

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.587



准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组物源区特征： 碎屑岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约

白建科^{1,2}, 陈隽璐^{1,2}, 朱小辉^{1,2}, 冯 博^{1,3}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西西安 710054

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 准噶尔盆地东北缘广泛发育泥盆纪卡拉麦里组, 其形成时代与构造背景一直备受争议. 对卡拉麦里组碎屑岩开展岩石学、地球化学和同位素年代学研究, 结果显示: 卡拉麦里组形成于斜坡—半深海沉积环境, 具浊积岩特征. 砂岩样品 SiO_2 含量高, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比值低, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值高, REE 配分曲线总体表现为右倾, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=4.81\sim 8.03$, $\delta\text{Eu}=0.59\sim 0.80$, Eu 具有弱负异常, 构造环境判别图解揭示卡拉麦里组砂岩物源区构造背景为被动大陆边缘. 砂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定表明, 锆石年龄分为 2 期, 主要为 393~524 Ma, 其次是 823~3 077 Ma, 表明卡拉麦里组物源区地质时代主要为早古生代和前寒武纪, 分别对应于准噶尔盆地周缘早古生代造山带和前寒武纪结晶基底. 综合分析认为, 卡拉麦里组形成时代为早—中泥盆世, 沉积于准噶尔地块东北缘被动陆缘一侧. 中泥盆世开始, 卡拉麦里古生代洋盆持续向北俯冲消减, 形成了野马泉岛弧及其弧前沉积体系, 最终闭合于早石炭世之前.

关键词: 准噶尔盆地东北缘; 卡拉麦里组; 碎屑锆石; 被动大陆边缘; 地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)12-4411-16

收稿日期: 2018-03-10

Provenance Characteristics of Kalamaili Formation in Northeastern Margin of Junggar Basin: Constraints of Geochemistry and Detrital Zircon U-Pb Geochronology

Bai Jianke^{1,2}, Chen Junlu^{1,2}, Zhu Xiaohui^{1,2}, Feng Bo^{1,3}

1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

2. Orogen Research Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The Devonian Kalamaili Formation is widely exposed in the northeastern margin of Junggar basin, while its depositional age and tectonic setting are still in debate. In this study, an integrated analysis of petrology, geochemistry and isotope chronology for the Kalamaili Formation was carried out. The results show that the Kalamaili Formation, characterized by turbidite features, was mainly deposited in the slope and semi-deep ocean. Geochemically, the Kalamaili Formation sandstone is characterized by high SiO_2 , low $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. The REE distributing patterns show rightward incline and weaker negative Eu anomaly ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=4.81\sim 8.03$, $\delta\text{Eu}=0.59\sim 0.80$). Tectonic-setting discrimination diagrams of the Kalamaili Formation sandstone indicate a passive-margin tectonic setting. The detrital zircon age spectrum of the Kalamaili Formation sandstone was composed of two age groups, including 393–524 Ma and 823–3 077 Ma, which correspond to the

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20160006, DD20179608); 国家自然科学基金项目 (Nos. 41202077, 41402051); 陕西省自然科学基金项目 (No. 2018JM4001).

作者简介: 白建科 (1983—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事沉积学、盆地分析与造山带演化方面研究. ORCID: 0000-0002-3205-819X. E-mail: baijianke2003@163.com

引用格式: 白建科, 陈隽璐, 朱小辉, 等, 2018. 准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组物源区特征: 碎屑岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约. 地球科学, 43(12): 4411–4426.

Early Paleozoic orogenic belt and Precambrian crystalline basement of Junggar basin, respectively. It is concluded that the Kalamaili Formation was deposited in a passive-margin of the northeastern Junggar block during the Early-Middle Devonian. Since the Middle Devonian, the Paleozoic Kalamaili Ocean subducted northward continuously, and then formed the Yemaquan island arc and related forearc sedimentary system, and finally the Kalamaili Ocean closed prior to the Early Carboniferous.

Key words: northeastern margin of Junggar basin; Kalamaili Formation; detrital zircon; passive continental margin; geochemistry.

0 引言

准噶尔盆地是我国西部地区一个典型的多旋回叠合盆地, 蕴含丰富的能源矿产资源, 整体呈西宽东窄的三角形展布于阿尔泰造山带和天山造山带之间, 大地构造位置上属于哈萨克斯坦板块, 是中亚增生型造山带的重要组成部分 (Coleman, 1989; 肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; Xiao *et al.*, 2008; 李涤等, 2012; 张克信等, 2015a). 已有研究表明, 准噶尔盆地是叠加在先期古亚洲洋构造域板块构造演化基础上的复合型盆地, 其基底性质及古生代构造演化过程, 不仅关系到北疆地区古生代期间构造格局的恢复、地质演化历史的重建, 而且对盆地及其周缘能源矿产资源的勘查和评价也具有重要意义 (李亚萍等, 2007; 宋继叶等, 2015). 盆地东北缘卡拉麦里地区以卡拉麦里蛇绿混杂岩带的出露为标志, 代表了哈萨克斯坦—准噶尔板块和西伯利亚板块之间古亚洲洋发育、消减、陆块碰撞造山的演化过程, 不仅是显生宙中亚大陆地壳生长和古亚洲洋演化的重要阶段, 而且也涉及到新疆北部地区古构造格局的恢复和大陆造山带演化的重要问题 (肖序常等, 1992; Charvet *et al.*, 2001; 姜耀俭等, 2002; 陈业全和王伟锋, 2004; Xiao *et al.*, 2008; 白建科等, 2014). 近年来, 随着准噶尔盆地东北缘卡拉麦里地区石炭系油气勘探的突破, 特别是卡拉麦里千亿立方米大气田的确认, 使得该地区古生代地层的研究越来越受到重视. 前人对准噶尔盆地东北缘石炭纪地层岩石组合、盆地充填序列、火山岩年代学及地球化学等方面研究做了大量工作, 以此来反映构造环境及造山带演化历史 (李锦轶等, 1990, 2009; 姜耀俭等, 2002; 吴小奇等, 2009; 毛治国等, 2010; 郭召杰, 2012; 李涤等, 2012; 王启宇等, 2014; 张峰等, 2014; 白建科等, 2018). 但是, 对盆地东北缘广泛出露的泥盆纪卡拉麦里组重视程度不够. 泥盆纪作为该地区古生代洋盆发展、演化的关键时期, 其沉积时限、源区特征及大地构造背景等对盆地的形成与演化具有很强的约束作用.

卡拉麦里组指分布于准噶尔盆地东北缘卡拉麦

里山一带的泥盆纪地层, 岩石组合为灰绿色细砂岩、粉砂岩、粗砂岩夹钙质砂岩、砂质灰岩、泥质粉砂岩, 时代为泥盆纪 (新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1999; 张克信等, 2017). 从创名起, 其时代跨度较大, 一直存在争议, 李亚萍等 (2007) 对卡拉麦里组砂岩组分进行碎屑锆石年代学研究, 认为其形成时代为早石炭世晚期; 蔡雄飞等 (2015a) 对卡拉麦里组岩屑砂岩进行锆石年代学研究, 并结合灰岩透镜体中生物化石组合, 将其形成时代厘定为早—中泥盆世. 此外, 卡拉麦里组的物源区至今仍未取得统一认识, 一种观点认为卡拉麦里组沉积时期, 卡拉麦里洋发生向北的俯冲, 砂岩碎屑成分以岩屑为主, 分选和磨圆均较差, 属于近源沉积, 形成于弧后盆地被动陆缘或边缘海盆环境, 物源来自于准噶尔盆地东部奠基在前奥陶纪陆壳基底之上的古生代岛弧 (李亚萍等, 2007; 李锦轶等, 2009; 蔡雄飞等, 2015a); 另一种观点认为, 泥盆纪时期, 卡拉麦里洋发生双向俯冲 (顾连兴等, 2001; Xiao *et al.*, 2008), 卡拉麦里组应属于弧前环境, 物源与卡拉麦里—哈尔里克火山岩浆弧有关.

近年来, 沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谱已经成为确定蚀源区组成、沉积时代和形成构造环境的一种有效途径 (Bruguier *et al.*, 1997; 李亚萍等, 2007; 闫臻等, 2007; 杨栋栋等, 2012; 白建科等, 2015). 碎屑岩地球化学特征对沉积盆地形成时期构造背景具有很强的“示踪”作用, 已经成为地质构造复杂地区的重要研究对象 (李良等, 2017). 本文在前人研究的基础上, 通过对准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组砂岩碎屑组分、地球化学成分及碎屑锆石年龄的系统分析, 进一步确定泥盆纪卡拉麦里组物源区特征, 从而为准噶尔盆地基底组成、时代及属性研究提供重要信息.

1 地质背景

准噶尔盆地是发育在哈萨克斯坦—准噶尔板块之上的大型多旋回叠合盆地, 盆地周缘造山系中残留了多条不同时代的蛇绿混杂岩带, 反映准噶尔板

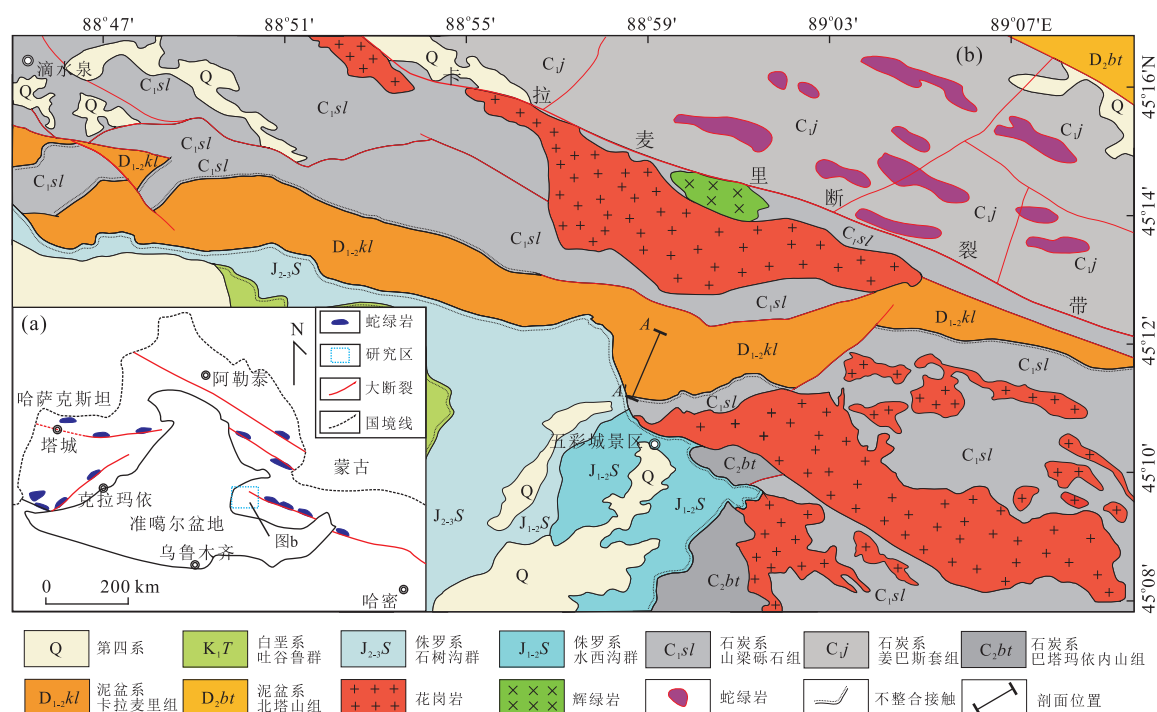


图 1 准噶尔盆地东北缘地质简图

Fig.1 Geological map of the northeastern margin of Junggar basin

图 a 据白建科等(2014)修改;图 b 据白建科等(2018)修改

块经历了复杂的俯冲消减和地体拼贴过程(龙晓平等, 2006).盆地东北部由北至南依次出露阿尔曼太—扎河坝和卡拉麦里 2 条蛇绿混杂岩带(张克信等, 2015b).其中,南部卡拉麦里蛇绿混杂岩带由一套古生代海相碎屑岩、火山碎屑岩、火山岩以及蛇绿岩组成,属于古生代发育的卡拉麦里洋壳残片(图 1a).以北西西—南东东走向的卡拉麦里断裂带为中心,晚古生代地层出露齐全(图 1b).断裂带北侧为野马泉岛弧及其弧前盆地沉积体系,由富含火山物质的火山—沉积地层组成,具活动陆缘岩浆岩带沉积特征;南侧为准噶尔地块及其被动陆缘沉积体系,以滨—浅海相及陆相碎屑岩、少量火山熔岩、火山碎屑岩为主,具稳定的被动陆缘沉积特征(李锦轶等, 2009; 郭召杰, 2012).研究区出露地层包括古生界和新生界两大部分:泥盆纪卡拉麦里组分为上、下两段,下段为粗碎屑岩系的石英质细砾岩、含砾细砂岩夹粉砂岩,上段为细砂岩、粉砂岩、泥岩互层,夹灰岩透镜体(蔡雄飞等, 2015b);中泥盆统北塔山组下部为安山岩、安山玢岩、火山角砾岩和火山碎屑岩,向上沉积碎屑岩逐渐增多,包括砂岩、细砂岩、钙质砂岩、砂砾岩、砾岩等;下石炭统姜巴套组为富含钙质的火山碎屑岩和陆源碎屑岩,含植物、腕足类等化石;下石炭统山梁砾石组以陆相碎屑岩为主,包括泥

质粉砂岩、砂岩、含砾粗砂岩、夹砾岩、炭质页岩及煤线,含植物化石;上石炭统巴塔玛依内山组以玄武岩、玄武安山岩为主,夹少量流纹岩和火山碎屑岩;中下侏罗统水西沟群为一套含煤碎屑岩系,自下而上分为八道湾组、三工河组、西山窑组;中上侏罗统石树沟群为杂色泥岩和砂岩不均匀互层,底部为砾岩、砂岩,含脊椎动物化石、植物化石;下白垩统吐谷鲁群为泥岩、砂质泥岩、砂岩、粉砂岩组成的不均匀互层,底部有底砾岩(张克信等, 2017);侵入岩以 340 Ma 左右的后碰撞花岗岩和辉长岩为主(田健等, 2015).

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

准噶尔盆地东北缘泥盆纪卡拉麦里组分为上、下两段,下段为粗碎屑岩系的石英质细砾岩、含砾细砂岩夹粉砂岩(蔡雄飞等, 2015b),上段为细砂岩、粉砂岩、泥岩互层,夹灰岩透镜体;下石炭统山梁砾石组砾岩、含砾粗砂岩角度不整合于泥盆纪卡拉麦里组灰绿色细碎屑岩之上(图 2, 图 3a).卡拉麦里组上段泥岩中可见到粗砂岩滑塌岩块,大小为 10 cm×30 cm~2 m×3 m,岩块散乱分布(图 3b),泥岩中薄

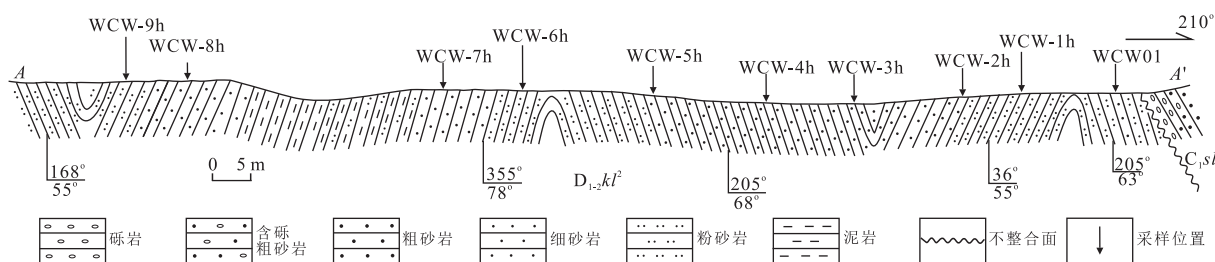


图 2 卡拉麦里组上段地质剖面及采样位置

Fig.2 Geological profile and sampling locations in the upper section of the Kalamaili Formation

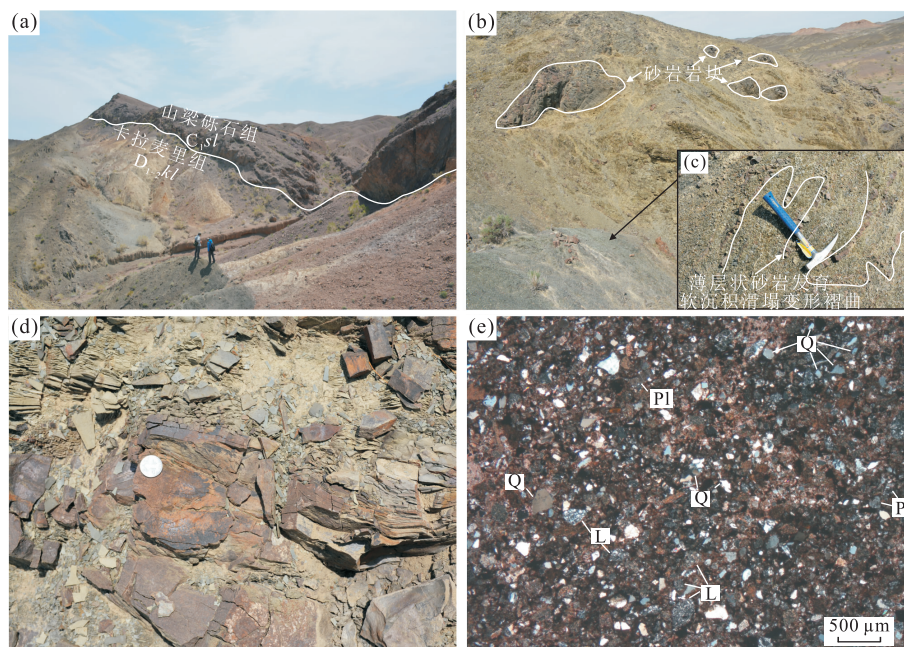


图 3 卡拉麦里组上段岩石组合及样品显微镜下照片

Fig.3 Photos of rock assemblage and samples under microscope in the upper section of the Kalamaili Formation

Q.石英;Pl.斜长石;L.岩屑

层状砂岩夹层发育软沉积滑塌变形褶曲(图 3c),指示其形成于深水斜坡环境,具滑塌浊积岩特征。样品(编号:WCW01)采自东准噶尔五彩湾地区五彩城景区北侧泥盆纪卡拉麦里组上段,岩性为灰绿色薄层状砂岩(图 2),采样点地理坐标为 $45^{\circ}11'18''\text{N}$ 、 $88^{\circ}58'49''\text{E}$,相应的全岩分析样品编号为 WCW-1h~9h,采样位置见图 2。显微镜下鉴定为不等粒岩屑杂砂岩(图 3d,3e),岩石为块状构造,砂状结构,颗粒支撑,成分主要为岩屑(约占 60%),其次是石英(约占 15%)、长石(约占 8%~10%)。岩屑种类主要为蚀变岩碎屑(绢云母化碎屑岩),其次为酸性火山岩与凝灰岩碎屑,少量硅质岩碎屑。岩屑形态多为次棱角状或不规则状,少数为次圆状,粒径约为 0.06~0.50 mm,分选度较差。长石为斜长石,形态多数为次棱角状,少数为次圆状,粒径约为 0.1~0.4 mm。石英

颗粒也多数为次棱角状,少数为次圆状,粒径约为 0.10~0.45 mm。胶结物为蚀变质与泥质,胶结方式以孔隙式胶结为主。

2.2 分析方法

主量元素分析方法为 X 荧光光谱分析(XRF),使用的仪器是荷兰帕纳科公司 Axios 4.0 kW 波长色散 X 射线荧光光谱仪,精密度 $\text{RSD} \leq 0.134$,稳定性 $\text{RMS Rel}(\%) \leq 0.050$ 。稀土微量元素分析采用 Thermo Fisher 公司生产的 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于 5×10^{-9} ,相对标准偏差优于 5%。测试单位为中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心。

首先进行锆石样品靶的制备,将无色透明、无裂痕、无包体的锆石颗粒固定在透明的环氧树脂中,抛光打磨至锆石颗粒一半出露,然后进行反射光照相、

阴极发光(CL)和 LA-ICP-MS 同位素分析测试. 锆石的制靶、CL 图像及 U-Pb 同位素含量测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. 阴极发光(CL)照相采用装有 Mono CI3+ 阴极发光系统的扫描电镜拍摄, 锆石的 U-Pb 同位素含量在该实验室使用带有 GeoLas200M 激光剥蚀系统 Agilent 7500a ICP-MS 测定. 用标准硅酸盐玻璃 NIST610 进行仪器最佳化, 数据处理采用 Glitter(ver.4.0) 程序, 年龄计算以 91500 标准锆石作为外标进行同位素分馏校正, 激光束斑直径为 $30\ \mu\text{m}$, 详细的分析过程和参数见柳小明等(2002). 样品的同位素比值、元素含量、年龄计算及年龄谱图的绘制均采用 Isoplot(ver2.49) 程序完成.

3 分析结果

3.1 地球化学特征

3.1.1 主量元素 砂岩样品(编号: WCW-1h~9h) 主量元素分析结果(表 1)表明, SiO_2 含量较高, $w(\text{SiO}_2) = 63.75\% \sim 79.41\%$ (平均值为 71.57%), Al_2O_3 含量次之, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 9.66\% \sim 16.01\%$ (平均值为 12.37%), $w(\text{MgO}) = 0.49\% \sim 3.38\%$ (平均值为 1.32%), $w(\text{K}_2\text{O}) = 0.10\% \sim 2.36\%$ (平均值为 1.22%), $w(\text{Na}_2\text{O}) = 2.24\% \sim 8.55\%$ (平均值为 4.18%), $w(\text{CaO}) = 0.91\% \sim 3.84\%$ (样品 WCW-1h 的 $w(\text{CaO})$ 较高, 为 7.21%), $w(\text{MnO}) = 0.05\% \sim 0.54\%$ (平均值为 0.17%), $w(\text{TiO}_2) = 0.38\% \sim 0.67\%$ (平均值为 0.48%), $w(\text{P}_2\text{O}_5) = 0.08\% \sim 0.22\%$ (平均值为 0.13%), 烧失量为 $1.09\% \sim 3.63\%$ (样品 WCW-2h 的烧失量较高, 为 5.58%). 样品 WCW-1h 的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 为 6.39% , 较其他样品平均值 3.32% 高, 说明砂岩中基性组分含量较高. 利用 $\lg[w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})] - \lg[w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)]$ 图解(Pettijohn *et al.*, 1987) 对 9 件砂岩样品进行分类, 结果显示, 全部样品都落入杂砂岩区域(图 4), 与显微镜下观察结果一致.

3.1.2 稀土和微量元素 卡拉麦里组砂岩样品稀土和微量元素分析结果见表 1. 稀土元素总量变化范围较大($\Sigma\text{REE} = 101.99 \times 10^{-6} \sim 186.22 \times 10^{-6}$), 平均值为 125.70×10^{-6} , 反映源区的多样性. 在球粒陨石标准化配分型式图(图 5a)中, 所有样品稀土配分曲线总体表现为轻稀土元素(LREE)富集和重稀土元素(HREE)亏损的右倾模式, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 4.81 \sim 8.03$, 平均值为 6.19 . $\delta\text{Eu} = 0.59 \sim 0.80$, 平均

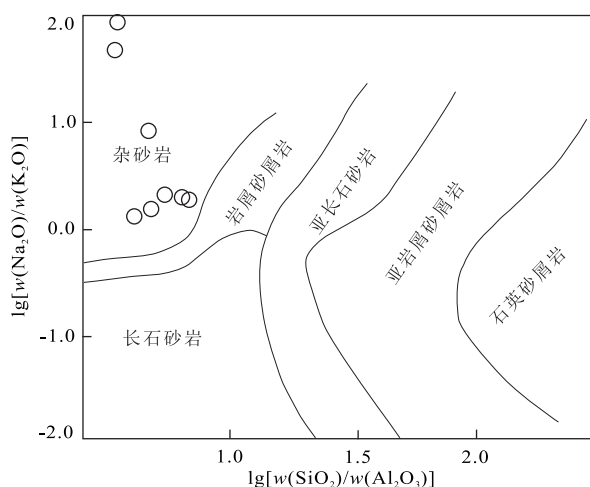


图 4 卡拉麦里组砂岩 $\lg[w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})] - \lg[w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)]$ 分类图

Fig.4 Classification diagram of the sandstones from the Kalamaili Formation based on $\lg[w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})] - \lg[w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)]$

值为 0.71 , Eu 具有弱的负异常, $\delta\text{Ce} = 0.85 \sim 1.04$, 平均值为 0.99 , Ce 基本无异常. 卡拉麦里组砂岩 REE 特征说明其物质来源于上地壳. 微量元素中大离子亲石元素如 Ba、Rb、Cs、Ta 等和 Nb、Ti、Zr 等高场强元素化学性质比较稳定, 从物源区风化剥蚀后, 在搬运、沉积、成岩过程中基本不会发生改变. 因此, 沉积岩中这些特征微量元素起到示踪沉积过程和追踪物源区的作用, 反映物源区性质. 卡拉麦里组砂岩样品中特征微量元素 Th、U、Hf、Rb、Sc、Zr、Y 平均含量分别为 4.71×10^{-6} 、 1.57×10^{-6} 、 3.95×10^{-6} 、 34.14×10^{-6} 、 1.68×10^{-6} 、 148.28×10^{-6} 、 26.37×10^{-6} . 在上地壳标准化微量元素模式图(图 5b)中, 曲线变化规律较一致, Li、Th、Tb、Ba 等一些高场强元素相对富集, Cs、Rb、Cr 相对亏损, 总体与上地壳微量元素含量基本一致, 其物源主要是上地壳剥蚀来的物质.

3.2 锆石阴极发光特征与 U-Pb 测年结果

卡拉麦里组砂岩(编号: WCW01)碎屑锆石阴极发光图像(图 6)显示, 锆石颗粒为无色透明, 形状多为短柱状、次棱角状, 少量呈次圆—圆状, 粒度一般为 $50 \sim 120\ \mu\text{m}$. 大部分锆石显示其发育清晰的振荡环带, 具岩浆锆石形貌特征; 少数锆石呈浑圆状, 没有明显的岩浆环带, 但所有锆石均具有较高的 Th、U 含量, 且 Th/U 比值都介于 $0.21 \sim 1.20$, 该比值与岩浆成因锆石特征(通常 > 0.1)相符. 样品中锆石的浑圆状特征说明其经历了长距离的搬运或沉积

表 1 卡拉麦里组砂岩样品主量(%)和稀土、微量元素(10^{-6})分析结果Table 1 Contents of major elements (%) and REE, trace elements (10^{-6}) of the sandstone samples from the Kalamaili Formation

样品号	WCW-1h	WCW-2h	WCW-3h	WCW-4h	WCW-5h	WCW-6h	WCW-7h	WCW-8h	WCW-9h
SiO ₂	63.75	67.50	77.53	74.06	79.41	72.78	65.19	69.68	74.24
Al ₂ O ₃	12.55	11.52	9.99	12.60	9.66	12.54	15.24	16.01	11.21
Fe ₂ O ₃	3.40	3.30	1.90	0.80	0.97	0.67	0.73	0.68	2.17
FeO	2.99	2.49	1.42	1.52	1.33	3.33	1.86	1.44	1.94
CaO	7.21	3.00	1.14	1.30	1.01	0.91	3.84	1.15	2.10
MgO	3.38	1.73	0.93	0.86	0.80	1.38	0.69	0.49	1.66
K ₂ O	1.87	1.56	1.54	2.36	1.54	0.63	0.17	0.10	1.23
Na ₂ O	2.30	2.24	2.89	3.46	2.77	5.06	7.82	8.55	2.50
TiO ₂	0.67	0.65	0.38	0.45	0.45	0.50	0.41	0.40	0.44
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.14	0.22	0.15	0.08	0.21	0.09	0.08
MnO	0.54	0.32	0.08	0.05	0.05	0.11	0.21	0.07	0.11
LOI	1.09	5.58	2.08	2.35	1.89	2.03	3.63	1.34	2.34
Total	99.86	99.99	100.02	100.03	100.03	100.02	100.00	100.00	100.02
La	17.7	19.8	20.0	30.8	20.0	30.9	22.7	17.0	20.1
Ce	39.8	43.5	42.9	71.9	45.3	60.5	43.5	42.2	41.9
Pr	4.75	5.45	5.44	9.56	5.74	7.15	6.81	5.81	5.07
Nd	18.5	21.6	21.7	39.7	23.3	28.0	29.7	24.6	20.5
Sm	4.36	5.03	4.25	7.69	4.46	5.37	6.70	5.71	4.18
Eu	1.11	0.95	0.95	1.64	0.93	1.27	1.39	1.16	1.03
Gd	4.38	4.66	3.73	6.66	3.77	4.23	5.75	4.77	3.50
Tb	0.76	0.78	0.67	1.14	0.66	0.76	1.00	0.86	0.61
Dy	4.51	4.46	4.18	6.91	4.25	4.38	6.07	5.24	3.41
Ho	0.86	0.88	0.88	1.44	0.90	0.89	1.29	1.07	0.70
Er	2.31	2.46	2.40	3.99	2.44	2.47	3.59	2.95	1.95
Tm	0.34	0.38	0.38	0.60	0.37	0.41	0.57	0.48	0.28
Yb	2.28	2.51	2.51	3.66	2.42	2.98	4.10	3.40	2.05
Lu	0.33	0.37	0.38	0.53	0.34	0.47	0.65	0.54	0.30
ΣREE	101.99	112.83	110.37	186.22	114.88	149.78	133.82	115.79	105.58
LREE	86.22	96.33	95.24	161.29	99.73	133.19	110.80	96.48	92.78
HREE	15.77	16.50	15.13	24.93	15.15	16.59	23.02	19.31	12.80
LREE/HREE	5.47	5.84	6.30	6.47	6.58	8.03	4.81	5.00	7.25
δEu	0.77	0.59	0.71	0.68	0.68	0.79	0.67	0.66	0.80
δCe	0.99	1.01	0.99	1.02	1.02	0.96	0.85	1.04	0.99
(La/Yb) _N	5.57	5.66	5.72	6.04	5.93	7.44	3.97	3.60	7.03
Li	48.90	37.20	10.90	10.80	7.05	26.20	12.50	10.70	22.60
Sc	5.960	3.700	1.210	1.120	0.990	0.570	0.140	0.086	1.300
Cr	72.8	63.4	43.7	11.6	11.8	20.6	7.6	11.9	12.6
Co	12.30	14.30	8.18	3.88	5.61	6.28	8.47	10.20	6.77
Ni	26.30	30.50	7.46	3.43	5.04	8.28	7.64	8.03	6.97
Rb	67.50	57.40	36.00	49.40	35.10	10.60	13.27	5.39	32.60
Sr	183	130	320	234	204	203	230	256	355
Y	23.8	23.0	22.4	38.6	25.0	22.3	38.2	24.9	19.1
Nb	9.00	9.77	4.19	4.89	3.58	7.48	12.50	11.30	3.84
Cs	3.960	3.700	1.210	1.120	0.990	0.570	0.140	0.186	1.300
Ba	250.0	256.0	369.0	386.0	304.0	238.0	102.0	86.5	492.0
Ta	0.67	0.72	0.26	0.24	0.18	0.37	0.50	0.40	0.22
Pb	10.10	10.30	13.70	7.84	7.40	7.93	10.50	10.40	10.80
V	108.0	103.0	48.4	46.4	41.6	61.1	35.9	32.3	45.7
Zr	187.0	199.0	88.8	92.6	76.7	137.0	230.0	232.0	91.4
Hf	5.33	5.63	2.34	2.30	2.00	3.60	6.09	5.90	2.33
U	2.06	2.22	1.05	1.15	1.08	1.13	2.26	2.36	0.84
Th	2.26	8.63	2.82	2.10	1.88	5.04	9.23	7.83	2.59
Ga	16.7	15.8	12.3	13.4	11.4	15.5	10.8	10.2	11.7

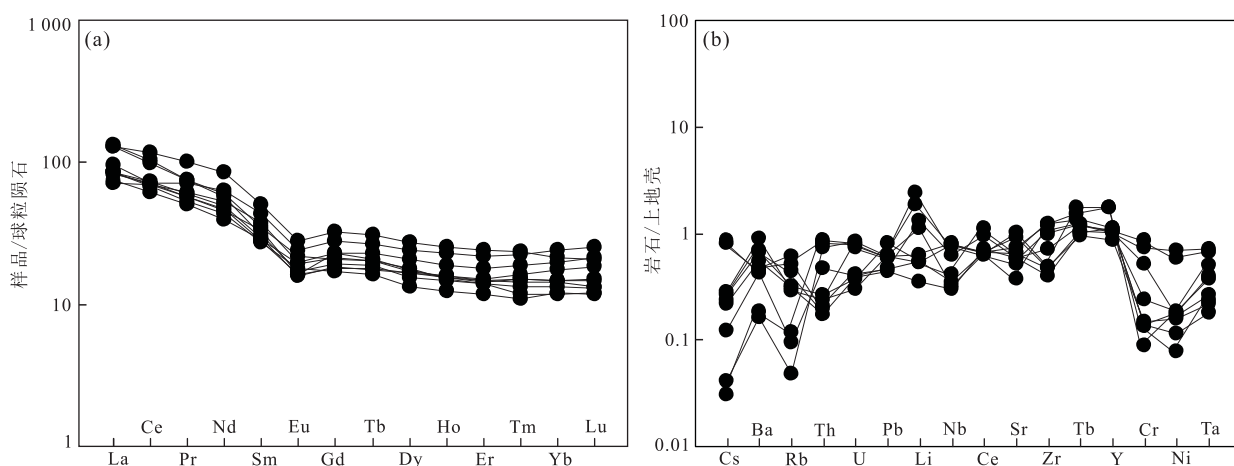


图 5 卡拉麦里组砂岩球粒陨石标准化 REE 配分曲线(a)和上地壳标准化微量元素模式(b)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and upper crust-normalized trace element patterns (b) of the sandstones from the Kalamaili Formation

球粒陨石标准化数据引自 Boynton(1984);上地壳标准化数据引自 Taylor and McLennan(1985)

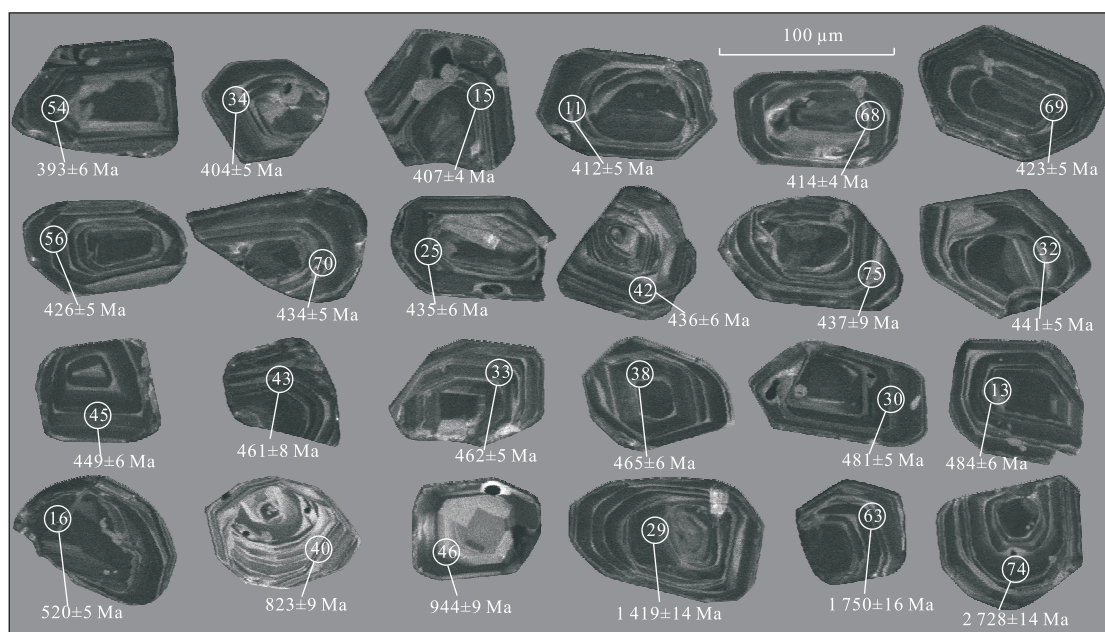


图 6 卡拉麦里组砂岩中代表性锆石的阴极发光图像

Fig.6 CL images of detrital zircons of the sandstones from the Kalamaili Formation

再旋回。

本次对砂岩样品(编号:WCW01)中 80 颗碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年,共获得 80 个测点的分析数据,剔除 3 个谐和度低于 90%的锆石数据,最终获得 77 个有效数据(表 2),这些测点年龄数据均位于 U-Pb 谐和图中的谐和线上或其附近(图 7a),表明所测锆石在形成后 U-Pb 同位素体系

是封闭的,基本没有 U 或 Pb 的加入或丢失。对 $<1\,000\text{ Ma}$ 的锆石,采用 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{U}$ 表面年龄;但对于 $>1\,000\text{ Ma}$ 的锆石,由于含大量放射性成因 Pb 而采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄。

从表 2 可以看出,碎屑锆石 U-Pb 表面年龄值分布范围很宽,从 $393\pm6\text{ Ma}$ 至 $3\,077\pm13\text{ Ma}$,其中碎屑锆石表面年龄主要集中在 $393\sim524\text{ Ma}$,显示

表 2 卡拉麦里组砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果

Table 2 Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb analytical results of the sandstones from the Kalamali Formation

测试点	元素含量(10^{-6})			同位素比值			年龄(Ma)		
	^{232}Th	^{206}Pb	$^{232}\text{Th}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
WCW01-01	130.39	184.35	61.55	0.057 1	0.001 9	0.020 5	0.080 9	501	13
WCW01-02	85.32	119.82	35.55	0.055 8	0.003 0	0.029 1	0.071 9	447	19
WCW01-03	53.49	140.70	43.25	0.056 2	0.002 4	0.024 6	0.074 5	462	16
WCW01-04	127.76	175.84	52.90	0.056 1	0.005 0	0.049 5	0.072 9	454	32
WCW01-05	96.42	89.20	56.81	0.069 9	0.003 0	0.063 2	0.154 2	925	26
WCW01-06	77.85	119.07	37.46	0.056 8	0.003 4	0.035 4	0.076 2	475	23
WCW01-07	269.75	344.99	115.89	0.057 5	0.003 1	0.034 5	0.081 3	505	21
WCW01-08	102.55	154.40	47.39	0.056 3	0.003 3	0.033 0	0.074 3	462	21
WCW01-09	106.27	145.29	42.55	0.055 8	0.002 7	0.026 0	0.070 9	442	17
WCW01-10	93.34	166.86	49.07	0.055 9	0.002 1	0.020 4	0.071 2	444	13
WCW01-11	125.68	198.43	54.07	0.055 7	0.003 2	0.028 5	0.065 9	416	19
WCW01-12	240.65	312.42	91.86	0.055 9	0.002 2	0.021 5	0.071 1	444	14
WCW01-13	134.22	188.11	60.59	0.056 7	0.001 7	0.017 5	0.077 9	483	11
WCW01-14	135.99	241.50	75.05	0.056 6	0.001 6	0.016 1	0.075 2	469	10
WCW01-15	66.89	316.88	85.40	0.055 0	0.001 4	0.012 3	0.065 2	408	8
WCW01-16	231.08	360.36	125.17	0.058 6	0.001 2	0.013 7	0.084 0	526	8
WCW01-17	83.29	154.36	45.27	0.055 9	0.002 5	0.023 7	0.070 9	443	16
WCW01-18	74.73	144.88	48.36	0.057 3	0.001 9	0.021 0	0.080 7	501	13
WCW01-19	56.29	143.25	45.87	0.057 1	0.002 7	0.027 9	0.077 4	484	18
WCW01-20	32.46	69.21	19.97	0.055 6	0.004 0	0.034 5	0.069 8	435	25
WCW01-21	133.77	210.06	60.79	0.055 5	0.001 7	0.015 7	0.069 9	435	10
WCW01-22	19.51	36.13	12.23	0.057 7	0.007 8	0.087 0	0.081 8	509	54
WCW01-23	324.71	452.58	1.00	0.114 6	0.001 8	0.078 5	0.337 8	1 875	13
WCW01-24	383.58	329.73	96.47	0.056 6	0.001 9	0.017 9	0.070 7	446	12
WCW01-25	66.76	99.49	28.72	0.056 0	0.006 4	0.038 9	0.069 8	438	40
WCW01-26	67.50	125.53	38.60	0.056 4	0.005 7	0.037 9	0.074 3	463	37
WCW01-27	147.42	260.79	77.25	0.055 7	0.001 5	0.014 3	0.071 6	445	9
WCW01-28	229.55	417.46	145.94	0.064 0	0.001 6	0.017 7	0.084 4	565	10
WCW01-29	44.86	113.42	115.65	0.090 9	0.002 3	0.085 6	0.246 3	1 429	19
WCW01-30	114.28	323.41	103.68	0.056 9	0.001 7	0.017 4	0.077 4	482	11
WCW01-31	61.49	96.03	118.89	0.100 4	0.002 1	0.037 3	0.298 9	1 662	17
WCW01-32	140.66	174.45	51.22	0.055 5	0.002 7	0.026 1	0.070 9	440	17
WCW01-33	176.62	317.05	97.53	0.056 4	0.002 4	0.024 2	0.074 3	463	16
WCW01-34	184.82	230.30	61.70	0.054 8	0.001 7	0.014 6	0.064 7	404	10
WCW01-36	241.80	272.65	81.68	0.056 2	0.002 2	0.021 8	0.072 3	451	14
WCW01-37	72.21	201.81	69.34	0.057 6	0.002 6	0.038 9	0.082 9	514	18
WCW01-38	86.82	121.30	37.62	0.056 3	0.003 9	0.039 4	0.074 8	465	25
WCW01-39	33.47	64.66	21.65	0.057 0	0.003 4	0.037 5	0.080 8	499	23
WCW01-40	55.26	138.64	78.22	0.066 3	0.001 5	0.027 8	0.136 1	821	13
WCW01-41	127.73	170.52	52.56	0.056 5	0.002 4	0.024 5	0.074 3	464	16

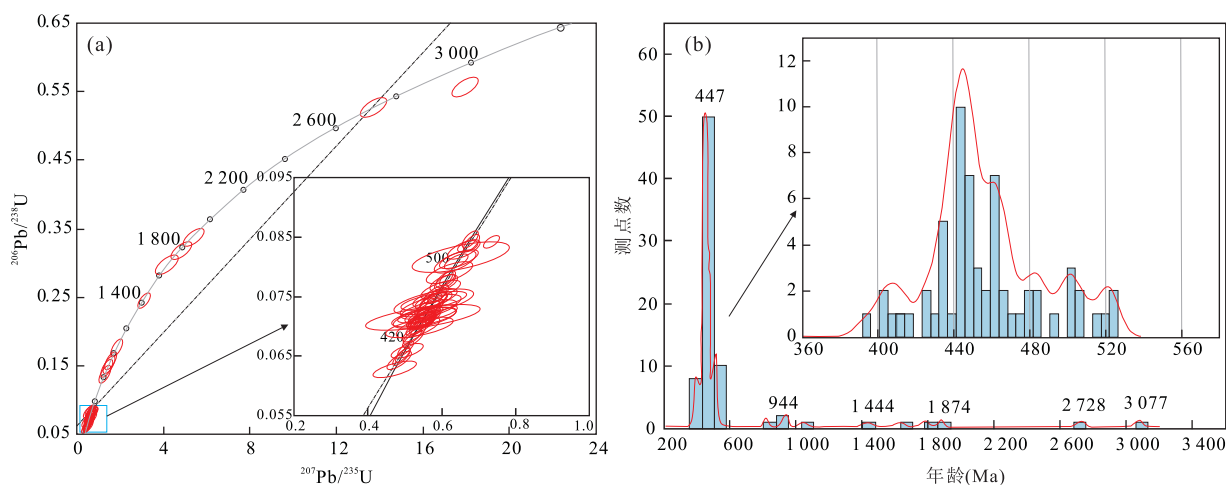


图 7 卡拉麦里组碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和频率直方图(b)

Fig.7 Concordia U-Pb diagram (a) and age frequency diagram (b) of detrital zircons from the Kalamaili Formation

出多峰值的特征,其主峰值为 447 Ma,次要的峰分别为 393~414 Ma、423~491 Ma、500~524 Ma(图 7b).另外,该样品中还有 10 粒表面年龄大于 550 Ma 的碎屑锆石.结合碎屑锆石的阴极发光图像特征(图 6),将所获得的碎屑锆石 U-Pb 表面年龄大致分为以下 4 个年龄段:

(1)393~414 Ma:该组共 6 粒锆石,占总数的 8%,Th、U 含量分别变化于 $66.89 \times 10^{-6} \sim 203.91 \times 10^{-6}$ 和 $172.09 \times 10^{-6} \sim 316.88 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.21~1.08.该组年龄的范围为 393 ± 6 Ma~ 414 ± 4 Ma,峰值年龄为 407 Ma,属于早泥盆世,最小年龄值 393 ± 6 Ma 代表了卡拉麦里组上段砂岩沉积时代的下限,为早一中泥盆世之交.

(2)423~491 Ma:该组共 51 粒锆石,占总数的 66%,Th、U 含量分别变化于 $30.64 \times 10^{-6} \sim 383.58 \times 10^{-6}$ 和 $52.51 \times 10^{-6} \sim 502.43 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.30~1.20.该组年龄的范围为 423 ± 5 Ma~ 491 ± 7 Ma,峰值年龄为 445 Ma,从晚寒武世连续到晚志留世.

(3)500~524 Ma:该组共 10 粒锆石,占总数的 13%,Th、U 含量分别变化于 $19.51 \times 10^{-6} \sim 269.75 \times 10^{-6}$ 和 $36.13 \times 10^{-6} \sim 432.01 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.36~0.78.该组年龄的范围为 500 ± 6 Ma~ 524 ± 5 Ma,峰值年龄为 510 Ma,属于早一中寒武世.

(4)823~3 077 Ma:该组共 10 粒锆石,占总数的 13%,Th、U 含量分别变化于 $44.86 \times 10^{-6} \sim 324.71 \times 10^{-6}$ 和 $89.2 \times 10^{-6} \sim 338.86 \times 10^{-6}$,Th/U 为 0.29~1.08.其中,新元古代年龄值区间有 4 粒锆石,范围为 823~1 050 Ma;古元古代年龄值区间有

4 粒锆石,范围为 1 444~1 874 Ma;另有 2 粒锆石年龄值属于太古代,分别为 2 728 Ma 和 3 077 Ma.

4 讨论

4.1 卡拉麦里组形成时代

准噶尔盆地东北缘卡拉麦里大断裂南侧广泛分布一套泥盆纪碎屑岩,1:20 万库普幅(L-46-XXV)和 1:20 万卡拉麦里山幅(L-45-XXX)将其命名为泥盆纪卡拉麦里组,与下伏红柳沟组为整合或平行不整合接触,与上覆塔木岗组为整合或不整合接触,含腕足类、植物化石(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1999).从地层命名角度看,一个组跨越如此长的地质时期,是不合理的,亟需重新合理划分与厘定.李亚萍等(2007)根据卡拉麦里组上亚组碎屑锆石最小年龄 327 Ma,认为其为早石炭世晚期或更晚地质时期形成的;1:5 万滴水泉幅(L45E017020)在卡拉麦里组下部细碎屑岩中采到微体放射虫化石,但由于重结晶作用强,未鉴定出时代,在上部灰岩透镜体中采到珊瑚、腕足类和海百合茎化石,将其厘定为早一中泥盆世;蔡雄飞等(2015a)获得卡拉麦里组岩屑砂岩最年轻碎屑锆石年龄为 380 Ma,属于晚泥盆世,却认为卡拉麦里组形成时代为早一中泥盆世.由于碎屑岩样品采集位置不明及化石能否代表原地沉积等因素,准噶尔盆地东北缘卡拉麦里组至今仍未获得可靠的年龄信息.本文选择卡拉麦里组露头良好的地区,在详细测制地层剖面的基础上,对其中的砂岩试图采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,并结合地层接触关系,约束卡拉麦里组碎屑岩的

形成时代。

陆源碎屑沉积岩中的碎屑锆石,含有其源区地质组成和时代的信息,地层的沉积时代一定比碎屑形成的时代年轻,因此碎屑锆石的年龄常常被用来制约地层沉积时代的下限(Williams, 2001)。本次所获得的卡拉麦里组上段碎屑锆石最年轻时代为 393 ± 6 Ma,而且碎屑锆石 CL 图像及 Th/U 比值都表明所有锆石几乎都是岩浆成因的,指示碎屑锆石形成时代为早—中泥盆世之交。结合 1:5 万滴水泉幅(L45E017020)和蔡雄飞等(2015a)对卡拉麦里地区泥盆纪卡拉麦里组地层划分情况,考虑到本次所分析测试样品采自卡拉麦里组上段,锆石 U-Pb 年龄仅限制了卡拉麦里组上段沉积时代的下限为 393 Ma,下段沉积时代应早于 393 Ma。上泥盆统克安库都克组底部以陆相磨拉石砾岩夹粗砂岩沉积组合为特征,角度不整合于卡拉麦里组之上,且克安库都克组底部采获古植物先鳞木(未定种)(*Prelepidodendron* sp.),时代主要为晚泥盆世(王富明等, 2014; 蔡雄飞等, 2015b)。由此可知,准噶尔盆地东

北缘卡拉麦里组的沉积时代应为早—中泥盆世。

4.2 物源区构造背景

准噶尔盆地东北缘构造属性与卡拉麦里蛇绿混杂岩带所代表的洋盆性质密切相关(Xiao *et al.*, 2008; 李锦轶等, 2009),存在以下 2 个方面的争议:(1)该带是否是古板块缝合带?(2)该带所代表洋盆俯冲消减过程中,古洋岩石圈板块是向北俯冲还是向南俯冲,亦或向南北两侧同时双向俯冲?部分学者认为卡拉麦里蛇绿混杂岩带南侧志留纪至泥盆纪地层为连续沉积的正常碎屑岩,具被动大陆边缘的沉积特征,蛇绿岩所代表古生代洋盆向北俯冲(李锦轶等, 2009; 郭召杰, 2012)。亦有学者认为卡拉麦里古生代洋盆的消亡是向两侧同时俯冲(顾连兴等, 2001; Xiao *et al.*, 2008)。准噶尔盆地东北缘广泛出露志留纪以来的地层,包括中志留统白山包组(S_2b)、上志留统一下泥盆统红柳沟组(S_3D_{1h})、中下泥盆统卡拉麦里组(D_{1-2k}),构成被动大陆边缘沉积序列,且构造变形由北向南逐渐减弱,指示南侧为北侧造山带的前陆褶皱冲断区,同时反映准噶尔盆地地下存在一个古老的陆块

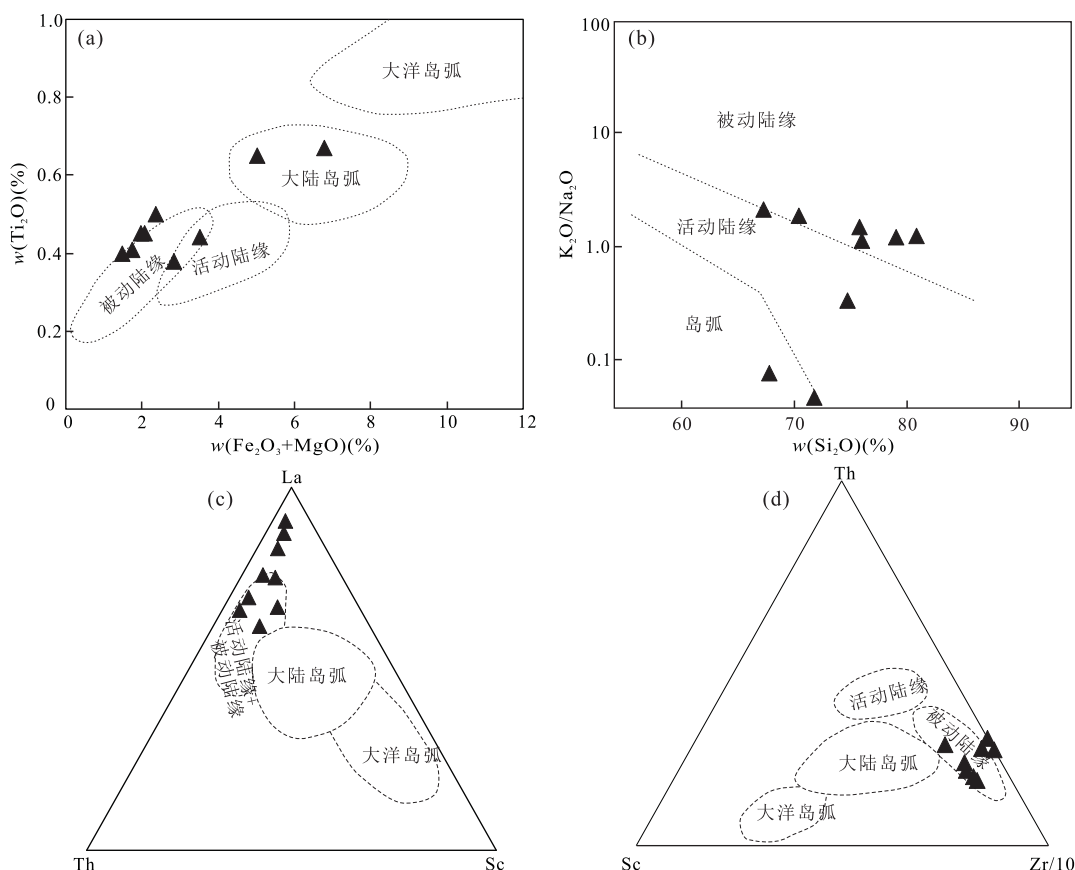


图 8 卡拉麦里组砂岩物源区主要元素(a,b)和微量元素(c,d)构造环境判别图解

Fig.8 Tectonic setting discrimination diagrams of major elements (a, b) and trace elements (c, d) for the provenance from the Kalamaili Formation

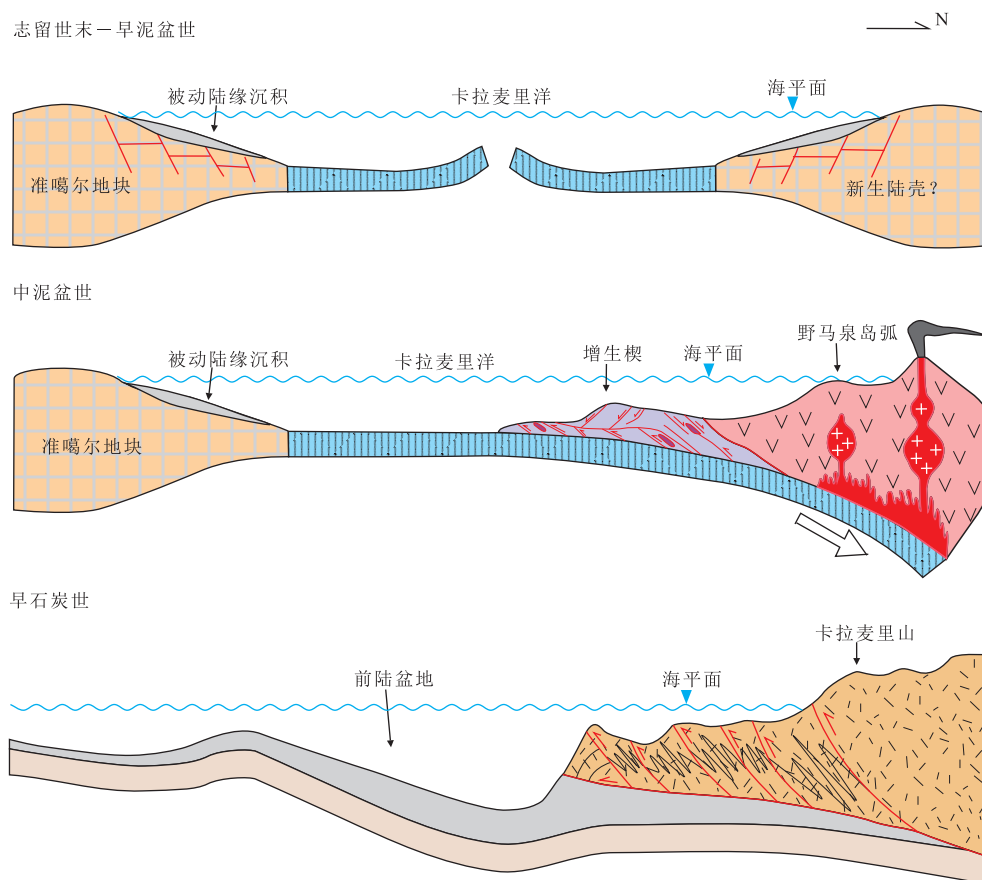


图 9 准噶尔盆地东北缘晚古生代构造演化模式

Fig.9 Tectonic evolution model for the northeastern margin of Junggar basin in the Late Paleozoic

(李亚萍等, 2007; 徐学义等, 2014).

本文测得卡拉麦里组上段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在 393~524 Ma, 占有碎屑锆石年龄值总数的 87%, 这一时间跨度很宽且基本连续的碎屑锆石年龄范围, 代表了所分析样品中碎屑锆石的主体, 相应的地质时代从早寒武世一直延续到早泥盆世. 这些特征都说明卡拉麦里组沉积时物源区岩石的复杂性. 锆石晶体结构和 Th/U 比值为 0.29~1.08, 表明所有这些碎屑锆石都是岩浆成因的, 揭示出区域内存在这一时期的岩浆活动. 从区域地质背景来分析, 这一时期 (463~390 Ma) 岩浆活动广泛发育于准噶尔盆地周缘造山带中 (李亚萍等, 2007; 徐芹芹等, 2015), 主要与古老地块周缘洋盆古生代的俯冲闭合造山有关. 另外, 此次碎屑锆石分析中获得 10 粒锆石的年龄值为 823~3 077 Ma. 其中, 823~1 050 Ma 年龄值区间有 4 粒锆石, 属于新元古代; 1 444~1 874 Ma 年龄值区间有 4 粒锆石, 属于古元古代; 另有 2 粒锆石年龄值属于太古代, 分别为 2 728 Ma 和 3 077 Ma. 前人在准噶尔盆地不同部位通过不同的方法, 针对不同的岩石, 获得大量前

寒武纪年龄信息. 李亚萍等 (2007) 在卡拉麦里组上亚组砂岩中发现 23 粒古老锆石 (元古代 19 粒, 太古代 4 粒), 这些锆石中最古老年龄为 3 073 Ma; 陆梁隆起地区石炭系火山碎屑岩、二叠系一下白垩统砂岩和盆地西北缘德伦山下白垩统砂岩中获得前寒武纪年龄可分为 3 022~2 102 Ma、1 747~1 202 Ma、861~709 Ma 和 677~544 Ma 等 5 个年龄组 (宋继叶等, 2015). 以上信息表明, 准噶尔盆地中新生代沉积盖层下部很有可能存在中太古代 3 Ga 以来的古老陆块. 准噶尔盆地南部面状航磁异常特征明显, 指示其与前寒武纪结晶基底有关 (徐学义等, 2014). 综合以上资料, 可以推断准噶尔盆地存在前寒武纪陆壳基底.

由于碎屑岩地球化学特征主要取决于源区物质组成, 而源区物质组成与大地构造背景有非常密切的联系, 不同构造环境下的碎屑岩在主量元素上差异明显 (McLennan and Taylor, 1991). 卡拉麦里组砂岩具有较高的 $w(\text{SiO}_2)$ (63.75% ~ 79.41%, 平均值为 71.57%), $w(\text{CaO})$ (0.91% ~ 3.84%, 平均值为 1.81%, 除样品 WCW-1h 为 7.21% 外), $w(\text{TiO}_2)$

(0.38%~0.67%, 平均值为 0.48%) 均较低, 与被动大陆边缘砂岩特征(高 SiO_2 , 低 CaO 、 Na_2O 、 TiO_2) 相一致(李路路等, 2017). $w(\text{Ti}_2\text{O}) - w(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 构造环境判别图解(图 8a) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 8b) 显示, 卡拉麦里组砂岩主体具被动大陆边缘构造环境特征。

高场强元素及部分大离子亲石元素, 如 REE、Y、Th、Ta、Sc、Zr、Hf、Ti 等, 地球化学性质一般比较稳定, 受搬运、沉积和成岩作用的影响非常小, 更能直观反映源区风化、物质组成等信息, 对物源区构造背景具有很好的限制作用。卡拉麦里组砂岩稀土和微量元素分析结果表明, 非迁移性元素 La/Y 比值为 0.59~1.39, 平均值为 0.87; Sc/Cr 比值为 0.01~0.10, 平均值为 0.56。La—Th—Sc 图解(图 8c) 显示, 所有样品均落入活动大陆边缘和被动大陆边缘的混合区域; 进一步采用 Th—Sc—Zr/10 图解(图 8d) 分析, 结果显示物源主要来自被动大陆边缘。

卡拉麦里蛇绿混杂岩带两侧可以对比的晚志留世地层及其中都含图瓦贝化石表明, 该洋盆于志留纪末期裂解开启(李锦轶等, 2009); 中泥盆世开始向北发生俯冲消减, 形成野马泉岛弧火山岩浆岩及其弧前岩石组合; 卡拉麦里断裂带南缘下石炭统山梁砾石组陆相磨拉石建造角度不整合于卡拉麦里组之上, 盆地中磨拉石最早形成时代可以用来限定洋盆闭合及碰撞造山时间的时代上限。滴水泉和双井子 2 个地区山梁砾石组底部粗砂岩中获得最年轻碎屑锆石年龄分别为 349 ± 4 Ma 和 355 ± 4 Ma, 代表其沉积时代为早石炭世早期(白建科等, 2018)。这套粗碎屑岩系作为卡拉麦里造山带强烈隆升造山过程的沉积学响应, 形成于前陆盆地, 限定了卡拉麦里洋盆闭合时限在早石炭世早期之前(图 9)。卡拉麦里蛇绿岩代表洋盆开启、俯冲消减期间, 卡拉麦里组碎屑岩属于准噶尔古老地块东北缘沉积, 其源区主要位于准噶尔盆地一侧。

5 结论

(1) 卡拉麦里组形成于斜坡一半深海沉积环境, 具浊积岩特征。砂岩样品 SiO_2 含量高, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比值低, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值高, REE 配分曲线总体表现为右倾, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 4.81 \sim 8.03$, $\delta\text{Eu} = 0.59 \sim 0.80$, Eu 具有弱负异常, 主、微量元素构造判别图揭示卡拉麦里组砂岩物源区具有被动大陆边缘特征。

(2) 砂岩碎屑 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定

表明, 锆石年龄分为 2 期, 主要为 393~524 Ma, 其次是 823~3 077 Ma, 表明卡拉麦里组物源区地质体时代主要为早古生代和前寒武纪, 分别对应于准噶尔盆地周缘早古生代造山带和前寒武纪结晶基底。前寒武纪年龄信息说明准噶尔盆地下部很可能存在中太古代 3 Ga 以来的古老陆块。

(3) 卡拉麦里组分为上、下两段, 上段最年轻碎屑锆石表面年龄 393 Ma 约束其沉积时代的下限, 下段沉积时代应早于 393 Ma。综合分析认为, 卡拉麦里组形成时代为早—中泥盆世, 沉积于准噶尔地块东北缘被动陆缘一侧。中泥盆世开始, 卡拉麦里古生代洋盆持续向北俯冲消减, 形成了野马泉岛弧及其弧前沉积体系, 最终闭合于早石炭世之前。

致谢: 野外工作得到了中国地质调查局西安地质调查中心唐卓高级工程师、孙吉明工程师、张越工程师、翁凯工程师、王红杰工程师等同志的帮助。两位审稿专家对本文提出了许多建设性的意见和建议, 笔者在此一并表示衷心感谢!

References

- Bai, J.K., Chen, J.L., Tang, Z., et al., 2018. The Closure Time of Junggar Paleozoic Oceanic Basin: Evidence from Carboniferous Detrital Zircon U-Pb Geochronology in Kalamaili Area. *Geological Bulletin of China*, 37(1): 26—38 (in Chinese with English abstract).
- Bai, J.K., Chen, J.L., Xu, X.Y., et al., 2014. Volcanic Lacustrine Tempestite and Its Sedimentary Tectonic Setting of the Middle Devonian in Tuziquan Area, East Junggar. *Xinjiang Geology*, 32(4): 445—450 (in Chinese with English abstract).
- Bai, J.K., Li, Z.P., Xu, X.Y., et al., 2015. Detrital Zircon U-Pb Dating of Dahalajunshan Formation in Wusun Mountain Region, Western Tianshan, and Its Geological Implications. *Geology in China*, 42(1): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Boynnton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements. *Meteorite Studies, Developments in Geochemistry*, 2: 63—114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Bruguier, O., Lancelot, J.R., Malavieille, J., 1997. U-Pb Dating on Single Detrital Zircon Grains from the Triassic Songpan-Ganze Flysch (Central China): Provenance and Tectonic Correlations. *Earth and Planetary Science Letters*, 152(1—4): 217—231. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00138-6)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur

- Autonomous Region, 1999. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Publishing House, Wuhan, 67—68 (in Chinese).
- Cai, X. F., Fan, G. M., Wang, F. M., et al., 2015a. New Progress on the Study of Kalamaili Formation of Devonian in Dongzhun, Xinjiang. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 849—860 (in Chinese with English abstract).
- Cai, X. F., Wang, F. M., Liao, Q. A., et al., 2015b. Recent Progress in Silurian-Devonian Biostratigraphy in the Southern Margin of Kalamaili Collision Zone, East Junggar, Xinjiang. *Resources Survey and Environment*, 36(4): 244—251 (in Chinese with English abstract).
- Charvet, J., Laurent-Charvet, S., Shu, L. S., et al., 2001. Paleozoic Continental Accretions in Central Asia around Junggar Block: New Structural and Geochronological Data. *Gondwana Research*, 4(4): 590—592. [https://doi.org/10.1016/s1342-937x\(05\)70395-6](https://doi.org/10.1016/s1342-937x(05)70395-6)
- Chen, Y. Q., Wang, W. F., 2004. Geodynamics Process in the Junggar Basin. *Journal of Geomechanics*, 10(2): 155—164 (in Chinese with English abstract).
- Coleman, R. G., 1989. Continental Growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621—635. <https://doi.org/10.1029/tc008i003p00621>
- Gu, L. X., Hu, S. X., Yu, C. S., et al., 2001. Initiation and Evolution of the Bogda Subduction-Torn-Type Rift. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 585—597 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. J., 2012. A Review on the Paleozoic Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and a Discussion on the Important Role of Geological Maps in Tectonic Study. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1054—1060 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., Liu, D. Q., et al., 1994. Palaeozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Xinjiang People's Publication House, Urumqi, 1—437 (in Chinese).
- Jiang, Y. J., Yang, B. Z., Wang, X. Y., et al., 2002. Structural Feature and Evolution in Northeast Part of Junggar Basin. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 462—468 (in Chinese with English abstract).
- Li, D., He, D. F., Tang, Y., et al., 2012. Genesis of Early Carboniferous Volcanic Rocks of the Dīnan Uplift in Junggar Basin: Constraints to the Closure Time of Kalamaili Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2340—2354 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., Tang, Y. Q., et al., 1990. Main Characteristics of Late Paleozoic Plate Tectonic in the Southern Part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305—316 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Yang, T. N., Li, Y. P., et al., 2009. Geological Features of the Karamaili Faulting Belt, Eastern Junggar Region, Xinjiang, China and Its Constraints on the Reconstruction of Late Paleozoic Ocean-Continental Framework of the Central Asian Region. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1817—1826 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2017. Geochronology of Ershi'erzhan Formation Sandstone in Mohe Basin and Tectonic Environment of Its Provenance. *Earth Science*, 42(1): 35—52 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.003>
- Li, L. L., Yang, B. Z., Yin, Y. H., et al., 2017. Provenance Analysis from Early Silurian Kepingtage Formation in Keping Area, Xinjiang: Constraints from Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Geochronology. *Geological Science and Technology Information*, 36(2): 1—12 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0201>
- Li, Y. P., Li, J. Y., Sun, G. H., et al., 2007. Basement of Junggar Basin: Evidence from Detrital Zircons in Sandstone of Previous Devonian Kalamaili Formation. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1577—1590 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of 42 Major and Trace Elements in Glass Standard Reference Materials by 193 nm LA-ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408—418 (in Chinese with English abstract).
- Long, X. P., Sun, M., Yuan, C., et al., 2006. Genesis of Carboniferous Volcanic Rocks in the Eastern Junggar: Constraints on the Closure of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 31—40 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Z. G., Zou, C. N., Zhu, R. K., et al., 2010. Geochemical Characteristics and Tectonic Settings of Carboniferous Volcanic Rocks in Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 207—216 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1991. Sedimentary Rocks and Crustal Evolution: Tectonic Setting and Secular Trends. *The Journal of Geology*, 99(1): 1—21. <https://doi.org/10.1086/629470>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone (Second Edition). Springer-Verlag, Berlin, 1—553. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>
- Song, J. Y., Qin, M. K., Cai, Y. Q., et al., 2015. Basement Characteristics of Junggar Basin and Its Effect on Sandstone-Type

- Uranium Metallogenesis, *Geological Review*, 61(1): 128—138 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2015.01.009>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford Blackwell, Oxford.
- Tian, J., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2015. The Discovery and Tectonic Implication of Early Carboniferous Post-Collisional I-Type Granites from the South of Karamaili in Eastern Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1471—1484 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. M., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Geological Implications of Unconformity between Upper and Middle Devonian, and 346.8 Ma Post-Collision Volcanic Rocks in Karamaili, Xinjiang. *Earth Science*, 39(9): 1243—1257 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.107>
- Wang, Q. Y., Mou, C. L., Chen, X. W., et al., 2014. Palaeogeographic Characteristics and Basic Geological Conditions of Petroleum of the Carboniferous in Junggar Basin and Its Adjacent Areas. *Journal of Palaeogeography*, 16(5): 655—671 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.7605/gdldb.2014.05.053>
- Williams, I. S., 2001. Response of Detrital Zircon and Monazite, and Their U-Pb Isotopic Systems, to Regional Metamorphism and Host-Rock Partial Melting, Cooma Complex, Southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 557—580. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00883.x>
- Wu, X. Q., Liu, D. L., Wei, G. Q., et al., 2009. Geochemical Characteristics and Tectonic Settings of Carboniferous Volcanic Rocks from Ludong-Wucuiwan Area, Junggar Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 55—66 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2008. Middle Cambrian to Permian Subduction-Related Accretionary Orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the Tectonic Evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2—4): 102—117. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.10.008>
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Geological Publishing House, Beijing, 104—123 (in Chinese).
- Xu, Q. Q., Zhao, L., Niu, B. G., 2015. Determination of the Early Paleozoic Granite in Zhifang Area, East Junggar, Xinjiang and Its Geological Implications. *Journal of Geomechanics*, 21(4): 502—516 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. Y., Li, R. S., Chen, J. L., et al., 2014. New Constrains on the Paleozoic Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang Area. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1521—1534 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Wang, Z. Q., Wang, T., et al., 2007. Tectonic Setting of Devonian Sediments in the Qinling Orogen: Constraints from Detrital Modes and Geochemistry of Clastic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1023—1042 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. D., Li, S. Y., Zhao, D. Q., et al., 2012. Geochemistry and Detrital Zircon Geochronology of Carboniferous Detrital Rocks in the Northern Margin of Dabie Mountains, Central China and Constraints to Distinguishing the Provenance Tectonic Attribute. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2619—2628 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Xu, T., Fan, J. J., et al., 2014. Whole-Rock Sm-Nd Isochron Age of Carboniferous Volcanic Rocks in Eastern Junggar and Its Tectonic Significance. *Geochimica*, 43(3): 301—316 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2014.03.011>
- Zhang, K. X., He, W. H., Luo, M. S., et al., 2017. Sedimentary Rock Formation and Sedimentary Tectonics of China. Geological Publishing House, Beijing, 1—604 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Luo, M. S., Xu, Y. D., et al., 2015a. Explanatory Note to the Sedimentary Tectonic Map of China (1 : 2 500 000). Geological Publishing House, Beijing, 1—127 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Pan, G. T., He, W. H., et al., 2015b. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2): 206—233 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白建科, 陈隽璐, 唐卓, 等, 2018. 新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限——来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束. 地质通报, 37(1): 26—38.
- 白建科, 陈隽璐, 徐学义, 等, 2014. 东准噶尔兔子泉地区中泥盆统火山湖相风暴岩及沉积构造背景. 新疆地质, 32(4): 445—450.
- 白建科, 李智佩, 徐学义, 等, 2015. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 42(1): 85—95.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 67—68.
- 蔡雄飞, 樊光明, 王富明, 等, 2015a. 新疆东准噶尔泥盆系卡拉麦里组研究新进展. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 849—860.
- 蔡雄飞, 王富明, 廖群安, 等, 2015b. 新疆东准卡拉麦里碰撞带南缘志留—泥盆系生物地层研究新进展. 资源调查与环境, 36(4): 244—251.

- 陈业全,王伟锋,2004.准噶尔盆地构造动力学过程.地质力学学报,10(2):155—164.
- 顾连兴,胡受奚,于春水,等,2001.论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化.岩石学报,17(4):585—597.
- 郭召杰,2012.新疆北部大地构造研究中几个问题的评述——兼论地质图在区域构造研究中的重要意义.地质通报,31(7):1054—1060.
- 何国琦,李茂松,刘德权,等,1994.中国新疆古生代地壳演化及成矿.乌鲁木齐:新疆人民出版社,1—437.
- 姜耀俭,杨丙中,王岫岩,等,2002.准噶尔盆地东北缘构造特征、演化及与油气的关系.地质学报,76(4):462—468.
- 李涤,何登发,唐勇,等,2012.准噶尔盆地滴南凸起早石炭世火山岩的成因及其对克拉美丽洋闭合时限的约束.岩石学报,28(8):2340—2354.
- 李锦轶,肖序常,汤耀庆,等,1990.新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征.地质论评,36(4):305—316.
- 李锦轶,杨天南,李亚萍,等,2009.东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束.地质通报,28(12):1817—1826.
- 李良,孙丰月,李碧乐,等,2017.漠河盆地二十二站组砂岩形成时代及物源区构造环境判别.地球科学,42(1):35—52.
- 李路路,杨宝忠,尹永会,等,2017.新疆柯坪地区下志留统柯坪塔格组物源分析:来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学的约束.地质科技情报,36(2):1—12.
- 李亚萍,李锦轶,孙桂华,等,2007.准噶尔盆地基底的探讨:来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据.岩石学报,23(7):1577—1590.
- 柳小明,高山,袁洪林,等,2002.193 nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析.岩石学报,18(3):408—418.
- 龙晓平,孙敏,袁超,等,2006.东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约.岩石学报,22(1):31—40.
- 毛治国,邹才能,朱如凯,等,2010.准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义.岩石学报,26(1):207—216.
- 宋继叶,秦明宽,蔡煜琦,等,2015.准噶尔盆地基底结构特征及其对砂岩型铀矿成矿的影响.地质论评,61(1):128—138.
- 田健,廖群安,樊光明,等,2015.东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义.岩石学报,31(5):1471—1484.
- 王富明,廖群安,樊光明,等,2014.新疆卡拉麦里上—中泥盆统间角度不整合和 346.8 Ma 后碰撞火山岩的意义.地球科学,39(9):1243—1257.
- 王启宇,牟传龙,陈小伟,等,2014.准噶尔盆地及周缘地区石炭系岩相古地理特征及油气基本地质条件.古地理学报,16(5):655—671.
- 吴小奇,刘德良,魏国齐,等,2009.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩地球化学特征及其构造背景.岩石学报,25(1):55—66.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等,1992.新疆北部及邻区大地构造.北京:地质出版社,104—123.
- 徐芹芹,赵磊,牛宝贵,2015.新疆东准噶尔纸房地区早古生代花岗岩的确定及其地质意义.地质力学学报,21(4):502—516.
- 徐学义,李荣社,陈隽璐,等,2014.新疆北部古生代构造演化的几点认识.岩石学报,30(6):1521—1534.
- 闫臻,王宗起,王涛,等,2007.秦岭造山带泥盆系形成构造环境:来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束.岩石学报,23(5):1023—1042.
- 杨栋栋,李双应,赵大千,等,2012.大别山北缘石炭系碎屑岩地球化学及碎屑锆石年代学分析及其对物源区大地构造属性判别的制约.岩石学报,28(8):2619—2628.
- 张峰,徐涛,范俊杰,等,2014.东准噶尔石炭系巴塔玛依内山组火山岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄及其构造意义.地球化学,43(3):301—316.
- 张克信,何卫红,骆满生,等,2017.中国沉积岩建造与沉积大地构造.北京:地质出版社,1—604.
- 张克信,骆满生,徐亚东,等,2015a.中国沉积大地构造图(1:2 500 000)说明书.北京:地质出版社,1—127.
- 张克信,潘桂棠,何卫红,等,2015b.中国构造—地层大区划分新方案.地球科学,40(2):206—233.