

# 塔里木盆地西北缘玉尔吐斯组硅质岩成因 及石油地质意义

杨程宇<sup>1,2</sup> 李美俊<sup>1,2</sup> 倪智勇<sup>1,2</sup> 杨福林<sup>1,2</sup> 陈昊卫<sup>1,2</sup>

(1.油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;2.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

**摘要** 塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组是一套岩性复杂的烃源岩,该组中出现了广泛分布的层状硅质岩。层状硅质岩的形成环境较为特殊,对层状硅质岩的成因研究有助于还原玉尔吐斯组沉积时期的沉积背景,从而预测优质烃源岩的分布。利用不同露头剖面的硅质岩样品,通过薄片鉴定、SEM观察、能谱探针、有机碳含量测定等无机—有机岩石学分析认为,玉尔吐斯组硅质岩形成于裂谷背景下的高盐度、碱性封闭水体中,沉积水体的水动力变化使硅质岩具有层状构造和碎屑结构。陆源碎屑、生物以及与裂谷作用同时发生的火山活动为水体提供了硅质来源,热液为封闭水体带来了营养物质,使藻类、小壳类生物在裂谷中生长繁盛;生物的生长富集和特殊水体的良好保存条件,使玉尔吐斯组发育了良好的烃源岩层。硅质岩的岩石学、地球化学特征显示,早寒武世拉张应力条件下的大规模裂谷作用,形成了大范围展布的台内裂陷,台内裂陷环境有利于优质烃源岩的发育,研究区早古生代—新元古代地层有良好的勘探潜力。

**关键词** 硅质岩 沉积环境 玉尔吐斯组 塔里木盆地

**第一作者简介** 杨程宇 男 1987年出生 博士研究生 成藏地球化学以及储层地质学 E-mail:962021308@qq.com

**通讯简介** 李美俊 男 教授 E-mail:meijunli@cup.edu.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标识码** A

## 0 引言

塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组<sup>[1]</sup>是一套岩性复杂的暗色泥岩、粉砂岩夹硅质岩沉积<sup>[2-4]</sup>。近年来随着盆地内油气勘探工作向深部发展,早古生代油气资源的勘探不断受到重视,前人对早古生代玉尔吐斯组的研究认为,该组可作为盆地内下古生界的优质烃源岩<sup>[5-8]</sup>。因此研究并解释玉尔吐斯组的成因,对预测盆地内下古生界烃源岩的分布,以及评价古生界、新元古界油气勘探潜力有重要意义。层状硅质岩是一类十分独特的岩石类型,往往代表了特殊的沉积—成岩环境。作为一类特殊的化学沉积岩,硅质岩的出现往往代表了地质变动引起的海平面剧烈变化,或者大规模构造活动引起的断裂和热液上涌等特殊环境,这使硅质岩隐含了特殊时期的地质信息;同时,特殊环境形成的硅质岩往往与大量有价值的矿藏伴生,硅质岩的研究对这些矿藏的勘探和开发有重要作用;硅质岩的形成还可能与硅藻等生物有关,藻类生物可以形成生油母质,对硅质岩的研究也能为烃源岩

的相关研究提供大量信息<sup>[9-12]</sup>。

层状硅质岩从25亿年前至今,都广泛的出现在沉积地层中<sup>[10]</sup>。关于其成因目前主要有三种观点,分别是热水沉积成因、生物成因以及海水—湖泊沉积成因。学者们通过观察和分析海底热柱喷流沉积,认为成分复杂深部热水从海底或者湖底的裂隙中喷出,与地表水接触后由于物理化学环境的剧烈变化产生硅质沉淀,形成了与大量热液矿物伴生,并在元素组成上符合热水沉积物特征的硅质岩<sup>[13-17]</sup>;海水中存在大量的硅藻类生物,生物的硅质骨架在深海形成大范围的硅藻土沉积,在浅海产生硅质结核以及富含硅质的叠层石<sup>[18]</sup>,这说明海洋生物在硅质循环中也扮演了重要角色<sup>[19-24]</sup>;另外,学者们发现在高盐度的碱性水体中,二氧化硅会发生直接或间接的沉淀,从而形成层状硅质岩并代表了特殊的沉积背景<sup>[25]</sup>。自80年代以来,国内学者对硅质岩的研究不断发展,尤其是对南方扬子地台以及青藏高原周边构造带古生代以来的硅质岩,进行了系统的岩石学、矿物学、地球化学研究,讨论了硅质岩不同的成因代表的沉积环境

特征,并通过多种地球化学分析手段发掘了硅质岩中所记录的地质信息<sup>[11-12]</sup>。

前人对玉尔吐斯组硅质岩进行了地球化学分析和研究,认为该硅质岩是海底热水成因硅质岩,由此推断玉尔吐斯组沉积环境为深海还原环境<sup>[26]</sup>;但也有学者通过研究硅质岩的结构构造特征,以及相邻层位岩性的变化和区域构造背景,认为硅质岩的沉积环境并不是深海,而是浪基面之上水动力较强的浅海—半深海<sup>[27-28]</sup>。由于盆地内钻揭寒武系的井很少,沉积环境研究的争议对玉尔吐斯组优质烃源岩的分布预测产生了阻碍。因此,综合分析硅质岩的成因和沉积过程以及沉积背景,对盆地寒武统优质烃源岩分布的预测尤为重要。本文通过对玉尔吐斯组硅质岩样品的显微观察、SEM 背散射电子成像及能谱和 X 衍射分析的手段,从岩石成分、结构以及自生矿物的角度,结合硅质岩的地球化学分析重新解释了其形成过程,并结合沉积背景对玉尔吐斯组优质烃源岩的分布进行了探讨。

## 1 研究区及样品

样品来自塔里木盆地西北缘图木舒克—阿克苏地区以及柯坪露头(图 1)的玉尔吐斯组。取样区为一系列北东走向的推覆构造体,是塔里木早古生代地层的主要出露区,可以观察到完整的古生代地层序列<sup>[29-30]</sup>,研究区内的玉尔吐斯组发育完整,厚度变化范围为 11~35 m。本文分析了肖尔布拉克剖面的 3 件样品、苏盖特布拉克剖面的 2 件样品和柯坪剖面的 1 件样品。其中 5 件样品为硅质岩,一件样品(5 号)为富含化石的含磷生物硅岩。

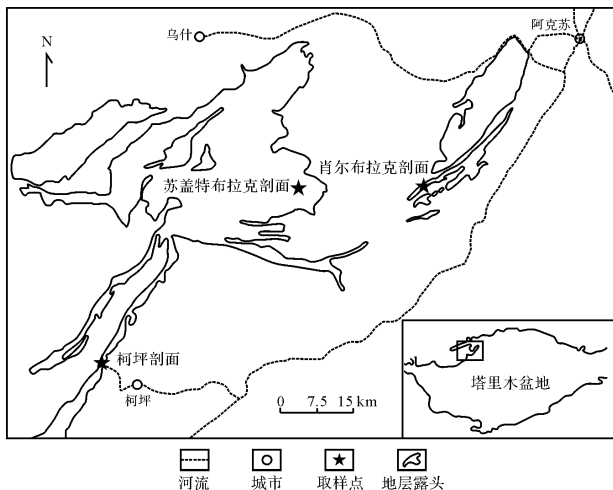


图 1 研究区及取样位置

Fig.1 Study area and sampling location

## 2 岩性特征

### 2.1 矿物组分及结构

硅质岩样品的主要矿物成分是石英,自生矿物主要有重晶石、方沸石(图 2),个别样品含有一些次要自生矿物,如铁质矿物和蒸发盐类矿物,(表 1)。

硅质岩具有典型的碎屑结构(图 2a)。颗粒主要分为硅质黏结的黏土矿物、有机质以及生物骨架,颗粒形态为砂屑、球粒、藻粒以及生物壳体(图 2a,b)(图 2e,f);颗粒之间充填石英、蛋白石等硅质胶结物、碳酸盐胶结物,以及重晶石、石膏、方沸石、铁质矿物等自生矿物(表 1)。颗粒间充填的硅质胶结物和重晶石、生物硅质岩中的碳酸盐岩胶结物都以充填孔隙的形式出现(图 2a,b),而石膏以及铁质矿物则以充填裂缝的形式出现(图 2c,d)。

### 2.2 有机质和化石

研究区硅质岩样品有机碳(TOC,%)含量总体较高,不同剖面的样品 TOC 含量差别较大(表 1)。肖尔布拉克剖面的 3 个样品 TOC 较低;苏盖特布拉克剖面 and 柯坪的样品 TOC 很高,取自这两个剖面的 3 块样品 TOC 都在 2% 以上,尤其是苏盖特布拉克剖面的生物岩,TOC 含量最高可达 2.27%。

TOC 含量和观察到的岩石颗粒组分对应,TOC 含量高的样品颗粒颜色也较深,其中还可见到具有生物壳体的颗粒(图 2e)。生物岩中观察到生物碎屑,可以识别出大量的生物壳体和藻格架(图 2f);探针能谱分析表明,生物骨架以及藻粒薄膜的主要的骨架成分均为磷灰石,这说明高含磷脂的壳类和藻类生物是玉尔吐斯组底部沉积期的主要生物类型<sup>[31-32]</sup>。

## 3 硅质岩成因

### 3.1 沉积过程

研究区硅质岩中的二氧化硅来源主要有三方面,首先玉尔吐斯底部硅质岩中有泥岩以及少量粉砂岩夹层,碎屑组分中有石英、长石颗粒等硅质矿物,硅质矿物的溶解可以为沉积水体提供一定量的二氧化硅,但是这些二氧化硅总量十分有限,不可能形成大面积分布的层状硅质岩;其次,前人研究的结果显示,玉尔吐斯组硅质岩中热液作用的化学特征十分明显<sup>[26-27]</sup>,同时大量粒间充填的重晶石也是热液作用的证据,所以火山作用影响下的热液活动提供的二氧化硅是玉尔吐斯组硅质岩的物源之一<sup>[33-34]</sup>,但研究区所采集的样品以及前人的研究中,均未发现火山碎

表1 各样品X衍射分析及TOC含量测定

Table 1 XRD and TOC analysis of all the samples

编号	岩性	剖面	成分/%										TOC /%	
			石英	方沸石	重晶石	石膏	石盐	赤铁矿	方解石	铁白云石	菱铁矿	黄铁矿		
1	硅质岩	肖尔布拉克	95.5	2.1	2.4									0.505
2	硅质岩	肖尔布拉克	93.3	3.2	3.5									0.24
3	硅质岩	肖尔布拉克	92.4	3.6	4									0.41
4	硅质岩	苏盖特布拉克	63.1	5.9	6.5	17.1	1.7	5.7						2.14
5	含磷生物硅质岩	苏盖特布拉克	61.5		6.7					2.2	5.1	11.2	13.4	2.27
6	硅质岩	柯坪	89.4		10.6									2.03

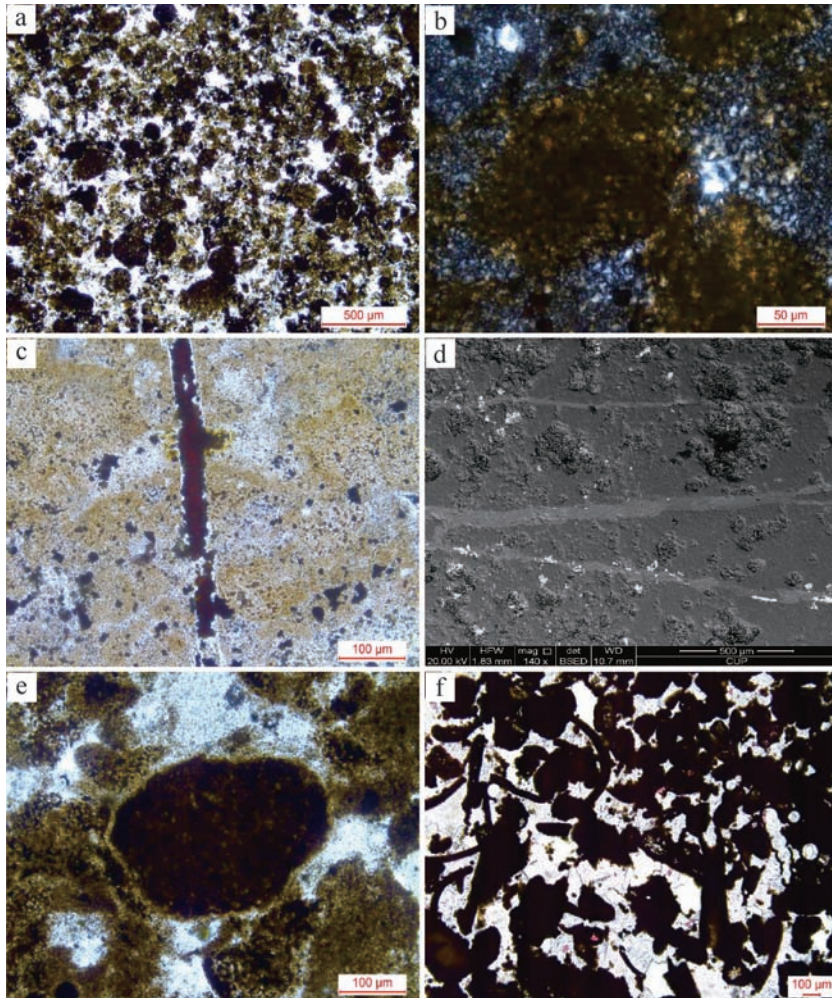


图2 硅质岩石组分显微照片

a. 6号样品薄片照片,具碎屑结构的硅质岩,暗色部分为富含有机质及黏土的硅质黏结颗粒,浅色部分为充填物,(-); b. 2号样品薄片照片,暗色的颗粒周围可见细小的亮色蛋白石、微晶石英胶结物,(+); c. 3号样品薄片照片,暗色铁质矿物充填裂缝(-); d. 4号样品 SEM 照片,白色部分为重晶石,浅灰色脉体为石膏脉体,深灰色为硅质岩基质; e. 4号样品薄片照片,深色部分为藻颗粒,亮色部分为充填物,深色颗粒周围包裹灰色磷灰石质生物膜(-); f. 5号样品薄片照片,生物硅质岩生物颗粒,深色部分为生物碎屑,亮色部分为亮晶胶结物(-)。

Fig.2 Components of siliceous rocks

屑组分,这表明研究区硅质岩中的二氧化硅并不是直接来源于火山物质,硅质岩与泥岩互层的产状,也说明牵引流水体而不是喷流水体对硅质岩沉积的控制,

因此虽然火山作用可以提供大量的二氧化硅,但是研究区的硅质岩是火山物质溶解后再沉淀,而不是直接沉积的结果;另外,研究区出现了生物硅质岩和部分

高 TOC 含量的硅质岩,这表明生物提供的二氧化硅也可能是研究区硅质岩的物源之一,但不同剖面硅质岩 TOC 和生物化石含量的较大差异也同样说明,生物供给的二氧化硅不是研究区硅质岩的唯一来源。

虽然在现代大部分地表水体中二氧化硅的溶解度很低,直接形成沉淀硅质岩很少,但二氧化硅的溶解度在碱性环境中会急剧增大<sup>[35]</sup>,同时水体中的其它离子浓度<sup>[36]</sup>以及温度<sup>[37-39]</sup>都会对二氧化硅的溶解度产生显著影响<sup>[40]</sup>。因此寒武纪早期海水性质的变化和环境的改变,可能会导致比现今更大范围和强度的二氧化硅的溶解和沉淀<sup>[41]</sup>。国外学者研究了东非的碱性盐湖,认为咸水湖水中溶解的 SiO<sub>2</sub> 浓度可高达 2 700 mg/L,高含 SiO<sub>2</sub> 的碱性水体由于蒸发作用使非晶质 SiO<sub>2</sub> [NaSi<sub>7</sub>O<sub>13</sub>(OH)<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O] 的沉积,而后再经长期脱水、脱钠,先形成硅酸钠凝胶然后转变成蛋白石构成的硅质岩<sup>[42]</sup>。硅质岩样品 X 衍射分析发现了方沸石(表 1),但是在胶结物中都没有观察到明显的自生方沸石晶体。因此,细小方沸石可能包含在沉积颗粒中,方沸石体现了沉积期高盐度强碱性碱水体中含钠矿物对硅质岩形成的影响<sup>[43]</sup>。

硅质岩的岩石结构,与典型的颗粒碳酸盐岩十分相似(图 3a,b)。前人对颗粒碳酸盐岩的研究表明,碳酸盐岩中颗粒和球粒,属于盆内碎屑沉积物或者化学沉淀物,是碳酸盐碎屑颗粒在海浪的淘洗和搬运作用下,分选和磨圆得到改善最后形成了颗粒状的碎屑<sup>[44]</sup>,或者是水中的黏土等质点被碳酸盐矿物黏结形成颗粒<sup>[45]</sup>。颗粒骨架形成之后,胶结物和自生矿物充填颗粒间空隙,最终形成颗粒碳酸盐岩沉积物<sup>[46-47]</sup>。研究区硅质岩的明显碎屑结构与颗粒碳酸盐岩的对比,说明硅质岩的沉积过程和正常水体中的碳酸盐岩相同,水体中溶解的二氧化硅可能是在不同水动力控制下沉淀,最终形成了具有层状构造和碎屑结构硅质岩。

综上所述,研究区硅质岩中的二氧化硅来源多样,陆源硅质碎屑、火山物质以及生物都对硅质岩的形成有所贡献。不同来源的二氧化硅溶解在高盐度的碱性水体中,随着海平面的升降和水质性质的变化,在不同的水动力条件下形成了层状构造和碎屑结构的硅质岩沉积。

### 3.2 沉积背景

硅质岩样品中充填粒间空隙的主要自生矿物是重晶石和少量的石膏、铁质矿物,而生物岩中除了充填生物颗粒之间的重晶石以外,还有充填裂缝的白云

石(图 3d)。重晶石是典型的热液矿物,可能来自于火山活动或者深部热液<sup>[48-51]</sup>。样品中的重晶石均以充填孔隙以及早期张性裂缝的形式出现(图 3e,f),通过矿物之间相互关系可以判断,重晶石的沉淀早于其它充填孔隙的矿物(图 3c)。这说明硅质颗粒沉积期或者成岩早期重晶石就已经开始沉淀。不同样品中的重晶石含量有明显差异,但整体表现出较好的成层性,重晶石的分布和原始孔隙分布有密切的关系(图 3e,f)。颗粒形态好,碎屑结构清晰的 4 和 6 号样品以及 5 号生物岩样品中,重晶石含量较高而且分布相对较均匀,而其余 3 块样品重晶石含量低且分布不均匀。白云石主要出现在 5 号生物岩样品中,普遍有晶粒粗大、晶格弯曲、波状消光的特征,并伴生黄铁矿,这样的矿物组合在很多地区的海底低温热水沉积,以及地层热液沉淀中都有发现,是典型的热液矿物系列<sup>[52-54]</sup>。白云石有较明显的裂缝—孔隙式的充填特征,并且交切和交代重晶石(图 3d),具有同样特征的自生矿物还有石膏和铁质矿物(图 2c,d)。因此,重晶石和白云石这两种成分、产状差异很大的自生矿物可能代表了两次不同的热液作用的影响。

自寒武纪以来,塔里木盆地经历了多其次广泛而强烈的火山活动<sup>[55-57]</sup>,其中震旦纪—早寒武世和二叠纪的两次强构造运动,对盆地古生代地层的影响最大。第一次构造运动发生时期正是玉尔吐斯组硅质岩的沉积期,硅质岩中充填的重晶石代表了这一次构造运动造成的热液活动,对沉积期和早成岩期的硅质岩造成了影响。第二次构造运动发生时,玉尔吐斯组硅质岩已经固结成岩,岩石十分致密并且发育了构造裂缝,因此这次构造运动导致的热液活动,形成了以充填裂缝为主要产状的白云石系列矿物。

玉尔吐斯沉积时期塔里木盆地开始受强烈拉张作用形成陆内裂谷<sup>[58-61]</sup>,裂谷内部形成的陆内湖盆以及狭窄的海盆,均有环境封闭的特点,这些封闭的水体逐渐形成了高盐度和高碱性的化学环境。裂谷作用同时伴随着强火山活动,火山活动的影响加剧了水质性质的变化并为水质提供了一定量的二氧化硅,同时火山活动造成了沉积水体和地层水中大量重晶石的出现。

因此,玉尔吐斯组底部硅质岩沉积期,研究区保持了裂谷作用的背景,裂谷作用导致了水质性质的改变<sup>[62]</sup>,而特殊的水体使多种来源的二氧化硅发生了溶解—沉淀的循环过程,在整个裂谷作用区域内形成了大范围分布的硅质岩沉积。

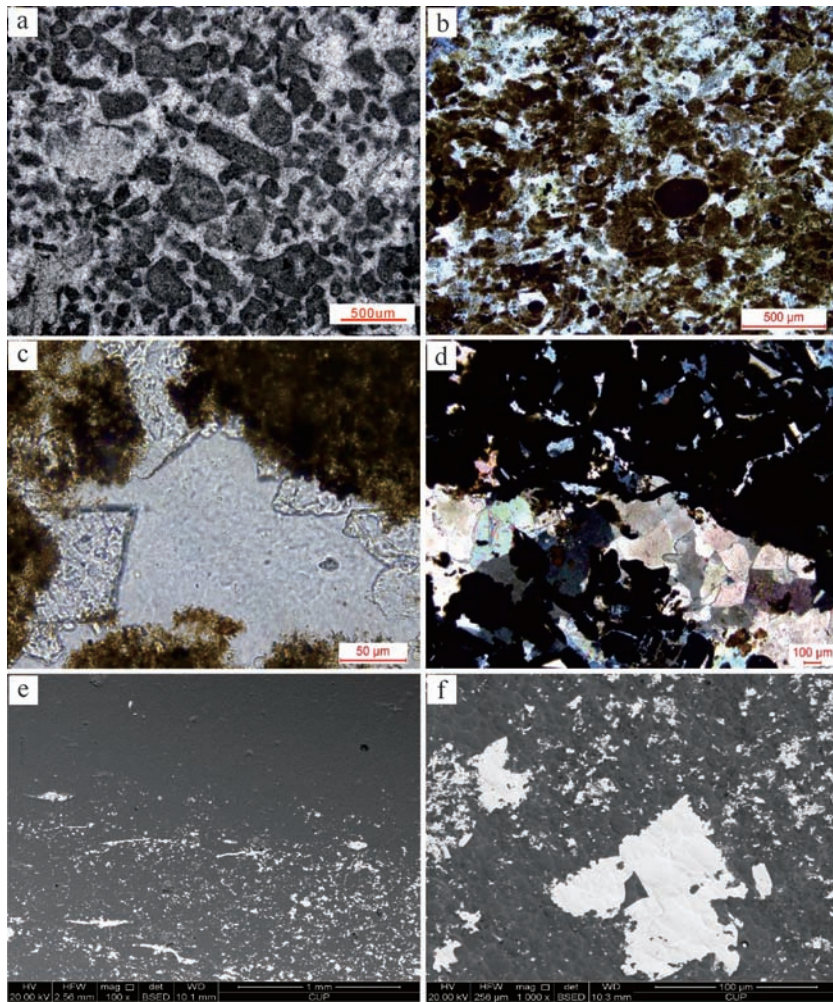


图3 硅质岩结构及自生矿物显微照片

a.柯坪剖面奥陶系鹰山组露头样品薄片照片,亮晶砂屑—球粒灰岩(-);b.4号样品薄片照片,具碎屑结构的硅质岩(-);c.6号样品薄片照片,深色部分为硅质颗粒,高凸起自形浅色晶粒为重晶石,中间大面积低凸起浅色部分为硅质胶结物(-);d.5号样品薄片照片,黑色部分为生物碎屑,灰色部分为重晶石,中间较宽脉体中为鞍状白云石(+);e.1号样品 SEM 照片,白色部分为重晶石,基质部分为硅质;f.4号样品 SEM 照片,白色部分为重晶石,基质部分为硅质。

Fig.3 Structure and authigenic mineral of siliceous rocks

## 4 有机质及石油地质意义

虽然不同剖面的样品有机质丰度差距较大,但硅质岩样品的有机质丰度整体较高(表1)。高盐度、高碱性环境本来并不适于生物生存,但在研究区高有机质丰度的硅质岩中,却发现了大量的生物颗粒,而且有机质丰度较高的硅质岩中重晶石的含量也偏高。由于重晶石的沉淀和热液作用关系密切,所以重晶石富集的样品可能受到了更强的热液作用的影响。热液中所富含的矿物质十分丰富,这些矿物质可以为封闭水体补充营养成分,造成局部的生物繁盛,而封闭的水体环境有利于有机质的保存<sup>[63-65]</sup>,因此台内裂

谷成为了烃源岩的有利发育区,为深部大型油气田的形成创造了良好的条件<sup>[66-67]</sup>。

## 5 结论

玉尔吐斯组是一套在裂谷背景下,在台地内发育的富有机质硅质岩沉积。硅质岩在裂谷作用所控制形成的高盐度碱性水体中直接沉积,并受到水体的改造形成了具有层状构造和碎屑结构的硅质岩沉积。

硅质岩的形成是裂谷背景下,封闭水体的化学作用以及多种二氧化硅来源共同作用的结果。封闭高盐度碱性水体为硅质的溶解和沉淀提供化学条件,而陆源碎屑、火山作用以及生物为硅质岩提供了多种氧

化硅来源。

裂谷背景下形成的硅质岩沉积物中有较高含量的有机质,热液提供的营养物质和封闭水体良好的保存条件,使台内裂谷中发育了优质烃源层。早古生代拉张作用形成了大范围的台内裂谷,因此研究区新元古—早古生界有很大的油气勘探潜力。

### 参考文献 (References)

- 肖兵. 化石 Anabarites 的发现及再论玉尔吐斯组的时代归属[J]. 新疆地质, 1989, 7(4): 30-39. [Xiao Bing. Review of the age of Uyirtus Formation in the light of the discovery of Anabarites[J]. Xinjiang Geology, 1989, 7(4): 35-39.]
- 蔡习尧, 毛树华, 钱一雄, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系划分与对比[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(1): 38-42. [Cai Xiyao, Mao Shuhua, Qian Yixiong, et al. Stratigraphic classification and correlation of Cambrian in Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(1): 38-42.]
- 祝贺, 刘家铎, 孟万斌, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系层序及岩相古地理[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(4): 344-348. [Zhu He, Liu Jiaduo, Meng Wanbin, et al. The Cambrian sequence and lithofacies paleogeography in Bachu Uplift in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(4): 344-348.]
- 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, Lou Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 937-948.]
- 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.]
- 张水昌, 高志勇, 李建军, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩识别与分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 285-294. [Zhang Shuichang, Gao Zhiyong, Li Jianjun, et al. Identification and distribution of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 285-294.]
- 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.]
- 胡广, 刘文汇, 腾格爾, 等. 塔里木盆地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.]
- 唐世荣, 王东安. 硅岩研究的进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(6): 71-75. [Tang Shirong, Wang Dong'an. Advances in chert research[J]. Advance in Earth Sciences, 1994, 9(6): 71-75.]
- Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(3/4): 213-232.
- 付伟. 藏南硅质岩及富 SiO<sub>2</sub> 热水流体成岩成矿作用研究[D]. 广州: 中山大学, 2007. [Fu Wei. Study on petrogenesis and mineralization of chert formation and SiO<sub>2</sub>-rich hydrothermal fluids in south Tibet[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007.]
- 何俊国. 特提斯构造域东段中、新生代硅质岩及其沉积环境研究[D]. 广州: 中山大学, 2009. [He Junguo. Study on Mesozoic and Cenozoic chert and its sedimentary environment in Tethyan domain[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.]
- Boström K, Peterson M N A. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. Marine Geology, 1969, 7(5): 424-447, doi: 10.1016/0025-3227(69)90016-4.
- Brock T D. Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures[M]. New York: Springer, 1978.
- Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52(1/2): 65-108.
- White N C, Wood D G, Lee M C. Epithermal sinters of Paleozoic age in north Queensland, Australia[J]. Geology, 1989, 17(8): 718-722.
- Konhauser K O, Phoenix V R, Bottrell S H, et al. Microbial-silica interactions in Icelandic hot spring sinter: possible analogues for some Precambrian siliceous stromatolites microbial activity at Icelandic hot springs[J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 415-433.
- Knoll A H. Exceptional preservation of photosynthetic organisms in silicified carbonates and silicified peats[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1985, 311(1148): 111-122.
- Oehler J H. Experimental studies in Precambrian paleontology: structural and chemical changes in blue-green algae during simulated fossilization in synthetic chert[J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 81(1): 117-129.
- Jansen J H F, van der Gaast S J. Accumulation and dissolution of opal in Quaternary sediments of the Zaire deep-sea fan (northeastern Angola Basin)[J]. Marine Geology, 1988, 83(1/2/3/4): 1-7.
- Barron J A, Baldauf J G. Tertiary cooling steps and paleoproductivity as reflected by diatoms and biosiliceous sediments[M]//Berger W H, Smetacek V S, Wefer G. Productivity of the Ocean: Present and Past. New York: John Wiley & Sons, 1989: 341-354.
- Baldauf J G, Barron J A. Evolution of biosiliceous sedimentation patterns-Eocene through Quaternary: paleoceanographic response to Polar cooling[M]//Bleil U, Thiede J. Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic. Netherlands: Springer, 1990: 575-607.
- Charles C D, Froelich P N, Zibello M A, et al. Biogenic opal in

- Southern Ocean sediments over the last 450,000 years: implications for Surface water chemistry and circulation [J]. *Paleoceanography*, 1991, 6(6): 697-728.
- 24 Archer D, Lyle M, Rodgers K, et al. What controls opal preservation in tropical deep-sea sediments? [J]. *Paleoceanography*, 1993, 8(1): 7-21.
- 25 Pirajno F, Grey K. Chert in the Palaeoproterozoic Bartle member, Killara formation, Yerrida Basin, Western Australia: a rift-related playa lake and thermal spring environment? [J]. *Precambrian Research*, 2002, 116(3/4): 169-192.
- 26 孙省利,陈践发,刘文汇,等. 塔里木盆地寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(3): 45-48. [Sun Shengli, Chen Jianfa, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics of cherts of Lower Cambrian in the Tarim Basin and its implication for environment[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(3): 45-48.]
- 27 于炳松,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.]
- 28 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]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1164-1171.]
- 29 郭峰,郭岭. 柯坪地区肖尔布拉克寒武系层序及沉积演化[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(2): 164-171. [Guo Feng, Guo Ling. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of the Cambrian System at the Xiaerblak Section in the Keping area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(2): 164-171.]
- 30 钱一雄,杜永明,陈代钊,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面奇格布拉克组层序界面与沉积相研究[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 1-8. [Qian Yixiong, Du Yongming, Chen Daizhao, et al. Stratigraphic sequences and sedimentary facies of Qigebulak Formation at Xianerbulak, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 1-8.]
- 31 肖兵,赵靖舟. 新疆阿克苏—乌什地区早寒武世的高肌虫[J]. *西北大学学报*, 1986, 16(3): 73-90. [Xiao Bing, Zhao Jingzhou. Lower Cambrian Bradonriids from Aksu-Wushi region of Xinjiang [J]. *Journal of Northwest University*, 1986, 16(3): 73-90.]
- 32 钱逸,李国祥,蒋志文,等. 我国寒武系底部几种磷酸盐化保存的蓝菌类化石[J]. *微生物学报*, 2007, 24(2): 222-228. [Qian Yi, Li Guoxiang, Jiang Zhiwen, et al. Some phosphatized cyanobacterial fossils from the Basal Cambrian of China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2007, 24(2): 222-228.]
- 33 邱振,王清晨,严德天. 广西来宾蓬莱滩剖面中上二叠统硅质岩的地球化学特征及沉积背景[J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 3141-3155. [Qiu Zhen, Wang Qingchen, Yan Detian. Geochemistry and sedimentary background of the Middle-Upper Permian cherts in the Penglaitan section, Laibin, Guangxi province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 3141-3155.]
- 34 邱振,王清晨. 广西来宾中上二叠统硅质岩海底热液成因的地球化学证据[J]. *中国科学(D辑):地球科学*, 2011, 41(5): 725-737. [Qiu Zhen, Wang Qingchen. Geochemical evidence for submarine hydrothermal origin of the Middle-Upper Permian chert in Laibin of Guangxi, China [J]. *Science China(Seri.D): Earth Sciences*, 2011, 41(5): 725-737.]
- 35 Dove PM, Craven C M. Surface charge density on silica in alkaline and alkaline earth chloride electrolyte solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(21): 4963-4970.
- 36 Dove P M. The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3715-3727.
- 37 Tester JW, Worley W G, Robinson B A, et al. Correlating quartz dissolution kinetics in pure water from 25 to 625°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(11): 2407-2420.
- 38 Rimstidt JD, Barnes H L. The kinetics of silica-water reactions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1683-1699.
- 39 White AF, Brantley S L. Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1995, 31(1): 1-22.
- 40 Dove PM, Han N Z, Wallace A F, et al. Kinetics of amorphous silica dissolution and the paradox of the silica polymorphs [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(29): 9903-9908.
- 41 Maliva R G, Knoll A H, Siever R. Secular change in chert distribution: a reflection of evolving biological participation in the silica cycle [J]. *Palaios*, 1989, 4(6): 519-532.
- 42 Eugster H P. Inorganic bedded cherts from the Magadi area, Kenya [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1969, 22(1): 1-31.
- 43 Browne P R L. Hydrothermal alteration in active geothermal fields [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1978, 6(4): 229-248.
- 44 Folk R L. Practical petrographic classification of limestones [J]. *AAPG Bulletin*, 1959, 43(1): 1-38.
- 45 Dunham R J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture [J]. *American Association of Petroleum Geologists*, 1962, 1: 108-121.
- 46 Embry III A, Klovan J E. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1971, 19(4): 730-781.
- 47 Wright V P. A revised classification of limestones [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 76(3/4): 177-185.
- 48 Aquilina L, Dia A N, Boulègue J, et al. Massive barite deposits in the convergent margin off Peru: implications for fluid circulation within subduction zones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(6): 1233-1245.
- 49 Bishop J K B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic

- particulate matter[J]. *Nature*, 1988, 332(6162): 341-343.
- 50 褚有龙. 中国重晶石矿床的成因类型[J]. *矿床地质*, 1989, 8(4): 91-96. [Chu Youlong. Genetic types of barite deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 1989, 8(4): 91-96. ]
- 51 Torres M E, Brumsack H J, Bohrmann G, et al. Barite fronts in continental margin sediments: a new look at barium remobilization in the zone of sulfate reduction and formation of heavy barites in diagenetic fronts[J]. *Chemical Geology*, 1996, 127(1/2/3): 125-139.
- 52 Braithwaite C J R, Rizzi G. The geometry and petrogenesis of hydrothermal dolomites at Navan, Ireland[J]. *Sedimentology*, 1997, 44(3): 421-440.
- 53 Davies G R, Smith L B Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An Overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- 54 Duggan J P, Mountjoy E W, Stasiuk L D. Fault-controlled dolomitization at Swan Hills Simonette oil field (Devonian), deep basin west-central Alberta, Canada[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 301-323.
- 55 陈汉林, 杨树锋, 王清华, 等. 塔里木板块早—中二叠世玄武质岩浆作用的沉积响应[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 545-552. [Chen Hanlin, Yang Shufeng, Wang Qinghua, et al. Sedimentary response to the Early-Mid Permian basaltic magmatism in the Tarim plate[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 545-552. ]
- 56 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 等. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 277-284. [Jiao Cunli, He Zhiliang, Xing Xiujuan, et al. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 277-284. ]
- 57 邬光辉, 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): 2435-2452. [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): 2435-2452. ]
- 58 朱志新, 李锦轶, 董莲慧, 等. 新疆南天山构造格架及构造演化[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1863-1870. [Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, et al. Tectonic framework and tectonic evolution of the southern Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1863-1870. ]
- 59 张传林, 李怀坤, 王洪燕. 塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述[J]. *地质论评*, 2012, 58(5): 923-936. [Zhang Chuanlin, Li Hua-  
ikun, Wang Hongyan. A review on Precambrian tectonic evolution of Tarim block: possibility of interaction between Neoproterozoic plate subduction and mantle plume[J]. *Geological Review*, 2012, 58(5): 923-936. ]
- 60 刘博, 陈正乐, 任荣, 等. 新疆南天山缝合带的形成时限——来自阔克萨彦岭花岗岩体的锆石年龄新证据[J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1371-1384. [Liu Bo, Chen Zhengle, Ren Rong, et al. Timing of the South Tianshan suture zone—new evidence of zircon ages from the granitic plutons in Kokshal area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1371-1384. ]
- 61 邹亚锐, 塔吉古丽, 邢作云, 等. 塔里木新元古代—古生代沉积盆地演化[J]. *地球科学*, 2014, 39(8): 1200-1216. [Zou Yarui, Tajiguli, Xing Zuoyun, et al. Evolution of sedimentary basins in Tarim during Neoproterozoic-Paleozoic[J]. *Earth Science*, 2014, 39(8): 1200-1216. ]
- 62 Sanford W E, Doughten M W, Coplen T B, et al. Evidence for high salinity of Early Cretaceous sea water from the Chesapeake Bay crater[J]. *Nature*, 2013, 503(7475): 252-256.
- 63 Grassle J F. Hydrothermal vent animals: distribution and biology[J]. *Science*, 1985, 229(4715): 713-717.
- 64 Lonsdale P. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers[J]. *Deep Sea Research*, 1977, 24(9): 857-863.
- 65 Rau G H, Hedges J I. Carbon-13 depletion in a hydrothermal vent mussel: suggestion of a chemosynthetic food source[J]. *Science*, 1979, 203(4381): 648-649.
- 66 刘树根, 孙玮, 罗志立. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(5): 511-520. [Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2013, 40(5): 511-520. ]
- 67 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 278-293. [Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 278-293. ]



## Siliceous Rock Origin and Significance in the Uyirtus Formation Northwestern Margin of Tarim Basin

YANG ChengYu<sup>1,2</sup> LI MeiJun<sup>1,2</sup> NI ZhiYong<sup>1,2</sup> YANG FuLin<sup>1,2</sup> CHEN HaoWei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The Lower Cambrian Uyirtus Formation is a set of complicated lithological source rocks, with widely distributed bedded siliceous rocks. Bedded siliceous rocks are always formed in special environment, thus, study of siliceous rocks will help to review ancient sedimentary environment of the time when Lower Cambrian Uyirtus Formation was depositing and predict the distribution of high quality source rocks. Through rock slice, SEM, probe detection combined with TOC analysis, noticing that the siliceous rocks formed in rift background which imply the enclosed high salinity alkaline water. The dynamic changes of the sedimentary water power made the silica rock have the layered structure and clastic structure. Terrigenous clastic, volcanic activity and organisms provide silicon for the water and hydrotherm suppling nutrient for the organisms that led to a flourishing development in algae and small shell species. The distribution of organisms controlled by the position of volcanic thermal water vent and the preservation condition in special water, so the Uyirtus Formation become good source rocks. The rifting is formed by the taphrogenesis within the platform that caused by tension stress in Early Cambrian period. This tectonic movement led to deposition of widely distributed source rocks, indicating that great exploration potential in Early Paleozoic-Neoproterozoic of Tarim basin.

**Key words:** siliceous rocks; sedimentary environment; Uyirtus Formation; Tarim Basin