

塔里木盆地中央隆起带:新元古代造山型基底拼合带 ——来自深钻孔的碎屑记录证据

李晓剑^{1,2},王毅²,李慧莉²,高山林²,张仲培²,岳勇³,闫全人¹,江文¹

(1. 中国科学院大学 地球与行星科学学院,北京 100049; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083;

3. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:在塔里木盆地巴楚隆起,新近有同1井、夏河1井和巴探5井在寒武系碳酸盐岩之下钻遇碎屑沉积岩。在对碎屑岩进行详细岩相学观测、碎屑组分统计和地球化学分析的基础上,深入探讨了碎屑岩源区及其形成的构造环境。砾岩和砂岩碎屑组成与泥岩地球化学特征共同表明,这3口井寒武系碳酸盐岩之下的碎屑岩物源区包括沉积岩、火成岩和变质岩,以中性火山岩和侵入岩为主。砾石及砂岩中碎屑颗粒棱角状-次圆状的外观、砾石中易磨蚀风化组分(碳酸盐岩和片岩)的存在以及泥岩较低的Th/U比值都反映这些碎屑岩为成熟度较低的近源堆积物。通过碎屑成分、地球化学特征和碎屑锆石年龄结构对比,确定这些碎屑岩的碎屑组分主要源自其下伏基底。砾岩和砂岩碎屑模式、泥岩地球化学特征及碎屑锆石原位微量元素分析结果表明,碎屑源区(即下伏基底)在新元古代(峰期约790~730 Ma)处于大陆边缘弧构造环境。本文新获取的碎屑记录证据与之前对同1井底安山岩、英安岩及卡塔克隆起上塔参1井底闪长岩、花岗闪长岩形成时代及构造环境的研究结论完全一致,表明横亘塔里木盆地中部的中央隆起带是一条新元古代大陆边缘弧,塔里木盆地的基底是由新元古代造山作用形成的拼合基底。

关键词:碎屑组分;地球化学;物源区;拼合基底;中央隆起带;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Central uplift of Tarim Basin being the Neoproterozoic basement structure zone of orogeny origin: Evidences from clastic samples of deep holes

Li Xiaojian^{1,2}, Wang Yi², Li Huili², Gao Shanlin², Zhang Zhongpei², Yue Yong³, Yan Quanren¹, Jiang Wen¹

(1. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. Exploration and Development Research Institute of Northwest Oilfield Company Ltd., SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Three deep holes (Well TX1, XH1 and BT5) encountered clastic sedimentary rocks underlying the Cambrian carbonates in the Bachu uplift of the Tarim Basin. After detailed study of these clastic rocks through petrographic observations, clastic composition statistics and geo-chemical analyses, their provenances and the tectonic setting for their formation were discussed in depth. The clastic compositions of conglomerates and sandstones together with the geochemical characteristics of mudstones indicate that the provenances of the clastic sedimentary rocks underlying the Cambrian carbonates in the three wells include sedimentary rocks, igneous rocks, metamorphic rocks, among which the intermediate-acid volcanic rocks and intrusive rocks are predominant. The angular-to-sub-rounded appearance of the clastic particles in the conglomerates and sandstones, the presence of erodible compositions in gravels (such as carbonates, schists) and the lower Th/U ratio of mudstones collectively show that these clastic rocks are near-source deposits with low maturity. By comparing the clastic composition, geochemical characteristics, and age structure of detrital zircons, we could determine that the detrital components of these clastic rocks are mainly derived from the underlying basement. The detrital models of conglomerates and sandstones, geochemical characteristics of mudstones and in-situ trace element characteristics of detrital zircons suggest

收稿日期:2018-07-18;修订日期:2018-08-23。

第一作者简介:李晓剑(1986—),男,博士研究生,构造地质学。E-mail: magic_lee126@126.com。

通讯作者简介:闫全人(1964—),男,博士、教授,造山带与沉积盆地。E-mail: qryan@ucas.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-002);中国地质调查局项目(12120113067500, DD20160201-07);国家自然科学基金项目(40472119, 40872147)。

that the source area, that is the underlying basement, was located in an arc-related tectonic setting on the active continental margin in the Neoproterozoic (peak: 790–730 Ma). The newly obtained evidences of clastic rocks are well consistent with the previous studies on the age and tectonic setting of the andesites and dacites at the bottom of Well Tong-1 and the granodiorites and diorites at the bottom of Well Tashen-1 in the Katake uplift, demonstrating that the central uplift zone (Bachu uplift-Katake uplift-Guchengxu uplift) across the central Tarim Basin is a Neoproterozoic continental marginal arc, while the basement of the Tarim Basin is the result of amalgamation caused by Neoproterozoic orogeny.

Key words: detrital composition, geochemistry, provenance, basement of amalgamation origin, central uplift zone, Tarim Basin

塔里木陆块是我国三大前寒武纪陆块之一,同时承载着我国陆上面积最大的含油气盆地。由于塔里木盆地主体被塔克拉玛干沙漠所覆盖,可获取的第一手资料主要来自周边山区的零星露头,迄今对盆地基底信息仍所知甚少。诚如翟明国^[1]所言,相比于华北和华南陆块,塔里木陆块前寒武纪研究十分薄弱。石油物探资料揭示,在塔里木盆地中部,大致沿北纬39°40′一线发育一条横亘盆地的近东西向高磁异常带,该异常带两侧地壳结构存在明显差别^[1-4],暗示塔里木盆地的基底并不是完整的一块。由巴楚隆起、卡塔克隆起和古城虚隆起组成的“中央隆起带”的区域展布与该高磁异常带大体相当。近几年获取的有限深钻井和人工地震勘探资料揭示,中央隆起带在寒武系沉积之前就是一个高低起伏的复杂正向地貌单元^[5-7],表明该隆起是一个前寒武纪古隆起或是其一部分。然而,受研究资料所限,作为盆地基底的重要组成部分,该古隆起的确切形成时代及其大地构造环境仍是悬而未决、长期以来困惑地学界的难题。

中国石化近年在中央隆起带实施完成多口深钻井,其中巴楚隆起上的同1井(TX1)、夏河1井(XH1)和巴探5井(BT5)在寒武系碳酸盐岩之下都钻遇了碎屑岩,本文对这些碎屑岩进行了详细的岩相学观测、砂岩砾岩碎屑组分统计和泥岩地球化学分析,深入探讨了这些碎屑岩的物源及形成构造环境。虽是“三孔之见”,但也为进一步探索塔里木盆地前寒武纪基底组成及其构造过程提供了弥足珍贵的实测数据。

1 地质背景

塔里木盆地位于特提斯造山带和中亚造山带的交汇部位,盆地周缘被造山带所围限,北侧为天山造山带,南侧为西昆仑-阿尔金造山带,呈现了典型的盆地构造格局(图1)。受古亚洲洋和特提斯洋开启、俯冲及微陆块多次碰撞造山的影响,塔里木盆地经历了复杂的构造过程,是典型的叠合盆地^[8-11]。石油地质学

家一般将塔里木盆地划分为“三隆四坳”7个一级构造单元^[2,12-13],自北向南依次为:库车坳陷、塔北隆起、北部坳陷带、中央隆起带、西南坳陷带、塔南隆起和东南坳陷(图1)。一般地,将南华系-震旦系作为盆地基底之上的第一套沉积盖层,以陆相-海相碎屑岩为主,向上依次为寒武系-奥陶系海相碳酸盐岩沉积、志留系-二叠系海相碎屑岩沉积以及中-新生界陆相碎屑岩沉积(少量海相沉积)。不同构造单元的沉积充填过程具有明显差别。

本文研究的碎屑岩样品分别采自中央隆起带西段巴楚隆起上的同1井、夏河1井和巴探5井(图1)。同1井在寒武系碳酸盐岩之下钻遇一套厚逾200 m的火山岩-沉积岩组合(图2a)。其中,碎屑岩厚约120 m,大体可分为上部泥岩段(TX14, 4 643.00~4 660.00 m)、中部砂岩段(TX15, 4 662.45~4 677.00 m)和下部泥岩段(TX16, 4 693.00~4 754.75 m)3个岩性段,其间有若干薄层辉绿岩和辉长岩侵入体。在4 706.60~4 722.95 m和4 746.45~4 754.75 m,下部泥岩段中发育两套绢云千枚岩。结合地震资料分析,这些千枚岩化浅变质岩可能是后期构造活动中泥质岩作为软弱层发生层间剪切滑动导致的。碎屑岩之下主要为一套安山岩和英安岩组合^[14],夹有少量凝灰质泥岩和千枚岩。夏河1井在寒武系碳酸盐岩之下也钻遇火山岩-沉积岩组合(图2b),碎屑岩厚10 m余(5 646.00~5 656.00 m),主要为一套灰色、褐红色砂岩、砂砾岩及少量灰色、棕褐色泥岩。碎屑岩之下为一套红棕色、棕褐色玄武岩。巴探5井在寒武系碳酸盐岩之下钻遇一套厚约20 m的杂色砾岩(5 802.00~5 822.00 m),未见底(图2c)。由于缺乏可靠的年代学证据,这些碎屑岩的具体形成时代尚无定论。

2 样品与分析方法

用以碎屑组分统计的样品分别采自同1井4 662.45~4 677 m井段、夏河1井5 648.63~5 652.24 m

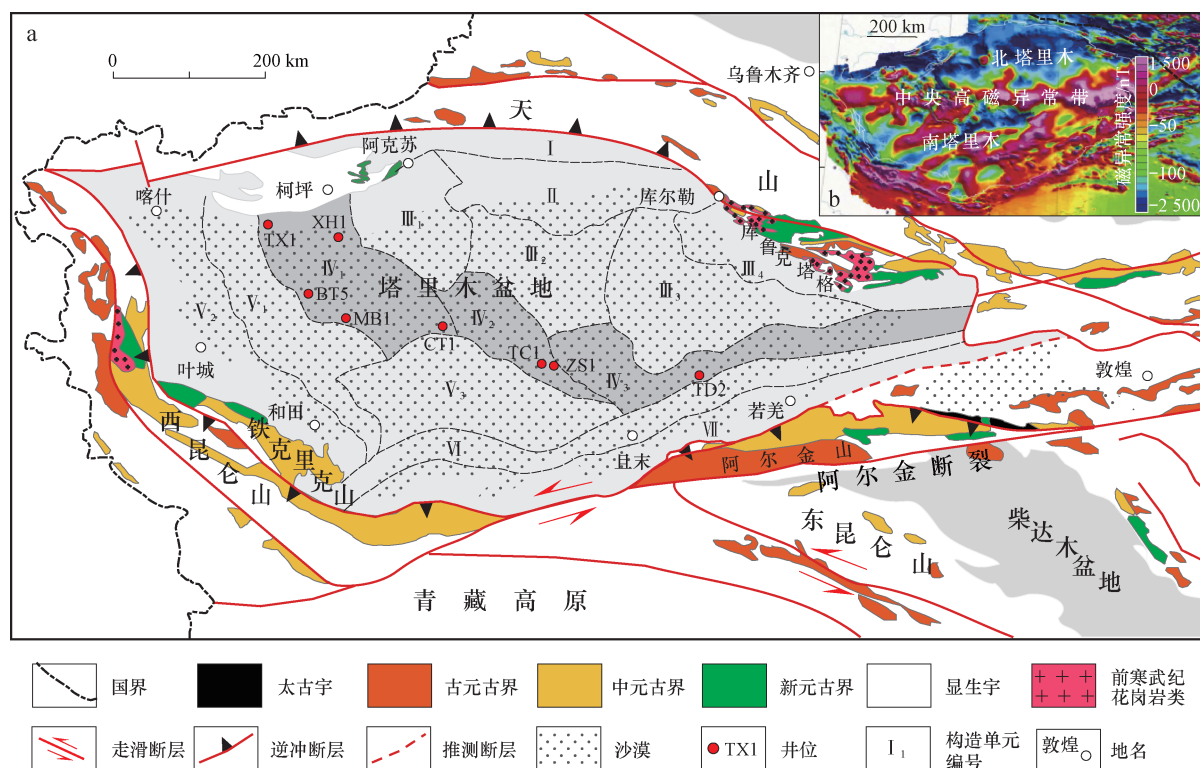


图1 塔里木盆地及邻区大地构造简图(a,据文献[13,15]修改)和航磁异常化极图(b,据文献[16]修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map (a) (modified from reference [13,15]) and aeromagnetic anomaly map

(b) (modified from reference [16]) of Tarim Basin and its adjacent areas

I. 库车坳陷; II. 塔北隆起; III. 北部拗陷带; III₁. 阿瓦提拗陷; III₂. 顺托果勒隆起; III₃. 满加尔拗陷; III₄. 孔雀河斜坡; IV. 中央隆起带; IV₁. 巴楚隆起; IV₂. 卡塔克隆起; IV₃. 古城虚隆起; V. 西南拗陷带; V₁. 麦盖提斜坡; V₂. 塔西南拗陷; V₃. 塘古拗陷; VI. 塔南隆起; VII. 东南拗陷

井段和巴探5井5802~5822 m井段(图2)。砂岩碎屑组分统计采用Gazzi-Dickinson计数法进行^[17-22]。将薄片划分为若干等距测线,尽可能布满整个薄片,沿测线统计时两点间距保持在0.2~0.4 mm。为确保统计的准确性,每个薄片统计颗粒数不少于400个^[19]。统计的颗粒主要包括石英(单晶石英和多晶石英)、长石(斜长石和钾长石)、岩屑(火山岩屑、沉积岩屑和变质岩屑)及其他组分(白云母、黑云母、角闪石、辉石、锆石等)。当十字丝所交颗粒(矿物或岩屑)大于0.0625 mm时计为该矿物或岩屑类型,反之则将该颗粒计为其所属整个岩屑颗粒的岩屑类型。胶结物和某些无法鉴定的隐晶质或玻璃质组分不参加统计。当统计钙质砂岩样品时,由于不易区分碳酸盐胶结物与碳酸盐岩屑,故不予统计碳酸盐岩屑,这会导致石英和长石等单矿物碎屑颗粒含量偏高,而岩屑含量相对降低。传统上,砾岩碎屑组分统计常采用面积法统计^[23],即在1 m²范围内观察砾石的成分、结构、粒径大小等特征并计数。由于所研究钻孔资料较少、且有限的岩心又较破碎,本文工作通过肉眼和镜下观察确定砾岩碎屑结构后,同样依Gazzi-Dickinson计数法对其碎屑组分进行了统计,但由于砾

岩中常含有粒径较大的砾石,单个薄片统计数一般难以达到400个。碎屑组分统计结果见表1。

在同1井上、下两段泥岩中共采集6件样品用以岩石地球化学测试分析,采样位置见图2。新鲜样品用尼龙刷、高压风枪去除浮尘,再用无水乙醇仔细擦洗进一步清除表面污物,然后将样品置入盛有去离子水的洁净烧杯中,用超声波清洗机振荡30 min,干净后置于电热板上加热烘干。将烘干的样品用颚式破碎机破碎至直径小于0.5 cm,再用无污染玛瑙球磨机磨至200目以下,以备测试使用。全岩微量和稀土元素测试均在中国地质科学院国家地质测试中心完成。微量元素和稀土元素含量均使用等离子质谱仪(PE300D)测定,丰度大于10 μg/g的元素分析精度优于5%,丰度小于10 μg/g的元素分析精度优于10%,检测方法依据DZ/T 0223—2001。测试结果见表2。

3 分析结果

3.1 砾岩和砂岩碎屑组成

巴探5井砾岩以基质支撑为主,基质由成分复杂

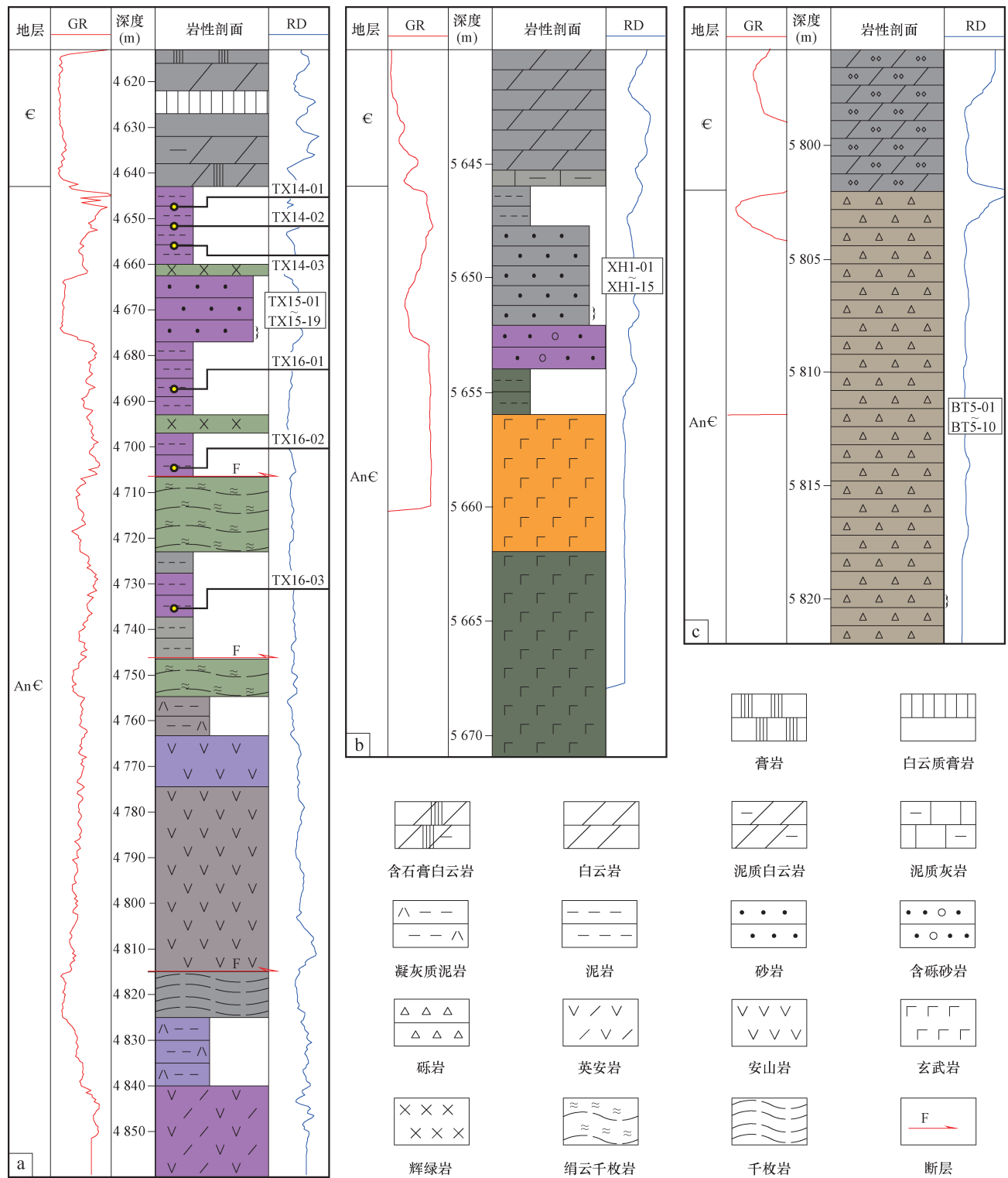


图 2 塔里木盆地同 1 井、夏河 1 井和巴探 5 井地层柱状图及碎屑岩采样位置

Fig. 2 Stratigraphic columns of boreholes and sampling sites of clastic rocks discussed in Well TX1, XH1 and BT5, Tarim Basin
a. 同 1 井; b. 夏河 1 井; c. 巴探 5 井

的砂岩和粉砂岩构成。砾石多数呈棱角 - 次浑圆状, 砾径变化较大, 在岩心尺度可见长达 5 ~ 12 cm 的砾石, 镜下观测则以 0.4 ~ 1.0 cm 的砾石居多。砾石成分极为复杂, 包括沉积岩砾石、火成岩砾石和变质岩砾

石(图 3)。沉积岩砾石又包括富花岗质岩屑的和富变质岩屑的岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、富火山质岩屑石英杂砂岩、硅质岩和硅质交代的碳酸盐岩等多种岩石类型。火成岩砾石以花岗岩质的居多, 安山岩和玄武

表1 塔里木盆地 TX1, XH1 和 BT5 井砂岩、砾岩碎屑组分统计结果

Table 1 Statistics of the detrital compositions of sandstones and conglomerates in Well TX-1, XH-1 and BT-5, Tarim Basin

薄片编号	碎屑组分含量/%												C/Q	P/F	Lv/L
	Qt	F	L	Qm	F	Lt	Qp	Lv	Ls	Lm	Lv	Ls			
TX15-01	65.2	5.1	29.7	41.3	5.1	53.6	47.1	37.8	15.1	9.3	64.9	25.8	0.37	0.88	0.65
TX15-02	68.3	7.3	24.4	45.3	7.3	47.4	50.9	41.4	7.7	9.2	76.7	14.2	0.34	0.75	0.77
TX15-03	66.7	3.9	29.3	45.7	3.9	50.4	44.8	37.7	17.6	11.4	60.4	28.2	0.32	0.95	0.60
TX15-04	68.2	5.0	26.8	40.0	5.0	54.9	55.1	31.4	13.5	14.6	59.7	25.7	0.41	0.81	0.60
TX15-05	69.6	5.9	24.5	37.4	5.9	56.7	59.2	27.9	12.9	9.3	62.0	28.7	0.46	1.00	0.62
TX15-06	74.4	5.4	20.2	41.5	5.4	53.0	66.0	30.4	3.6	16.0	75.0	9.0	0.44	0.70	0.75
TX15-07	69.2	7.9	22.8	40.7	7.9	51.4	59.8	28.6	11.6	16.1	59.7	24.2	0.41	0.84	0.60
TX15-08	68.1	6.2	25.7	45.3	6.2	48.5	50.4	35.8	13.7	12.5	63.3	24.2	0.34	0.77	0.63
TX15-09	65.2	5.7	29.1	46.6	5.7	47.7	43.8	39.2	17.1	17.6	57.4	25.0	0.29	0.62	0.57
TX15-10	62.6	6.1	31.2	40.3	6.1	53.6	45.3	37.2	17.5	13.3	59.0	27.7	0.36	0.82	0.59
TX15-11	57.5	6.9	35.6	43.4	6.9	49.7	30.5	49.0	20.6	9.6	63.6	26.7	0.25	0.89	0.64
TX15-12	61.7	8.2	30.1	47.9	8.2	43.9	34.8	42.4	22.7	14.6	55.6	29.8	0.22	0.63	0.56
TX15-13	58.0	6.3	35.6	44.6	6.3	49.1	30.1	51.5	18.4	12.6	64.4	23.0	0.23	0.62	0.64
TX15-14	58.4	7.9	33.7	46.5	7.9	45.6	27.8	48.9	23.3	8.4	62.0	29.6	0.20	0.88	0.62
TX15-15	62.8	7.5	29.7	47.1	7.5	45.3	36.2	44.5	19.3	7.3	64.7	28.0	0.25	0.76	0.65
TX15-16	62.0	9.8	28.3	47.8	9.8	42.5	36.3	46.1	17.6	11.5	64.0	24.5	0.23	0.73	0.64
TX15-17	65.4	11.2	23.4	45.4	11.2	43.4	51.0	41.5	7.5	17.6	69.7	12.6	0.31	0.72	0.70
TX15-18	64.5	6.3	29.2	47.5	6.3	46.2	39.1	41.8	19.1	9.5	62.2	28.4	0.26	0.78	0.62
TX15-19	63.5	5.6	30.9	47.3	5.6	47.1	36.2	45.1	18.8	7.7	65.2	27.1	0.25	0.82	0.65
XH1-01	35.5	21.5	43.0	15.9	21.5	62.6	31.5	52.0	16.5	0.9	75.2	23.9	0.55	0.61	0.75
XH1-02	34.7	18.8	46.6	14.6	18.8	66.6	30.4	48.7	20.9	1.3	69.1	29.6	0.58	0.61	0.69
XH1-03	35.2	18.2	46.7	15.2	18.2	66.7	31.0	53.6	15.4	4.8	74.0	21.2	0.57	0.56	0.74
XH1-04	36.6	17.4	46.0	16.6	17.4	66.0	30.7	48.2	21.1	2.1	68.1	29.8	0.54	0.68	0.68
XH1-05	40.8	14.3	44.9	18.2	14.3	67.6	34.2	47.1	18.8	2.7	69.5	27.7	0.56	0.61	0.70
XH1-06	35.1	17.1	47.8	17.5	17.1	65.4	27.4	48.2	24.4	2.0	65.0	32.9	0.50	0.65	0.65
XH1-07	35.7	20.3	44.0	19.0	20.3	60.7	28.3	55.9	15.8	3.9	75.0	21.1	0.47	0.66	0.75
XH1-08	35.4	15.7	48.8	17.2	15.7	67.1	27.8	46.6	25.6	3.0	62.7	34.3	0.51	0.61	0.63
XH1-09	32.4	13.2	54.4	17.4	13.2	69.3	22.3	53.9	23.8	4.6	66.2	29.2	0.46	0.55	0.66
XH1-10	33.5	18.0	48.4	16.9	18.0	65.1	26.3	53.3	20.4	3.6	69.6	26.7	0.50	0.55	0.70
XH1-11	36.2	17.6	46.2	15.0	17.6	67.4	32.6	50.7	16.7	4.9	71.5	23.6	0.59	0.63	0.72
XH1-12	31.9	16.5	51.6	13.3	16.5	70.2	27.2	52.0	20.8	3.1	69.2	27.7	0.58	0.55	0.69
XH1-13	40.6	16.4	43.0	17.7	16.4	65.8	35.5	48.1	16.4	3.5	71.9	24.6	0.56	0.63	0.72
XH1-14	36.2	14.3	49.4	18.4	14.3	67.2	27.1	55.3	17.6	2.7	73.7	23.5	0.49	0.72	0.74
XH1-15	38.4	13.4	48.3	19.6	13.4	67.1	29.2	52.4	18.4	5.6	69.9	24.5	0.49	0.59	0.70
BT5-01	36.5	20.6	42.9	31.8	20.6	47.7	10.8	56.1	33.1	9.6	56.9	33.6	0.13	0.63	0.57
BT5-02	25.8	19.2	55.0	24.1	19.2	56.7	3.5	75.2	21.4	12.5	68.1	19.4	0.07	0.45	0.68
BT5-03	32.3	22.9	44.8	29.6	22.9	47.6	7.2	60.0	32.8	21.1	51.0	27.9	0.08	0.44	0.51
BT5-04	31.0	21.5	47.6	29.5	21.5	49.0	3.3	61.0	35.7	9.7	56.9	33.3	0.05	0.49	0.57
BT5-05	31.2	13.9	54.9	13.9	13.9	72.1	27.8	45.4	26.8	18.2	51.4	30.4	0.55	0.15	0.51
BT5-06	34.0	24.0	42.0	18.1	24.0	58.0	31.6	51.5	17.0	17.6	62.0	20.4	0.47	0.17	0.62
BT5-07	43.5	13.3	43.2	22.7	13.3	64.0	40.7	42.6	16.7	29.9	50.4	19.7	0.48	0.21	0.50
BT5-08	41.4	14.4	44.3	36.8	14.4	48.9	10.5	59.2	30.3	11.7	58.4	29.9	0.11	0.32	0.58
BT5-09	36.7	19.3	44.1	33.7	19.3	47.0	8.1	52.5	39.4	23.5	43.7	32.8	0.08	0.21	0.44
BT5-10	37.6	26.7	35.6	32.7	26.7	40.6	14.3	60.0	25.7	16.7	58.3	25.0	0.13	0	0.58

注: Qp 为多晶石英; Qm 为单晶石英; P 为斜长石; K 为钾长石; Ls 为沉积岩岩屑; Lv 为火成岩岩屑; Lm 为变质岩岩屑。Qt = Qm + Qp; F = P + K; L = Lv + Ls + Lm; Lt = Lv + Ls + Lm + Qp。C/Q 为多晶石英与全部石英比值; P/F 为斜长石与全部长石比值; Lv/L 为火山岩岩屑与全部岩屑比值。

表 2 塔里木盆地同 1 井泥岩微量元素分析结果
Table 2 Analysis of trace elements of mudstone samples
from Well TX1, Tarim Basin $\mu\text{g/g}$

薄片 编号	TX14 - 01	TX14 - 02	TX14 - 03	TX16 - 01	TX16 - 02	TX16 - 03
La	9.72	8.82	9.43	10.3	9.31	9.58
Ce	18.10	18.40	19.70	19.20	19.50	18.80
Pr	2.26	1.92	2.03	2.38	2.02	1.92
Nd	9.36	8.65	8.98	10.20	9.34	8.34
Sm	1.84	1.74	1.79	1.96	1.92	1.57
Eu	0.34	0.33	0.34	0.32	0.38	0.30
Gd	1.53	1.52	1.61	1.47	1.68	1.41
Tb	0.24	0.24	0.24	0.24	0.26	0.21
Dy	1.35	1.41	1.45	1.38	1.48	1.23
Ho	0.27	0.26	0.28	0.29	0.28	0.24
Er	0.72	0.73	0.76	0.77	0.76	0.67
Tm	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
Yb	0.74	0.70	0.75	0.80	0.75	0.64
Lu	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.10
Y	6.79	7.00	7.37	7.47	6.78	6.41
Sc	4.14	3.75	3.89	4.07	3.79	3.00
Ti	972	877	961	972	879	984
V	24.10	21.00	24.70	24.70	21.60	26.80
Cr	20.50	16.60	18.70	23.10	17.30	20.50
Co	2.79	3.58	3.83	2.97	3.66	3.93
Ni	5.46	7.75	9.38	0.82	7.73	7.53
Rb	30.30	31.10	33.10	32.00	29.20	31.40
Sr	1 766	1 904	1 821	4 362	4 338	1 883
Zr	35.80	33.30	29.10	32.70	28.50	30.90
Nb	3.26	3.62	3.78	3.34	3.40	4.02
Cs	1.03	1.13	1.25	1.11	1.10	1.04
Ba	210	230	228	541	571	216
Hf	1.14	1.13	0.96	1.08	1.06	1.07
Ta	0.25	0.30	0.30	0.28	0.31	0.31
Th	3.91	3.58	3.84	4.56	3.87	4.14
U	0.84	0.91	0.96	0.88	0.92	1.01
Σ REE	46.69	44.95	47.60	49.55	47.92	45.12
LREE/ HREE	8.21	7.83	7.93	8.55	7.79	8.79
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	9.42	9.04	9.02	9.24	8.90	10.74
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	3.41	3.27	3.40	3.39	3.13	3.94
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.71	1.80	1.78	1.52	1.85	1.82
δEu	0.60	0.61	0.60	0.55	0.63	0.60
δCe	0.91	1.05	1.05	0.92	1.05	1.01
Th/Sc	0.94	0.95	0.99	1.12	1.02	1.38
Zr/Sc	8.65	8.88	7.48	8.03	7.52	10.30
Th/U	4.65	3.93	4.00	5.18	4.21	4.10

岩砾石次之,偶见浅成的花岗斑岩砾石。变质岩砾石相对较少,以片麻岩砾石为主,少量为片岩砾石。

采自 3 口钻井的砂岩、砾岩碎屑组分有所差别。同 1 井砂岩杂基含量变化于 5% ~ 15%,碎屑组分主要为石英和岩屑,长石含量偏低(图 4a,b)。石英以单晶石英为主,多呈棱角-次棱角状,常具有不规则港湾状边界。多晶石英大部分具有锯齿状边界,部分显示波状消光特征。长石呈次棱角状,多为具聚片双晶的斜长石,钾长石含量很低。岩屑以微晶结构火山岩为主,粉砂岩岩屑次之,另有少量硅质岩和变质岩岩屑。夏河 1 井砂岩杂基含量可高达 10% ~ 20%,碎屑组分相对较复杂。除石英和长石颗粒外,岩屑含量较同 1 井砂岩的岩屑高很多(图 4c,d)。单晶石英和多晶石英含量相当,均呈棱角-次棱角状,单晶石英多数具有不规则港湾状边界,多晶石英波状消光现象普遍。长石颗粒呈棱角-次棱角状,斜长石含量高于钾长石。岩屑以火山岩占绝对优势,粉砂岩次之,少量变质岩,偶见泥质岩和硅质岩岩屑。巴探 5 井砾岩碎屑组分最为复杂,碎屑颗粒以岩屑数量占优(图 4e,f)。石英颗粒均呈棱角状,单晶石英含量远大于多晶石英。长石呈棱角状,钾长石含量略多于斜长石。岩屑种类丰富,其中以具微晶结构的火山岩居多,粉砂岩、变质岩次之,同时有少量泥质、硅质岩屑。

3.2 泥岩地球化学特征

采自同 1 井上下两段泥岩(TX14,TX16)的 6 件样品表现出相似的稀土、微量元素化学特征。稀土总量较低(分别为 44.95 ~ 47.60 和 45.12 ~ 49.55 $\mu\text{g/g}$),轻重稀土分馏明显,轻稀土强烈富集(LREE/HREE 分别为 7.83 ~ 8.21 和 7.79 ~ 8.79, $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 分别为 9.02 ~ 9.42 和 8.90 ~ 10.74),且轻稀土发生一定程度的分异($\text{La}_{\text{N}}/\text{Sm}_{\text{N}}$ 分别为 3.27 ~ 3.41 和 3.13 ~ 3.94),重稀土分异微弱($\text{Gd}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 分别为 1.71 ~ 1.80 和 1.52 ~ 1.85)。在球粒陨石标准化配分图上,全部样品均呈现右倾型稀土元素配分模式(图 5a),且具有明显的 Eu 负异常(δEu 值分别为 0.6 ~ 0.61 和 0.55 ~ 0.63),Ce 基本无异常(δCe 值分别为 0.91 ~ 1.05 和 0.92 ~ 1.05)。在平均上地壳标准化的微量元素蛛网图上(图 5b),Sr 显著富集,Nb,Ta,Zr,Hf 等高场强元素(HFSE)和 V,Ni,Sc 等相容元素相对相邻元素表现出较强或中等程度的负异常。与平均上地壳相比,同 1 井泥岩样品的稀土和微量元素含量明显整体偏低,这与岩石中钙质组分(样品 CaO 含量高达 23.41% ~ 26.38%)的稀释有关^[24]。

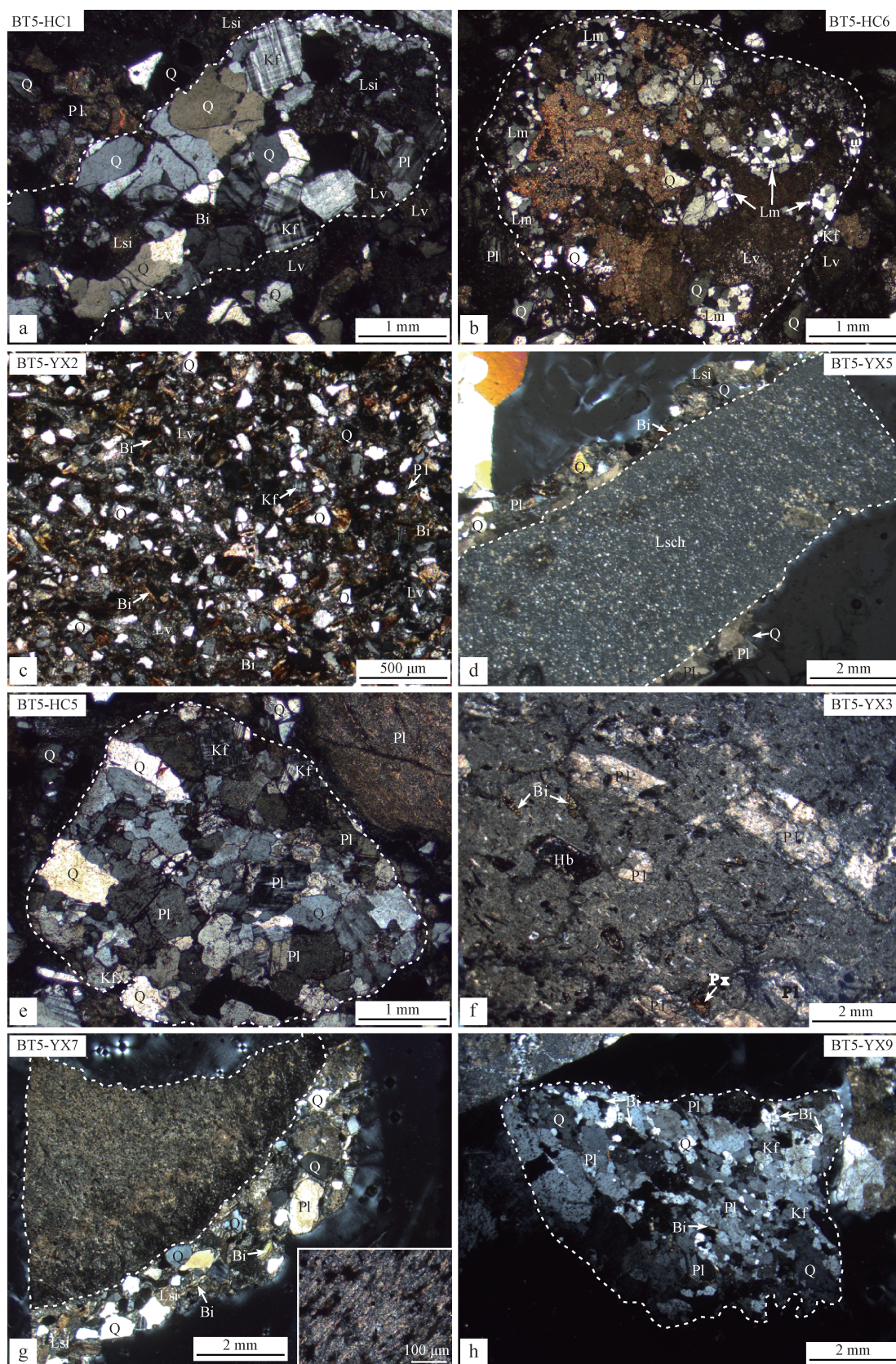


图3 塔里木盆地巴探5井砾岩中砾石成分显微照片

Fig. 3 Photomicrographs showing gravel composition of conglomerates in Well BT5, Tarim Basin

a, b. 岩屑砂岩砾石; c. 岩屑石英杂砂岩砾石; d. 硅质岩砾石; e. 花岗岩砾石; f. 安山岩砾石; g. 玄武岩砾石; h. 片麻岩砾石
Bi. 黑云母; Hb. 角闪石; Kf. 钾长石; Lm. 变质岩岩屑; Lsi. 粉砂岩岩屑; Lsch. 硅质岩屑; Lv. 火山岩岩屑; Pl. 长石; Px. 辉石; Q. 石英

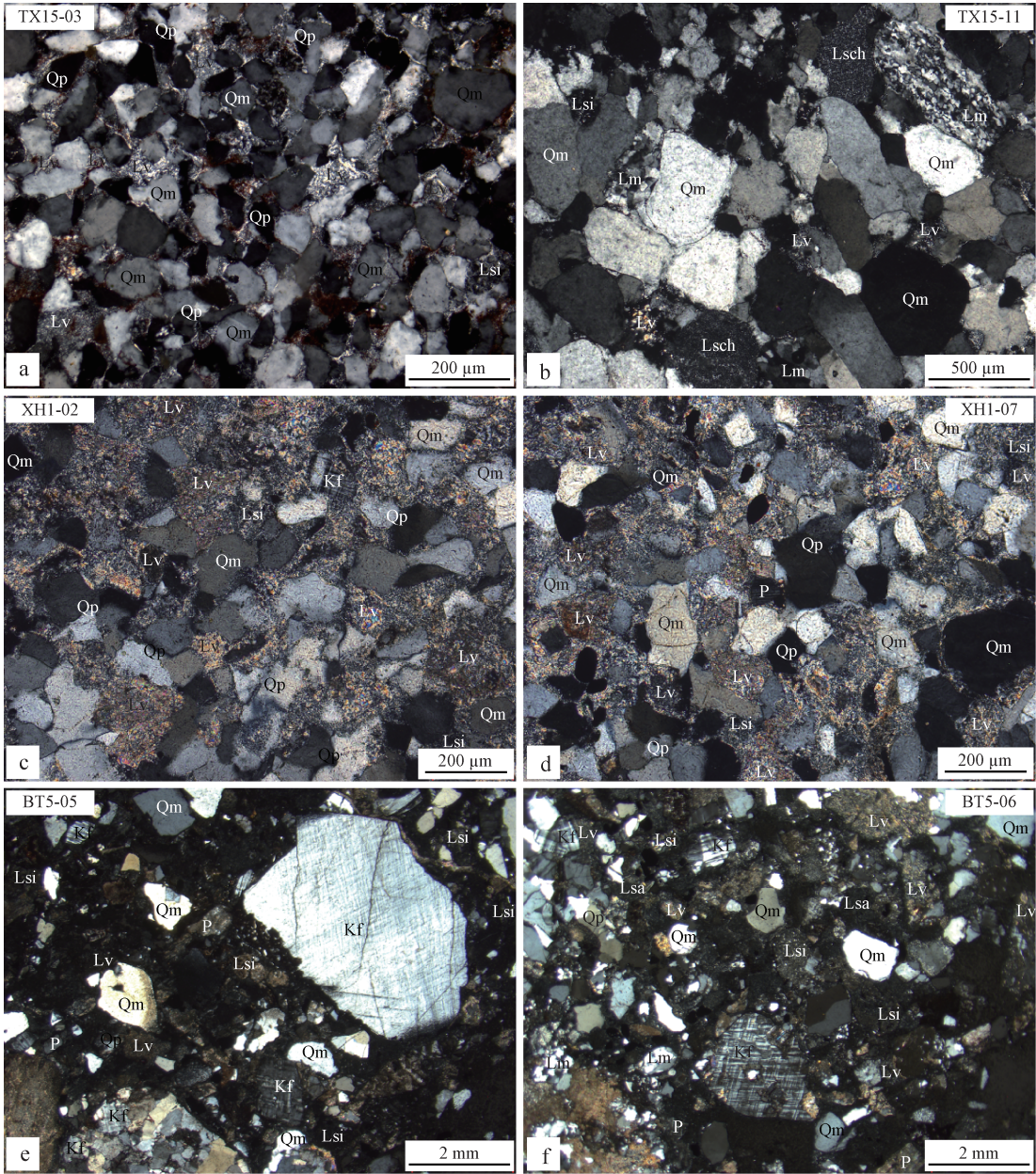


图 4 塔里木盆地深钻岩心砂岩和砾岩碎屑组构造显微照片

Fig. 4 Photomicrographs showing clastic fabrics of sandstones and conglomerates in the cores from the deep holes in Tarim Basin
a,b. 同 1 井砂岩; c,d. 夏河 1 井砂岩; e,f. 巴探 5 井砾岩
Qm. 单晶石英; Qp. 多晶石英; 其他碎屑组分代号同图 3

两组泥岩样品 Th/Sc 比值分别为 0.94 ~ 0.99 和 1.02 ~ 1.38,与上地壳平均值接近(0.97^[25]), Zr/Sc 比值分别为 7.48 ~ 8.88 和 7.52 ~ 10.30,明显低于上地壳平均值(17.27^[25])。在 Th/Sc - Zr/Sc 图解中(图 6a),所分析样品皆靠近大陆上地壳且平行于成分演化线分布,表明同 1 井上、下两段泥岩受沉积分选和再循环作用影响较小^[26]。样品 Th/U 比值普遍较低(分别为 3.93 ~ 4.65 和 4.10 ~ 5.18),在 Th/U - Th 图解中(图 6b),Th/U 比值与 Th 含量之间呈现明显的线性正相关,且全部落在大陆上地壳附近,指示物源区仅经历较低程

度的风化作用^[26]。由此可知,沉积分选、再循环及化学风化作用对同 1 井泥岩样品影响有限,这些样品的稀土、微量元素客观反映了源区岩石特征,可有效地用以源区物质组成和构造环境等方面的示踪。

4 讨论

4.1 源区物质组成

4.1.1 砾岩和砂岩碎屑组分反映的源区物质组成

砾岩和砂岩碎屑组分是确定源区物质组成的最直

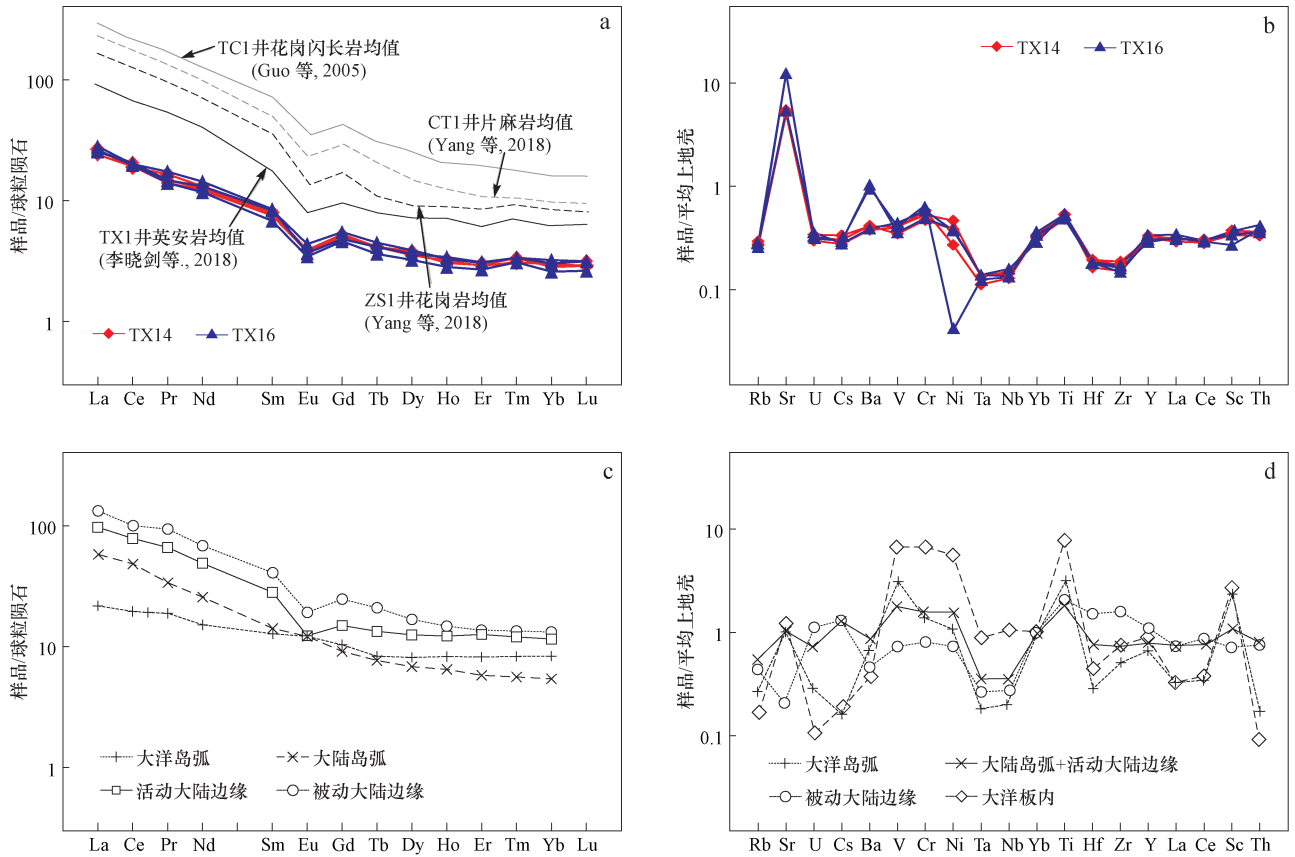


图5 塔里木盆地泥岩稀土元素配分模式图及微量元素蛛网图

Fig. 5 REE patterns and multi-trace element spider diagrams for mudstone samples from Tarim Basin

a. 泥岩稀土元素配分模式(标准化数值据文献[27]); b. 泥岩微量元素蛛网(标准化数值据文献[25]);

c. 不同构造环境泥岩稀土元素配分模式^[28]; d. 不同构造环境泥岩微量元素蛛网图^[29]

(地化数据来源:TC1 井花岗岩闪长岩据文献[30], TX1 井英安岩据文献[14], ZS1 井花岗岩和 CT1 井片麻岩据文献[31]。)

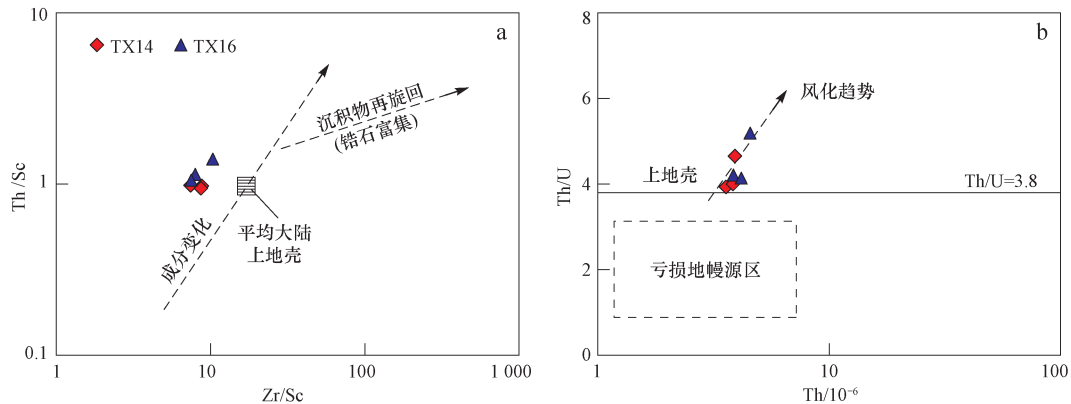


图6 塔里木盆地泥岩 Th/Sc-Zr/Sc 图解(a)和 Th/U-Th 图解(b)(据文献[26])

Fig. 6 Th/Sc-Zr/Sc diagram(a)and Th/U-Th diagram(b)for mudstone samples from Tarim Basin(after reference [26])

接证据^[17,32-34]。巴探5井砾岩中岩屑砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑石英杂砂岩、硅质岩、碳酸盐岩、花岗岩、花岗斑岩、安山岩、玄武岩、片麻岩、片岩等砾石表明源区有相应类型的岩石出露。尽管受钻井岩心局限本文无法得到这些不同成分砾石的具体比例,但镜下碎屑组分统计结果显示(表1),岩屑组分含量(45%)远高于

石英和长石含量(分别为35%和20%)。岩屑中火山岩岩屑占绝对优势(Lv/L平均为0.56),石英颗粒以单晶石英为主(C/Q平均为0.22),且含锆石和磷灰石等包裹体。这些特征指示中酸性火山岩及侵入岩应是巴探5井砾岩的主要碎屑供给者。

同1井和夏河1井砾岩中的微晶结构火山岩

岩屑、粉砂岩岩屑、泥质岩岩屑、硅质岩岩屑和变质岩岩屑与巴探 5 井砾岩中砾石成分大体相当,但碎屑类型有所减少。这可能与各井所处位置有关,或是不同时间物源区剥露的岩石类型略有差异。同 1 井砂岩碎屑组分具有较高的 Lv/L 比值(平均为 0.64)、 P/F 比值(平均为 0.79)、适中的 C/Q 比值(平均为 0.31),单晶石英普遍发育熔蚀结构,这表明同 1 井砂岩的主要物源也是中酸性火山岩。相较而言,夏河 1 井砂岩除具有高的 Lv/L 比值(平均为 0.70)和 P/F 比值(平均为 0.62)外,还具有相当高的 C/Q 比值(平均为 0.53)。结合其多晶石英颗粒较普遍的波状消光现象,推断夏河 1 井砂岩的物源区还有大量长英质变质岩加入。

4.1.2 泥岩地球化学反映的源区物质组成

细碎屑岩(粉砂岩和泥岩)被认为是物源区露头岩石的天然混合样品^[35],它们的稀土元素及部分化学性质稳定的微量元素在搬运、成岩乃至变质作用中都不发生明显变化^[35-37],因此提供了物源区母岩的化学组成信息。稀土元素和 Th 在长英质岩石中的富集程度远比在镁铁质岩石中要高,而 Co、Sc 和 Cr 等微量元素则主要赋存于镁铁质岩石中,因此上述相关元素比值在以长英质和镁铁质岩石为源区的沉积物中明显不同,是识别源区岩石类型非常有效的地球化学判别因子^[35,38-39]。本文分析的 6 件泥岩样品普遍表现出较高的 La/Sc 、 Th/Sc 、 La/Co 和 Th/Co 比值和较低的 Cr/Th 比值、 Eu/Eu^* 比值,与平均大陆上地壳的接近,均属以长英质岩石为源区的沉积物(表 3)。在 $Co/Th-La/Sc$ 图解中(图 7a),样品全部投影在长英质火山岩源区附近;在 $La/Th-Hf$ 图解中(图 7b),样品以较低的 La/Th 比值(2.26~2.49,平均为 2.40)处于酸性岛弧源区范围,但如前所述,由于钙质组分稀释造成包括

表 3 不同源区泥岩微量、稀土元素判别参数及与同 1 井泥岩对比

Table 3 Discrimination parameters for trace and rare elements of the mudstone samples from different provenances and comparison with those of mudstones in Well TX1

参数	TX14 均值	TX16 均值	酸性岩源区 沉积物 ^a	基性岩源区 沉积物 ^a	大陆上 地壳 ^b
La/Sc	2.37	2.73	2.50~16.30	0.43~0.86	2.21
Th/Sc	0.96	1.17	0.84~20.50	0.05~0.22	0.79
La/Co	2.80	2.82	1.80~13.80	0.14~0.38	1.76
Th/Co	1.13	1.22	0.67~19.40	0.04~1.40	0.63
Cr/Th	4.92	4.83	4.00~15.00	25.00~500.00	7.76
Eu/Eu [*]	0.60	0.60	0.40~0.94	0.71~0.95	0.63

注:典型数据来源 a 据文献[39],b 据文献[35]。

Hf 在内的微量元素含量整体偏低,使样品全部偏离至酸性岛弧源区左侧。总体上,同 1 井泥岩的地球化学特征表现出与岛弧长英质岩石的高度亲缘性。

4.2 物源区

综上所述,砾岩和砂岩碎屑组分以及泥岩地球化学特征揭示,同 1 井、夏河 1 井和巴探 5 井碎屑岩的物源区包括沉积岩、火成岩和变质岩,且以长英质或酸性岛弧岩浆岩为主要源区。砾石及砂岩中碎屑颗粒棱角-次圆状的外貌、砾石中易磨蚀风化组分(如碳酸盐岩、片岩)的存在以及泥岩较低的 Th/U 比值都反映这些碎屑岩为成熟度较低的近源堆积物。

近年来中央隆起带上已有多口探井钻遇了前寒武系基底结晶岩(图 1),同 1 井在 TX16 泥岩取样层之下 4 763~4 860 m 深度钻遇一套以安山岩(747 Ma±12 Ma^[14])、英安岩(755 Ma±3 Ma^[42])为主的中酸性火山岩,塔参 1 井(TC1)在 7 169~7 200 m 钻遇

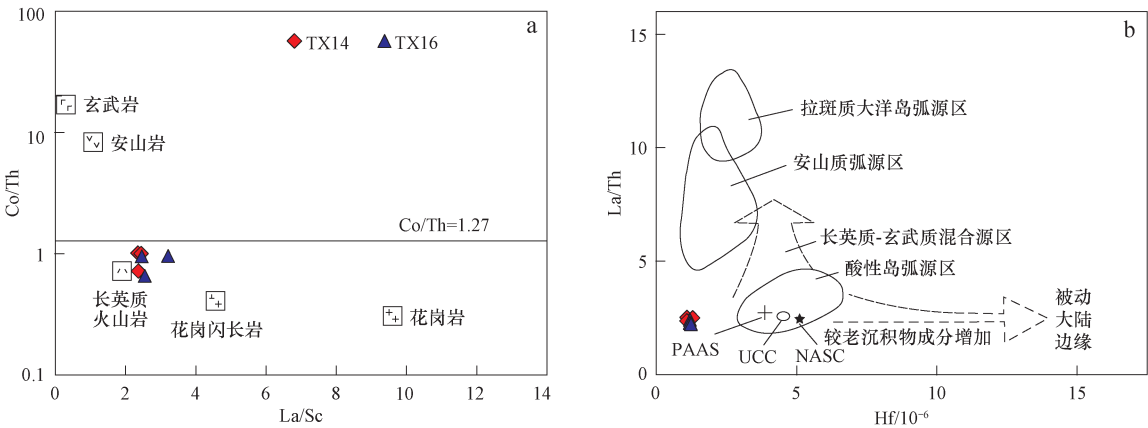


图 7 塔里木盆地同 1 井泥岩源区岩石类型判别图解
Fig. 7 Discrimination diagrams showing rock types of provenance for the mudstones in Well TX1, Tarim Basin
a. $Co/Th-La/Sc$ 图解,底图据文献[40];b. $La/Th-Hf$ 图解,底图据文献[41]

了同期的花岗闪长岩($744.0\text{ Ma} \pm 9.3\text{ Ma} \sim 790.0\text{ Ma} \pm 22.1\text{ Ma}^{[30]}$)和闪长岩($757.4\text{ Ma} \pm 6.2\text{ Ma}^{[43]}$)侵入体,玛北1井(MB1)在6 322~6 477 m 钻遇黑云母二长片麻岩($1\,920\text{ Ma} \pm 14\text{ Ma}^{[44]}$),楚探1井(CT1)在7 806 m 钻遇片麻岩($1\,968.0\text{ Ma} \pm 8.4\text{ Ma}^{[31]}$),中深1井(ZS1)在6 810~6 835 m 钻遇含石榴石花岗岩($1\,895\text{ Ma} \pm 1\text{ Ma}^{[42]}$)和蚀变钠长岩($1\,915.3\text{ Ma} \pm 5.4\text{ Ma}^{[31]}$),塔东2井(TD2)在4 996~5 040 m 钻遇蚀变角闪花岗岩($1\,908.2\text{ Ma} \pm 8.6\text{ Ma}^{[5]}$; $1\,927.3\text{ Ma} \pm 7.5\text{ Ma}$, $1\,920.4\text{ Ma} \pm 9.8\text{ Ma}^{[31]}$)。本文所观测的砂砾岩的砾石、岩屑相应组分与下伏基底这些中酸性火山岩、侵入岩及变质岩在岩性上非常一致。同1井上、下两段泥岩稀土元素分布模式与下伏基底岩石高度相似(图5a)。此外,对同1井砂岩、夏河1井砂岩和巴探5井砾岩进行的碎屑锆石定年结果表明,砂砾岩的“双峰式”碎屑锆石年龄谱(峰值分别为790~730 Ma

和2 000~1 800 Ma)与中央隆起带基底结晶岩的年龄组成非常吻合,而与周边的塔北隆起、库鲁克塔格、阿克苏-柯坪、铁克里克-西昆仑和阿尔金-敦煌地区基底结晶岩年龄结构都有明显区别。这些证据一致表明,同1井、夏河1井和巴探5井前寒武系碎屑岩的物源只能来自其下伏基底。前文已述及,中央隆起带在寒武系沉积之前表现为一个高低起伏的复杂正向地貌单元^[5-7],其海平面以上部位完全可以作为蚀源区向周边提供碎屑。

4.3 源区构造环境

4.3.1 砾岩和砂岩碎屑模式判别

砾岩、砂岩复杂的碎屑组成和较低的成熟度暗示源区处于一个构造强烈的活动带。利用碎屑模式对砾岩、砂岩源区构造环境进行判别(图8)。在Qt-F-L图解中(图8a),夏河1井砂岩和巴探5井砾岩表现出

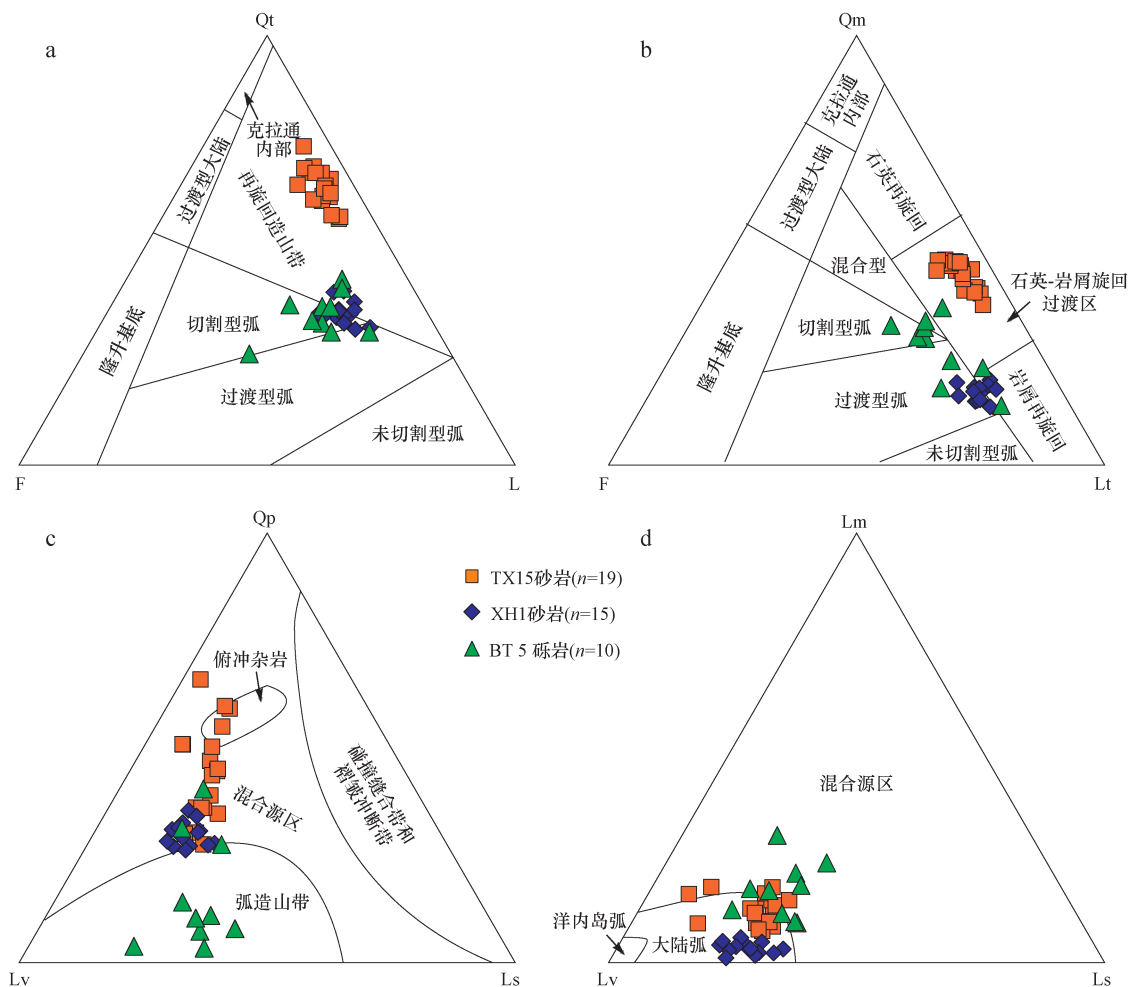


图8 砾岩和砂岩构造环境判别

Fig. 8 Discrimination diagrams showing tectonic settings for conglomerates and sandstones

a. Qt-F-L 图解; b. Qm-F-Lt 图解; c. Qp-Lv-Ls 图解; d. Lm-Lv-Ls 图解

(a-c 底图据文献[19]; d 底图据文献[20].)

相似的石英、长石、岩屑比例,一致投影在切割型弧-过渡型弧边界附近,个别样品投影在邻近的再旋回造山带范围。同 1 井砂岩以高石英含量与二者相区别,投影于再旋回造山带分区。在 $Qm-F-Lt$ 图解中(图 8b),夏河 1 井砂岩以较高的岩屑+多晶石英总量主要分布在过渡型弧分区,巴探 5 井砾岩由于不同样品间单晶石英和多晶石英比例变化较大而散布于切割型弧和过渡型弧分区,同 1 井砂岩则集中于石英-岩屑旋回过渡区。在 $Qp-Lv-Ls$ 图解中(图 8c),夏河 1 井砂岩和巴探 5 井砾岩由于相对高的火山岩屑比例和相对低的多晶石英比例都投影在弧造山带分区及其附近,同 1 井砂岩则因不同样品间火山岩屑和多晶石英颗粒比例的明显差别而分散在弧造山带和俯冲杂岩分区之间。在 $Lm-Lv-Ls$ 图解中(图 8d),所有样品都表现出火山岩岩屑在全部岩屑中占主导地位,再次表明源区具有弧造山带属性,而沉积岩岩屑、变质岩岩屑的普遍存在则说明该源区应为大陆边缘弧而非洋内岛弧。

4.3.2 泥岩地球化学判别

Bhatia^[28]通过对澳大利亚古生代杂砂岩和泥岩的稀土元素特征研究发现,不同构造环境中碎屑岩的稀土元素配分模式有显著差别。由图 5a 和图 5c 可知,同 1 井 6 件泥岩样品稀土元素配分模式与活动大陆边缘背景下的泥岩比较一致。Floyd 等^[29]提出经上地壳平均值标准化的碎屑岩微量元素蛛网图可有效判断源区构造环境。图 5b 和图 5d 显示,同 1 井泥岩的微量元素总体特征与产于大陆岛弧+活动大陆边缘构造背景的沉积岩更为相似。Bhatia^[28],Bhatia 和 Crook^[45]在对已知构造成因盆地的碎屑岩微量、稀土元素研究的基础上,总结了一系列用以区分不同构造环境的特征参数,将同 1 井泥岩与之敏感参数进行对比(表 4)不难发现,其构造背景与大陆岛弧或活动大陆边缘比较接近。在 $La-Th-Sc$, $Th-Sc-Zr/10$ 和 $Th-Co-Zr/10$ 图解中(图 9),同 1 井泥岩样品投影于大陆岛

表 4 不同构造环境泥岩微量、稀土元素判别参数及与同 1 井泥岩对比
Table 4 Discrimination parameters for trace and rare elements of the mudstones formed in different tectonic settings and comparison with these of the mudstones in Well TX1

构造环境	物源类型	Th/U ^a	La/Y ^a	La/Th ^a	La/Sc ^a	Th/Sc ^a	Ti/Zr ^a	La/Yb ^b	La _N /Yb _N ^b	LREE/HREE ^b	Eu/Eu* ^b
大洋岛弧	未切割岛弧	2.1±0.78	0.48±0.12	4.26±1.2	0.55±0.22	0.15±0.08	56.8±21.4	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	切割岛弧	4.6±0.45	1.02±0.07	2.36±0.3	1.82±0.3	0.85±0.13	19.7±4.3	11±4	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
活动大陆边缘	隆升基底	4.8±0.38	1.33±0.09	1.77±0.1	4.55±0.8	2.59±0.5	15.3±2.4	12.5	8.5	9.1	0.6
被动大陆边缘	克拉通内高地	5.6±0.37	1.31±0.26	2.22±0.47	6.25±1.35	3.06±0.8	6.74±0.9	15.9	10.8	8.5	0.56
TX14 均值		4.20	1.32	2.47	2.37	0.96	28.84	12.77	9.16	7.99	0.60
TX16 均值		4.50	1.42	2.33	2.73	1.17	30.80	13.42	9.63	8.38	0.60

注:典型数据来源 a 据文献[45], b 据文献[28]

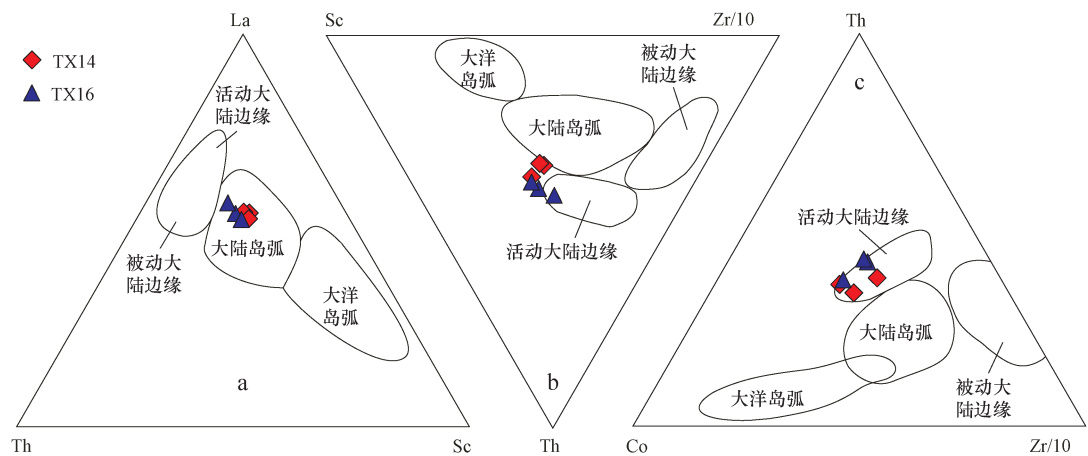


图 9 塔里木盆地同 1 井泥岩构造环境判别

Fig. 9 Discrimination diagram showing the tectonic settings for the mudstones in Well TX1, Tarim Basin
a. $La-Th-Sc$ 图解; b. $Th-Sc-Zr/10$ 图解; c. $Th-Co-Zr/10$ 图解
(底图据文献[45].)

弧、活动大陆边缘或二者之间的区域,与砂砾岩碎屑模式判别结果一致。

除上述分析外,还对3口井中获得的年轻一组碎屑锆石(峰值在790~730 Ma)进行了详细的原位微量元素测定和研究,结果表明这些新元古代锆石的寄主岩石全部形成于陆缘弧构造环境,指示的物源区构造背景与全岩分析结果相互验证。限于篇幅,相关资料将另文发表。

4.4 地质意义

塔里木盆地前寒武纪基底研究始终是国内外地质学家关注的焦点,但囿于可获取资料的局限性,迄今对塔里木盆地基底的物质组成、性质、形成时代及构造背景仍所知甚少且争议重重^[2,5,30-31,42,46-54]。尽管已有的同位素年代学数据表明前寒武纪几次重大构造-热事件在盆地内部及周缘几乎都有迹可循,但仅依此初建的年代构造格架显然还不足以限定基底的构造演化过程。南、北塔里木在磁异常上表现出的醒目差异^[2-4]及沿中央磁异常带发育的隐伏前寒武纪古隆起^[5-7],都暗示塔里木盆地基底并非是完全的一块。本文对同1井、夏河1井和巴探5井寒武系碳酸盐岩下伏砾岩、砂岩和泥岩的系统研究显示,这些碎屑岩形成于活动构造环境,其碎屑锆石中较年轻的一组(峰值在790~730 Ma)来源于中酸性弧火山岩或侵入岩,源区即下伏基底新元古代陆缘弧,较老一组(峰值在2 000~1 800 Ma)则代表了剥露的或卷入新元古代弧岩浆岩中的古元古代陆壳(沉积岩砾石及岩屑的出现暗示弧高部位初始盖层的少量贡献)。上述来自碎屑记录的证据与前期报道的同1井底安山岩(747 Ma)、英安岩(755 Ma)形成时代及构造环境非常吻合^[14],也与东部卡塔克隆起上塔参1井底闪长岩(790~744 Ma)、花岗闪长岩(757 Ma)所揭示岩浆活动的时代及构造环境^[30,48]一致,基底由安山岩-英安岩-闪长岩-花岗闪长岩构成的典型钙碱性弧岩浆组合正是上覆沉积物碎屑组分的主要来源。巴楚隆起和卡塔克隆起上4口深钻井火成岩、碎屑岩的实测数据和研究结论表明,横亘塔里木盆地中部的中央隆起带是一条新元古代大陆边缘弧,塔里木盆地的基底是由新元古代造山作用形成的拼合基底,中央隆起带即该拼合基底的“缝合带”。这一认识不但合理解释了南、北塔里木基底特征的显著差异,同时也为中央隆起带及两侧盆地形成演化和含油气性研究提供了重要参考依据。

5 结论

1) 塔里木盆地巴楚隆起上同1井、夏河1井和巴探5井寒武系碳酸盐岩之下的碎屑沉积岩物源来自其下伏基底,源区在新元古代(峰期约790~730 Ma)处于大陆边缘弧构造环境,碎屑组分主要来自钙碱性弧火山岩和侵入岩,少量可能来自剥露的或卷入新元古代弧岩浆岩中的古元古代陆壳及弧的初始盖层。

2) 本文获取的碎屑记录证据与前人对同1井底安山岩、英安岩和塔参1井底花岗闪长岩、闪长岩的研究成果一致,表明横亘塔里木盆地中部的中央隆起带是一条新元古代大陆边缘弧,塔里木盆地的基底是由新元古代造山作用形成的拼合基底。这意味着南、北塔里木盆地形成演化过程及含油气性可能有所差异。

致谢:国家地质实验测试中心邓月金老师、中国石化勘探院李王鹏博士和中国石油大学(北京)研究生丛林、赵焱等人在本文测试分析工作中给予了大力协助,侯泉林教授、吴春明教授、曾令森研究员、闫臻研究员和向忠金博士对本文研究工作给予指导,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 翟明国. 中国主要古陆与联合大陆的形成——综述与展望[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1583-1606.
Zhai Mingguo. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 1829-1852, doi:10.1007/s11430-013-4665-7.
- [2] 贾承造,魏国齐,姚慧君. 塔里木盆地油气勘探丛书:盆地构造演化与区域构造地质[M]. 北京:石油工业出版社, 1995: 1-70.
Jia Chengzao, Wei Guoqi, Yao Huijun. Oil and gas exploration books in Tarim basin-Tectonic evolution and regional structural geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 1-70.
- [3] 袁学诚. 中国地球物理图集[M]. 北京:地质出版社, 1996: 1-200.
Yuan Xuecheng. Geophysical Atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-200.
- [4] 许炳如. 根据航磁解释的塔里木盆地基岩分布[J]. 西安石油学院学报, 1997, 12(6): 8-11.
Xu Bingru. Basement rock distribution in Tarim basin inferred from Aeromagnetic Data [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1997, 12(6): 8-11.
- [5] 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): 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.

- [6] 杨鑫,徐旭辉,钱一雄,等.塔里木盆地基底组成的区域差异性探讨[J].大地构造与成矿学,2014,(3):544-556.
Yang Xin, Xu Xuhui, Qian Yixiong, et al. Discussion on regional differences of basement composition of the Tarim basin, NW China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, (3): 544-556.
- [7] 吴林,管树巍,任荣,等.前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例[J].石油勘探与开发,2016,43(6):905-915.
Wu Lin, Guan Shuwei, Ren Rong et al. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: A case study of Tarim basin in Neoproterozoic and source rocks in early Cambrian, Western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 905-915.
- [8] 何治亮,毛洪斌,周晓芬,等.塔里木多旋回盆地与复式油气系统[J].石油与天然气地质,2000,21(3):207-213.
He Zhiliang, Mao Hongbin, Zhou Xiaofen, et al. Complex petroleum system and multicycle basin in Tarim [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 207-213.
- [9] 何登发,贾承造,李德生,等.塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J].石油与天然气地质,2005,26(1):64-77.
He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64-77.
- [10] 许志琴,李思田,张建新,等.塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J].岩石学报,2011,27(1):1-22.
Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 1-22.
- [11] 郑孟林,王毅,金之钧,等.塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J].石油与天然气地质,2014,35(6):925-934.
Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun et al. Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 925-934.
- [12] 王步清,黄智斌,马培领,等.塔里木盆地构造单元划分标准、依据和原则的建立[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):86-93.
Wang Buqing, Huang Zhibin, Ma Peiling, et al. Establishment of division standard, evidence and principle of structural units in Tarim basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 86-93.
- [13] 李曰俊,杨海军,张光亚,等.重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J].岩石学报,2012,28(8):2466-2478.
Li Yuejun, Yang Haijun, Zhang Guangya, et al. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim basin, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2466-2478.
- [14] 李晓剑,王毅,李慧莉,等.新元古代陆缘岩浆弧——塔里木盆地巴楚隆起的基底:来自钻井岩芯的最新证据[J].岩石学报,2018,34(7):2140-2164.
Li Xiaojian, Wang Yi, Li Huili, et al. Bachu uplift in the central Tarim basin based on Neoproterozoic continental arc: New lines of evidence from drilled andesite and dacite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(7): 2140-2164.
- [15] Wang H, Chen H X, Lu J S, et al. Metamorphic evolution and SIMS U-Pb geochronology of the Qingshigou area, Dunhuang block, NW China: Tectonic implications of the southernmost Central Asian orogenic belt [J]. *Lithosphere*, 2016, 8(5): 463-479.
- [16] 李文山,李江海,周肖贝,等.塔里木盆地中央高磁异常带成因:来自地震反射剖面的新证据[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(2):281-287.
Li Wenshan, Li Jianghai, Zhou Xiaobei, et al. Genesis of high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim basin: new evidence from seismic profiles [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(2): 281-287.
- [17] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1979, 63(12): 2164-2182.
- [18] Ingersoll R V, Bullard T F, Ford R L, et al. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson Point-counting method [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1984, 54: 103-116.
- [19] Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [A]. In Zuffa G C (eds). *Provenance of arenites* [C]. NATO ASI Series, 148, Netherlands, Springer, 1985: 333-361.
- [20] Marsaglia K M, Ingersoll R V. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: A reassessment of magmatic-arc provenance [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104(12): 1637-1649.
- [21] Yan Z, Wang Z Q, Wang T, et al. Provenance and tectonic setting of clastic deposits in the Devonian Xicheng basin, Qinling orogen, central China [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 557-574.
- [22] Yan Z, Wang Z Q, Chen J L, et al. Detrital record of Neoproterozoic arc-magmatism along the NW margin of the Yangtze Block, China: U-Pb geochronology and petrography of sandstones [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(4): 322-334.
- [23] Dürr S B. Quick estimation of pebble volumes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 677-679.
- [24] Rollinson H R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation [M]. London: Longman Scientific and Technical, Essex. 1993: 102-170.
- [25] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [26] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1993, 284: 21-40.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [28] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1): 97-113.
- [29] Floyd P A, Shail R, Leveridge B E, et al. Geochemistry and provenance of Rhenohercynian synorogenic sandstones: implications for tectonic environment discrimination [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1991, 57(57): 173-188.
- [30] Guo Z J, Yin A, Robinson A, et al. Geochronology and geochemistry of deep-drill-core samples from the basement of the central Tarim basin [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25(1): 45-56.

- [31] Yang H J, Wu G H, Kusky T M, et al. Paleoproterozoic assembly of the North and South Tarim terranes: New insights from deep seismic profiles and Precambrian granite cores [J]. *Precambrian Research*, 2018, 305: 151–165.
- [32] Dickinson W R. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1970, 40(2): 695–707.
- [33] Folio M F. Conglomerates as clues to the sedimentary and tectonic evolution of a suspect terrane: Wallowa Mountains, Oregon [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104(12): 1561–1576.
- [34] 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 造山带沉积盆地构造原型恢复 [J]. *地质通报*, 2008, 27(12): 2001–2013.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, et al. Restoring the original tectonic types of sedimentary basins in the orogenic belts [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(12): 2001–2013.
- [35] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford, Blackwell Scientific, 1985: 312.
- [36] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21(8): 169–200.
- [37] Girty G H, Barber R W, Knaack C. REE, Th, and Sc evidence for the depositional setting and source rock characteristics of the Quartz Hill chert, Sierra Nevada, California [J]. *Geological Society of America Special Papers* 1993, 284: 109–120.
- [38] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1990, 97(3): 256–267.
- [39] Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1–2): 77–93.
- [40] Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 392–407.
- [41] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of Geological Society*, 1987, 144(4): 531–542.
- [42] Xu Z Q, He B Z, Zhang C L, et al. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: new geochronological evidence from deep drilling samples [J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 150–162.
- [43] 邬光辉, 张承泽, 汪海, 等. 塔里木盆地中部塔参1井花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 [J]. *地质通报*, 2009, 28(5): 568–571.
- Wu Guanghui, Zhang Chengze, Wang Hai, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of granodiorite of the Tapan 1 well in the central Tarim basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(5): 568–571.
- [44] 杨鑫, 李慧莉, 岳勇, 等. 塔里木盆地震旦纪末地层—地貌格架与寒武纪初期烃源岩发育模式 [J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(2): 189–198.
- Yang Xin, Li Huili, Yue Yong, et al. The strata and palaeo-geomorphology framework at the end of Neoproterozoic and development mode of source rocks at the beginning of Cambrian [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(2): 189–198.
- [45] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1986, 92(2): 181–193.
- [46] Yao Y, Hsü K J. Origin of the Kunlun Mountains by arc-arc and arc-continent collisions [J]. *Island Arc*, 1994, 3(2): 75–89.
- [47] 郭召杰, 张志诚, 贾承造, 等. 塔里木克拉通前寒武纪基底构造格架 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2000, 30(6): 568–575.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Jia Chengzao, et al. Basement of Tarim craton and tectonic evolution [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(6): 568–575.
- [48] 李曰俊, 宋文杰, 吴根耀, 等. 塔里木盆地中部隐伏的晋宁期花岗岩闪长岩和闪长岩 [J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(2): 97–104.
- Li Yuejun, Song Wenjie, Wu Genyao, et al. Jinning granodiorite and diorite deeply concealed in the central Tarim basin [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(12): 2061–2068.
- [49] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1): 94–107.
- [50] 邬光辉, 孙建华, 郭群英, 等. 塔里木盆地碎屑锆石年龄分布对前寒武纪基底的指示 [J]. *地球学报*, 2010, 31(1): 65–72.
- Wu Guanghui, Sun Jianhua, Guo Qunying, et al. The distribution of detrital zircon U-Pb ages and its significance to Precambrian basement in Tarim basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2010, 31(1): 65–72.
- [51] 辛后田, 赵凤清, 罗照华, 等. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区元古代精细年代格架的建立及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2011, 85(12): 1977–1993.
- Xin Houtian, Zhao Fengqing, Luo Zhaohua, et al. Determination of the Paleoproterozoic geochronological framework in Aqtashtagh area in southeast Tarim, China, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(12): 1977–1993.
- [52] 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 Huaikun, 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.
- [53] Zhang J X, Gong J H, Yu S Y. 1.85 Ga HP granulite facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites [J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169(5): 511–514.
- [54] Zhang J X, Yu S Y, Gong J H, et al. The latest Neoarchean-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses [J]. *Precambrian Research*, 2013, 226: 21–42.