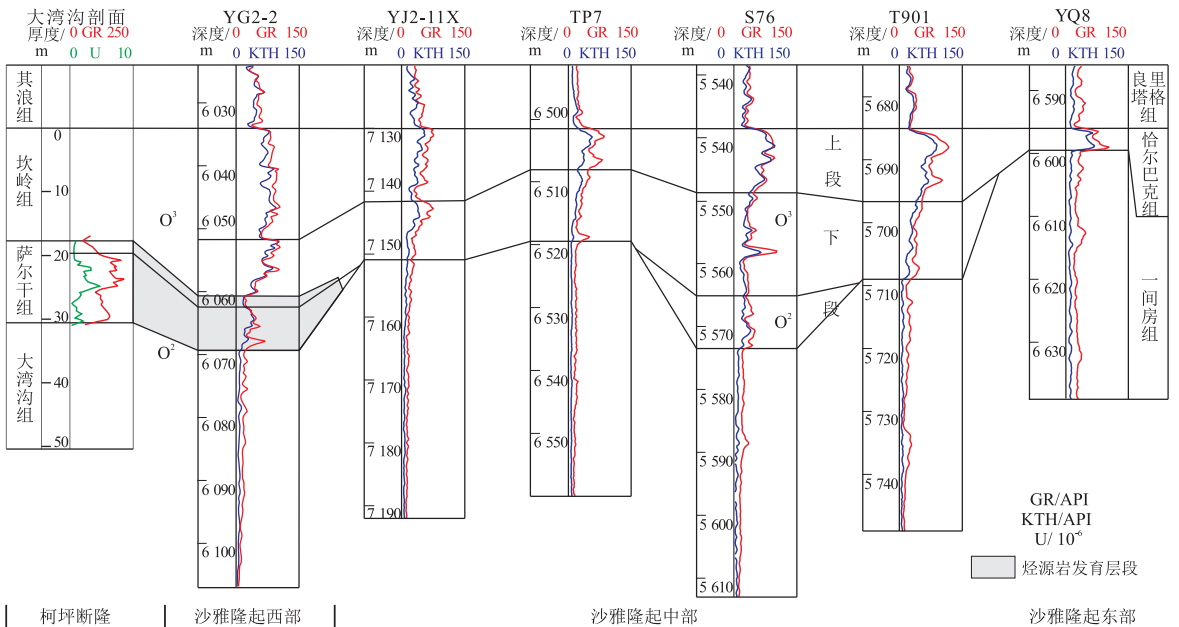


图 4 塔里木盆地柯坪大湾沟露头萨尔干组与沙雅隆起恰尔巴克组电性对比
露头与钻井对比线见图 1 中 AA'。

Fig.4 Electric properties of the Saergan Formation in the Dawangou outcrops in Kalpin and the Qiaerbak Formation in the Shaya Uplift, Tarim Basin

志层,根据岩性、电性特征可以分为 2 段(图 4)。上段岩性为红棕色瘤状灰岩、泥灰岩,与柯坪地区坎岭组中上部有较好的对比关系。上段电性特征在沙雅隆起较为稳定,GR 和 KTH 均较高,表现为箱型特征,厚度在沙雅隆起东部 YQ8 井区较薄,向西变厚(图 4)。

哈尔巴克组下段岩性为青灰色含泥微晶灰岩和含泥生屑微晶灰岩,泥质以条纹或条带状分布,底部多见海绿石。在沙雅隆起部分井中,如 S112-1 井和 S76 井(图 2,4),哈尔巴克组下段会出现一个刺刀状 GR 尖峰,主要是铀元素异常富集引起的^[38]。根据牙形石生物地层,GR 尖峰以下 5~6 m 是中—上奥陶统的界线(如 S112-1 井),界线下部仍发育几米至十几米厚的青灰色含泥微晶灰岩,应部分归到中奥陶统。哈尔巴克组下段厚度变化主要是受到沉积底形的控制^[38],在 YQ8 井区缺失下段沉积(图 1,4),反映出沙雅隆起东部地区在加里东中期 I 幕构造运动中位置较高。在沙雅隆起中部 TP7-S76-T901 井区(图 1,4),下段厚度变化比较大,泥质含量普遍偏低,厚度较大的地区会出现刺刀状的 GR 尖峰,存在中奥陶世末期的地层。

在 YJ2-11X 井和 YG2-2 井井区(图 1,4),哈尔巴克组下段上部 GR 和 KTH 曲线增高,出现钟形或箱型特征,反映出哈尔巴克组下段向西泥质含量

变重。根据沙雅隆起哈尔巴克组古生物数据和电性特征对比(图 2,4),下段上部泥质含量变高的地层时代为桑比期早期。YG2-2 井在哈尔巴克组底部 GR 曲线和 U 元素较高(图 4),与 S76 井相比泥质含量增加,时代为中奥陶世末期,可以与萨尔干组上部进行对比,推测可能发育较差烃源岩(图 4)。

3 奥陶纪碳酸盐岩台地演化与烃源岩分布

塔里木盆地早—中奥陶世碳酸盐岩台地为温暖、浅水的陆表海沉积环境,柯坪露头鹰山组发育有高能砂屑滩沉积^[4]。由于水深对碳酸盐岩生产速率具有明显的控制作用,早—中奥陶世全球海平面总体为上升趋势^[39],在沙雅隆起东部形成相对陡峭的台缘(图 5,6)。

从图 5 可以看出,东部台缘向西中下奥陶统厚度逐渐减薄,在阿瓦提断陷厚度最薄。图 6 则表现了塔里木盆地北部中下奥陶统厚度平面变化情况,东南部顺托果勒地区中下奥陶统厚度最大,超过了 700 ms;向西北方向逐渐减薄,阿瓦提断陷厚度最薄的地区小于 100 ms。塔里木盆地北部早—中奥陶世碳酸盐岩台地表现为不对称的形态,主要原因是海平面上升速率较快,沙雅隆起西北地区、阿瓦提至柯坪北部地区由于水深逐渐加深,碳酸盐岩生产速率逐渐降低,形成斜坡—盆地相沉积环境。

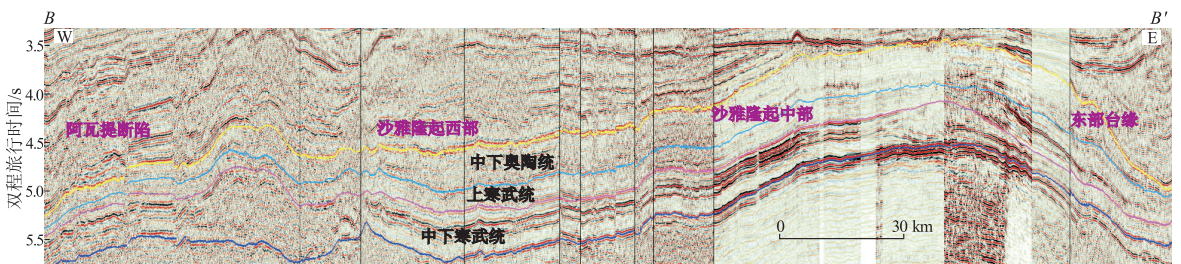


图 5 塔里木盆地北部东西向地震剖面
剖面位置见图 1 中测线 BB'。

Fig.5 WE seismic profile in the northern Tarim Basin

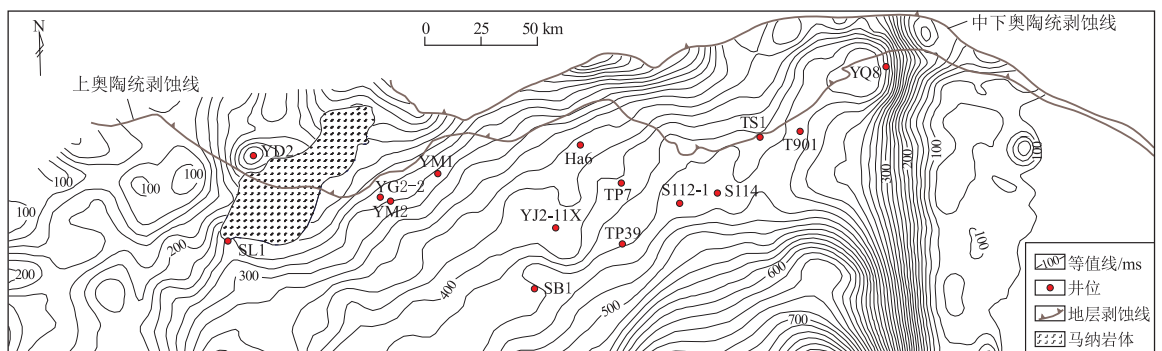


图 6 塔里木盆地北部中下奥陶统厚度(时间域)

Fig.6 Thickness of the Lower-Middle Ordovician in the northern Tarim (time domain)

在中奥陶统一间房组沉积晚期,相当于达瑞威尔期第3时间段的晚期(图3),塔里木盆地北部发生了加里东中期I幕构造运动^[40],持续时间较短,但塔里木盆地由伸展环境转变为挤压环境^[7]。该幕构造运动在沙雅隆起东部地区表现较为明显,YQ8井恰尔巴克组仅发育顶部沉积(图4)。加里东中期I幕构造运动发生后,全球海平面上升速率加快^[39],在桑比期中期达到顶峰,沙雅隆起东部浅水碳酸盐岩转变为淹没台地,而柯坪北部—阿瓦提和沙雅隆起西北地区由斜坡—盆地相完全转变为盆地相。萨尔干组主要沉积于中奥陶世达瑞威尔期2、3时间段(图4),而桑比期早期沉积的厚度较薄^[1,6],整体为滞留盆地内的凝缩段沉积^[4,6],而且伴随着全球性缺氧事件^[10]。根据萨尔干组在柯坪多个露头剖面分布情况^[6,7],其呈南西—北东向条带状分布在柯坪北部地区,向南在羊吉坎剖面相变为含泥质瘤状灰岩^[6]。因此,柯坪北部地区沉积环境中晚奥陶世与塔里木北部相似,萨尔干组烃源岩分布于阿瓦提—沙雅隆起YM2井区西部的广大地区。柯坪南部地区则受巴楚隆起碳酸盐岩台地的影响,萨尔干组沉积时期为斜坡或深水陆棚沉积环境。

桑比期末期全球海平面下降,凯迪阶良里塔格组沉积时期在塔里木盆地形成多个小型碳酸盐岩台地^[41],其中沙雅隆起良里塔格组为碳酸盐岩缓坡样式,近东西向展布,泥质含量高于塔中碳酸盐岩台地。此时期,柯坪地区其浪组也发育小型的碳酸盐岩台地,残留厚度与沙雅隆起良里塔格组碳酸盐岩台地相近(图4),推测柯坪部分地区在加里东I幕构造运动(或坎岭组沉积时期)发生了隆升,控制着其浪组碳酸盐岩台地的形成与演化。柯坪、塔中和沙雅隆起小型碳酸盐岩台地之间的洼陷是GICE对应的良里塔格组烃源岩有利发育地区。

在良里塔格组沉积末期,塔里木盆地发生了加里东II幕构造运动^[37],柯坪和沙雅隆起碳酸盐岩台地受到剥蚀改造。随后的海侵事件,造成塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩台地的彻底消亡,柯坪地区形成了印干组烃源岩。由于柯坪地区和沙雅隆起在上奥陶统良里塔格组沉积期沉积环境相似,阿瓦提断陷和沙雅隆起上应存在与印干组时代相同的烃源岩,分布范围大于萨尔干组和良里塔格组烃源岩。

4 结论

(1)柯坪地区奥陶系地层是塔里木盆地大碳酸盐岩台地西延部分,受早—中奥陶世全球海平面

上升的影响,塔里木盆地北部中下奥陶统台地东侧表现为陡坡样式,台地厚度向西北和阿瓦提地区逐渐减薄,沙雅隆起西北地区和阿瓦提—柯坪北部地区属于斜坡—盆地沉积体系。

(2)根据沙雅隆起和柯坪大湾沟剖面中上奥陶统碳同位素地层对比,沙雅隆起钻井中发育的MDICE和GICE分别对应于萨尔干组下部和其浪组的正漂移,推测其浪组上部存在加里东中期II幕构造运动不整合面,不整合面上部地层和印干组为连续沉积,对应于沙雅隆起上奥陶统桑塔木组。

(3)柯坪地区萨尔干组海相烃源岩主要由达瑞威尔期中晚期凝缩段沉积构成,在阿瓦提和沙雅隆起西北地区也有分布;良里塔格组沉积时期,柯坪、塔中和沙雅小型碳酸盐岩台地之间的洼陷是GICE对应的良里塔格组烃源岩有利发育地区;印干组烃源岩分布范围最广,在阿瓦提和沙雅隆起均有分布。

参考文献:

- [1] 陈旭,王志浩.上奥陶统底界全球辅助层型剖面在我国的确立[J].地层学杂志,2003,27(3):264-265.
Chen Xu, Wang Zhihao. Global auxiliary stratotype section of the Upper Ordovician in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(3): 264-265.
- [2] 赵宗举,赵治信,黄智斌.塔里木盆地奥陶系牙形石带及沉积层序[J].地层学杂志,2006,30(3):193-203.
Zhao Zongju, Zhao Zhixin, Huang Zhibin. Ordovician conodont zones and sedimentary sequences of the Tarim Basin, Xinjiang, NW China [J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(3): 193-203.
- [3] 陈旭,张元动,李越,等.塔里木盆地及周缘地块奥陶纪黑色岩系的生物地层学对比[J].中国科学:地球科学,2012,42(8):1173-1181.
Chen Xu, Zhang Yuandong, Li Yue, et al. Biostratigraphic correlation of the Ordovician black shales in Tarim Basin and its peripheral regions [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(8): 1230-1237.
- [4] 蔡忠贤,贾振远,肖立新.塔里木盆地北部早古生代早—中奥陶世一次典型的碳酸盐岩台地沉没事件[J].现代地质,1998,12(1):32-39.
Cai Zhongxian, Jia Zhenyuan, Xiao Lixin. A typical carbonate platform drowning event during Early-Middle Ordovician in north Tarim Basin [J]. Geoscience, 1998, 12(1): 32-39.
- [5] 顾忆,赵永强,贾存善,等.塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析[J].石油实验地质,2012,34(3):257-266.
Gu Yi, Zhao Yongqiang, Jia Cunshan, et al. Analysis of hydrocarbon resource potential in Awati Depression of Tarim basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 257-266.
- [6] 马璐,张智礼,王冠,等.塔里木柯坪地层区中—上奥陶统萨尔干组碳酸盐岩微相和古地理[J].微体古生物学报,2013,30(4):344-352.
Ma Lu, Zhang Zhili, Wang Guan, et al. Microfacies of the carbonates

- and palaeogeography of the Saergan Formation (Middle - Upper Ordovician), Kalpin stratigraphic region, Tarim, NW China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2013, 30(4): 344-352.
- [7] 高志勇, 张水昌, 李建军, 等. 塔里木盆地西部中上奥陶统萨尔干页岩与印干页岩的空间展布与沉积环境 [J]. *古地理学报*, 2010, 12(5): 599-608.
- Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Li Jianjun, et al. Distribution and sedimentary environments of Salgan and Yingan shales of the Middle-Upper Ordovician in western Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(5): 599-608.
- [8] 高志勇, 张水昌, 刘焯, 等. 新疆柯坪大湾沟剖面中—上奥陶统烃源岩高频海面变化与有机质的关系 [J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 232-240.
- Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Liu Ye, et al. Relationship between high-frequency sea-level changes and organic matter of Middle - Upper Ordovician marine source rocks from the Dawangou section in the Keping area, Xinjiang [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 232-240.
- [9] 马安来, 金之钧, 张水昌, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系烃源岩的分子地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2006, 35(6): 593-601.
- Ma Anlai, Jin Zhijun, Zhang Shuichang, et al. Molecular geochemical characteristics of Cambrian-Ordovician source rocks in Tarim basin, NW China [J]. *Geochimica*, 2006, 35(6): 593-601.
- [10] 王飞宇, 杜治利, 张宝民, 等. 柯坪剖面中上奥陶统萨尔干组黑色页岩地球化学特征 [J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(6): 687-689.
- Wang Feiyu, Du Zhili, Zhang Baomin, et al. Geochemistry of Salgan black shales of Middle-Upper Ordovician in Keping outcrop, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(6): 687-689.
- [11] 王庆涛, 卢鸿, 高黎惠, 等. 高成熟萨尔干页岩热模拟产气的地球化学特征 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 754-759.
- Wang Qingtao, Lu Hong, Gao Lihui, et al. Geochemical characterization of thermogenic gas during the simulation experiments of the mature Salgan shale [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 754-759.
- [12] 吴根耀, 李日俊, 刘亚雷, 等. 塔里木西北部乌什—柯坪—巴楚地区古生代沉积—构造演化及成盆动力学背景 [J]. *古地理学报*, 2013, 15(2): 203-218.
- Wu Genyao, Li Yuejun, Liu Yalei, et al. Paleozoic sedimento-tectonic evolution and basin dynamic settings in Wushi-Kalpin-Bachu area, northwest Tarim [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(2): 203-218.
- [13] 吕修祥, 李建交, 赵风云, 等. 塔里木盆地西部环阿瓦提凹陷区油气勘探前景再认识 [J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 10-14.
- Lü Xiuxiang, Li Jianjiao, Zhao Fengyun, et al. Re-cognition on petroleum exploration prospect of marine carbonates in western Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(3): 10-14.
- [14] 顾家裕, 张兴阳, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系台地边缘生物礁、滩发育特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 277-283.
- Gu Jiayu, Zhang Xingyang, Luo Ping, et al. Development characteristics of organic reef-bank complex on Ordovician carbonate platform margin in Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 277-283.
- [15] 李越, 黄智斌, 王建坡, 等. 新疆巴楚中—晚奥陶世牙形刺生物地层和沉积环境研究 [J]. *地层学杂志*, 2009, 33(2): 113-122.
- Li Yue, Huang Zhibin, Wang Jianpo, et al. Conodont biostratigraphy and sedimentology of the Middle and Upper Ordovician in Bachu, Xinjiang [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2009, 33(2): 113-122.
- [16] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆古块体的形成与演化 [J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 43-60.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The formation and evolution of ancient blocks in Xinjiang [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 43-60.
- [17] 朱传玲, 闫华, 云露, 等. 塔里木盆地沙雅隆起星火 1 井寒武系烃源岩特征 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(5): 626-632.
- Zhu Chuanling, Yan Hua, Yun Lu, et al. Characteristics of Cambrian source rocks in well XH1, Shaya Uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(5): 626-632.
- [18] Zhang Yuandong, Cheng Junfeng, Munnecke A, et al. Carbon isotope development in the Ordovician of the Yangtze Gorges Region (South China) and its implication for stratigraphic correlation and paleo environmental change [J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(1): 70-74.
- [19] Ainsaar L, Kaljo D, Martma T, et al. Middle and Upper Ordovician carbon isotope chemostratigraphy in Baltoscandia; A correlation standard and clues to environmental history [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 294(3/4): 189-201.
- [20] Metzger J G, Fike D A, Smith L B. Applying carbon-isotope stratigraphy using well cuttings for high-resolution chemostratigraphic correlation of the subsurface [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(8): 1551-1576.
- [21] Ludvigson G A, Witzke B J, González L A, et al. Late Ordovician (Turinian - Chatfieldian) carbon isotope excursions and their stratigraphic and paleoceanographic significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 210(2/4): 187-214.
- [22] Saltzman M R, Young S A. Long-lived glaciation in the Late Ordovician? Isotopic and sequence-stratigraphic evidence from Western Laurentia [J]. *Geology*, 2005, 33(2): 109-112.
- [23] Rosenau N A, Herrmann A D, Leslie S A. Conodont apatite $\delta^{18}\text{O}$ values from a platform margin setting, Oklahoma, USA; Implications for initiation of Late Ordovician icehouse conditions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 315/316: 172-180.
- [24] Pancost R D, Freeman K H, Herrmann A D, et al. Reconstructing Late Ordovician carbon cycle variations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 105: 433-454.
- [25] Sial A N, Peralta S, Gaucher C, et al. High-resolution stable isotope stratigraphy of the Upper Cambrian and Ordovician in the Argentine Precordillera; Carbon isotope excursions and correlations [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(1): 330-348.
- [26] Munnecke A, Zhang Yuandong, Liu Xiao, et al. Stable carbon isotope stratigraphy in the Ordovician of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1/4): 17-43.
- [27] 王宗哲, 杨杰东. 新疆柯坪地区早古生代地层的碳同位素变化特征及其意义 [J]. *地层学杂志*, 1994, 18(1): 45-52.

- Wang Zongzhe, Yang Jiedong. Features of the carbon isotope changes in the Early Palaeozoic rocks of the Kalpin area, Xinjiang and their significance [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1994, 18(1): 45-52.
- [28] 王大锐. 塔里木盆地中、上奥陶统烃源岩的碳同位素宏观证据 [J]. *地质论评*, 2000, 46(3): 328-334.
- Wang Darui. Macro-evidence of carbon isotopes for the Middle-Upper Ordovician source rocks in the Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 328-334.
- [29] 赵宗举, 潘文庆, 张丽娟, 等. 塔里木盆地奥陶系层序地层格架 [J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 175-188.
- Zhao Zongju, Pan Wenqing, Zhang Lijuan, et al. Sequence stratigraphy in the Ordovician in the Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 175-188.
- [30] 胡明毅, 钱勇, 胡忠贵, 等. 塔里木柯坪地区奥陶系层序地层与同位素地球化学响应特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(2): 199-205.
- Hu Mingyi, Qian Yong, Hu Zhonggui, et al. Carbon isotopic and element geochemical responses of carbonate rocks and Ordovician sequence stratigraphy in Keping area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrological et Mineralogica*, 2010, 29(2): 199-205.
- [31] 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 Zhijun, 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.
- [32] 张智礼, 李慧莉, 谭广辉, 等. 塔里木中央隆起区奥陶纪碳同位素特征及其地层意义 [J]. *地层学杂志*, 2014, 38(2): 181-189.
- Zhang Zhili, Li Huili, Tan Guanghui, et al. Carbon isotope chemostratigraphy of the Ordovician system in Central Uplift of the Tarim Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2014, 38(2): 181-189.
- [33] Young S A, Saltzman M R, Bergström S M, et al. Paired $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ records of Upper Ordovician (Sandbian-Katian) carbonates in North America and China: Implications for paleoceanographic change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 270(1/2): 166-178.
- [34] Bergström S M, Young S, Schmitz B. Katian (Upper Ordovician) $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy and sequence stratigraphy in the United States and Baltoscandia: A regional comparison [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(3/4): 217-234.
- [35] Edwards C T, Saltzman M R. Carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) stratigraphy of the lower-middle Ordovician (Tremadocian-Darriwilian) in the Great Basin, Western United States: Implications for global correlation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 1-20.
- [36] Albanesi G L, Bergström S M, Schmitz B, et al. Darriwilian (Middle Ordovician) $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ chemostratigraphy in the Precordillera of Argentina: Documentation of the Middle Darriwilian isotope carbon excursion (MDICE) and its use for intercontinental correlation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 389: 48-63.
- [37] 陈旭, Bergström S M, 张元动, 等. 中国三大块体晚奥陶世凯迪早期区域构造事件 [J]. *科学通报*, 2014, 59(1): 59-65.
- Chen Xu, Bergström S M, Zhang Yuandong, et al. A regional tectonic event of Katian (Late Ordovician) age across three major blocks of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(34): 4292-4299.
- [38] 刘存革, 李涛, 吕海涛, 等. 阿克库勒凸起中—上奥陶统地层划分及加里东中期第 I 幕古喀斯特特征 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 37(1): 55-63.
- Liu Cunge, Li Tao, Lü Haitao, et al. Stratigraphic division of Middle-Upper Ordovician and characteristics of the first episode karstification of Middle Caledonian in Akekule Uplift Xinjiang, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2010, 37(1): 55-63.
- [39] Thompson C K, Kah L C, Astini R. Bentonite geochronology, marine geochemistry, and the Great Ordovician Biodiversification event (GOBE) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 321/322: 88-101.
- [40] 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义 [J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 468-472.
- Yu Renlian. Characteristics and significance of the Caledonian karst in the Tahe Oil Field, the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(5): 468-472.
- [41] 刘嘉庆, 李忠, 黄君湊, 等. 塔里木盆地良里塔格组沉积环境差异及其对碳酸盐储层发育的制约 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(12): 1802-1816.
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Huang Juncou, et al. Distinct sedimentary environments and their influences on carbonate reservoir evolution of the Lianglitag Formation in the Tarim Basin, Northwest China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1641-1655.

(编辑 徐文明)