

新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境

廖婉琳¹, 肖 龙^{1*}, 张 雷^{1,2}, 王国灿^{1,3}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省地质矿业开发有限责任公司, 湖北武汉 430022

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 沉积物的地球化学和碎屑锆石特征在沉积岩物源分析及构造背景的研究中具有较为重要的作用。对克拉玛依后山地区早石炭世包古图组和太勒古拉组碎屑岩样品(共42个)进行了岩石学和地球化学研究, 结果显示, 这套碎屑岩的主量元素 SiO₂ 含量为 54.64%~73.14%, Al₂O₃ 含量相对较高(11.89%~19.36%), (TFe₂O₃+MgO)含量比较高(3.97%~9.99%), 反映岩石化学成熟度偏低。岩石稀土元素含量变化较大, 在 83×10⁻⁶~252×10⁻⁶ 之间变化, 无 Ce 异常, Eu 呈微弱负异常, 具有低的∑REE 等特征, 与大洋岛弧型砂岩相似。采自这2个组的碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明, 包古图组有 340 Ma 和 440 Ma 两个主峰值, 主要来源于石炭纪、志留纪的源岩; 太勒古拉组碎屑锆石主峰值为 325 Ma, 其年龄与地层年龄很接近, 推测其主要来源于同沉积石炭纪岩石。根据主、微量及稀土元素等多个构造环境判别图解的综合分析, 结果表明早石炭世包古图组和太勒古拉组沉积物的物源特征及沉积构造背景较为相似, 主要为大洋岛弧—大陆岛弧环境下的中酸性火山岩, 夹有少量基性火山岩。

关键词: 西准噶尔; 早石炭世; 沉积岩地球化学特征; 构造环境。

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2015)03-0485-19

收稿日期: 2014-05-07

Provenance and Tectonic Settings of Early Carboniferous Sedimentary Strata in Western Junggar, Xinjiang

Liao Wanlin¹, Xiao Long^{1*}, Zhang Lei^{1,2}, Wang Guocan^{1,3}

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Geological and Mining Exploration Limited Liability Company, Wuhan 430022, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The geochemistry and detrital zircon characteristics of the sediments play an important role in the study of sedimentary provenance and their tectonic settings. This paper presents petrography and geochemical study of the Early Carboniferous Baogutu Group and Tailegula Group clastic rocks in Karamay area, western Junggar, NW Xinjiang. Geochemical data show that the sedimentary rocks have SiO₂ contents (54.64%–73.14%), relatively high Al₂O₃ contents (11.89%–19.36%) and high (TFe₂O₃+MgO) contents (3.97%–9.99%), indicating low chemical maturity. Their total rare earth element contents vary between 83×10⁻⁶ and 252×10⁻⁶, characterized by no Ce anomaly and slightly negative Eu anomalies, which is similar to those of sandstones formed at oceanic island arc setting. U-Pb dating results of detrital zircons show that Baogutu Group has 340 and 440 Ma two peak values. Detrital zircons of Tailegula Group show only one peak (325 Ma) and suggests that they were sourced from the Early Carboniferous rocks. Discrimination diagrams of the major and trace elements show that the provenance and tectonic settings of Early Carboniferous Baogutu and Tailegula groups sedimentary rocks were formed from the oceanic island arc and continental island arc acidic volcanic rocks, with minor mafic volcanic rocks.

Key words: western Junggar; Early Carboniferous; geochemistry of sedimentary rock; tectonic setting.

基金项目: 中国地质调查局项目“西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点”(No. 1212011220245); 新疆 1:25 万铁厂沟镇幅(L45C002001)与克拉玛依市幅(L45C003001)区调修测项目(No. 1212011120502)。

作者简介: 廖婉琳(1989-), 女, 在读硕士, 矿物学、岩石学及矿床学专业, E-mail: 369353892@qq.com

* 通讯作者: 肖龙, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

引用格式: 廖婉琳, 肖龙, 张雷, 等, 2015. 新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境. 地球科学——中国地质大学学报, 40(3): 485–503.

0 引言

沉积岩中的矿物组成、微量元素和稀土元素、碎屑锆石特征等对沉积物的物源、沉积环境和构造背景具有十分重要的指示作用. 研究发现, 沉积物的地球化学特征, 特别是在经历短距离搬运或快速堆积的情况下, 能够很好地继承源岩的特征. 因为沉积物在风化、剥蚀、搬运的过程中, 虽然经历了一系列的物理化学作用, 但是某些元素特征, 特别是一些不相容元素(如 Al、Fe、Th、Sc、Cr、Zr、Co、Y、Hf 和稀土元素等), 它们在这些过程中含量变化并不大, 所以能够很好指示源岩的性质(Yang, 2012). 其次, 砂岩的地球化学特征受沉积构造环境的制约, 不同的构造环境会有特定的比值变化规律(Bhatia, 1983, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986; Fedo *et al.*, 1995). 笔者通过对沉积物的岩石学和地球化学特征研究, 揭示沉积物的源岩性质、大地构造背景以及与周边构造单元之间的关系.

一直以来, 西准噶尔地区因其长期复杂的构造演化历史、重要的地理位置和丰富的矿产资源吸引了许多国内外学者的研究热情. 研究区在古生代期间构造活动强烈, 沉积地层不同程度地受同期及后期岩浆、火山、变形和变质作用改造. 古生代地层因受区域断层影响, 各组野外接触关系不明确或为断层接触, 而地层本身又缺少可靠的古生物化石依据, 因此, 在对古生代地层层序、形成时代及沉积环境方面长期存在较大争议(纵瑞文等, 2014). 特别是西准噶尔南部大量分布的石炭纪地层, 其内希贝库拉斯组、包古图组及太勒古拉组自创名以来, 新老关系一直未能达成一致认识(新疆维吾尔自治区地质矿产局区域地质测量大队, 1966; 新疆维吾尔自治区地质矿产局区域地质调查大队, 1983; 王玉净等, 1987; 廖卓庭等, 1993; 李永军等, 2010). 前人对研究区内石炭纪地层的研究, 主要集中在地层的空间展布规律、地层层序关系及地层的沉积古地理研究等方面(丁培榛等, 1985; 宋春晖等, 1996; 蔡土赐, 1999; 吴晓智等, 2008; 李永军等, 2010; 向坤鹏等, 2013), 常用的手段是通过古生物研究、地层对比及沉积物粒度分析等, 而目前岩石地球化学、碎屑锆石年代学研究尚未见报道. 在野外观察和室内岩石学研究的基础之上, 本文重点研究保存在沉积物中的碎屑锆石年代学、地球化学信息, 还原源区构造背景及沉积物来源.

本文采集了 42 件早石炭世碎屑岩进行全岩地球化学分析, 并对 2 件典型碎屑岩进行锆石 U-Pb

年代学研究. 综合运用 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO-TiO}_2$ 、Th-Sc-Zr/10、La-Th-Sc 等图解进行物源及构造环境判别, 交叉验证判别结果, 同时根据碎屑锆石年龄的分布特征, 了解早石炭世碎屑岩的物质来源及沉积构造环境特征, 为明确测区构造演化过程、古地理格局提供参考.

1 区域地质特征及采样情况

研究区大地构造位置处于西准噶尔造山带, 东南邻接准噶尔盆地. 在更大区域尺度上, 研究区位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦板块的交接处, 是中亚造山带的重要组成部分(朱宝清和冯益民, 1994). 区内广泛发育石炭系火山碎屑岩及大面积晚石炭一早二叠世后碰撞花岗质岩(韩宝福等, 1998, 2006; 高睿等, 2013). 古生代地层除寒武纪外均有出露, 尤以泥盆纪与石炭纪地层分布最为广泛. 其中石炭纪地层主要发育于西准噶尔南部, 包含的地层单位有希贝库拉斯组、包古图组、太勒古拉组、哈拉阿拉特组、佳木河组, 其中前三者的分布最为广泛(图 1).

希贝库拉斯组由一套巨厚层的浊积岩组成, 整体粒度较粗, 主要岩性为凝灰质粗砂岩、凝灰质含砾中粗砂岩夹沉凝灰岩、圆砾岩等, 层理不明显, 纹层不发育, 含丰富的植物碎片化石及少量海百合茎等异地埋藏的化石. 部分地区岩石中含有较多灰岩岩块, 形态不规则, 大小不一, 部分岩块表面还粘有细小的砾石, 推测为尚未完全固结的富钙沉积物由于地震、火山、海啸等事件使浅水处沉积物失稳, 导致其沿斜坡滑移和滑塌, 在半深海—深海海底峡谷区再次沉积形成(纵瑞文等, 2014).

包古图组为一套中—薄层状的细粒火山碎屑岩, 层理明显, 纹层发育, 岩性主要为灰—深灰色薄—中层状凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩及粉—细砂状晶屑沉积凝灰岩, 夹少量凝灰质中细粒砂岩及硅质岩, 部分地区可见中厚层状流纹质晶屑凝灰岩. 该组的主体特征是细火山碎屑岩的韵律层极为发育, 单元鲍马序列厚度为毫米—厘米级, 夹少量分米级.

太勒古拉组为一套半深海—深海相灰—深灰、灰绿色凝灰质粉砂岩、粉—细粒晶屑凝灰岩、岩屑晶屑沉凝灰岩、晶屑玻屑沉凝灰岩夹凝灰质中细粒长石岩屑砂岩、凝灰质含砾中粗粒砂岩组合, 局部呈不均匀互层状产出, 夹有少量的凝灰质砾岩、硅质岩、灰岩及玄武岩等, 底部多为—层厚数米至数百米的凝灰质含砾中粗粒砂岩, 下一中部层理不发育, 多

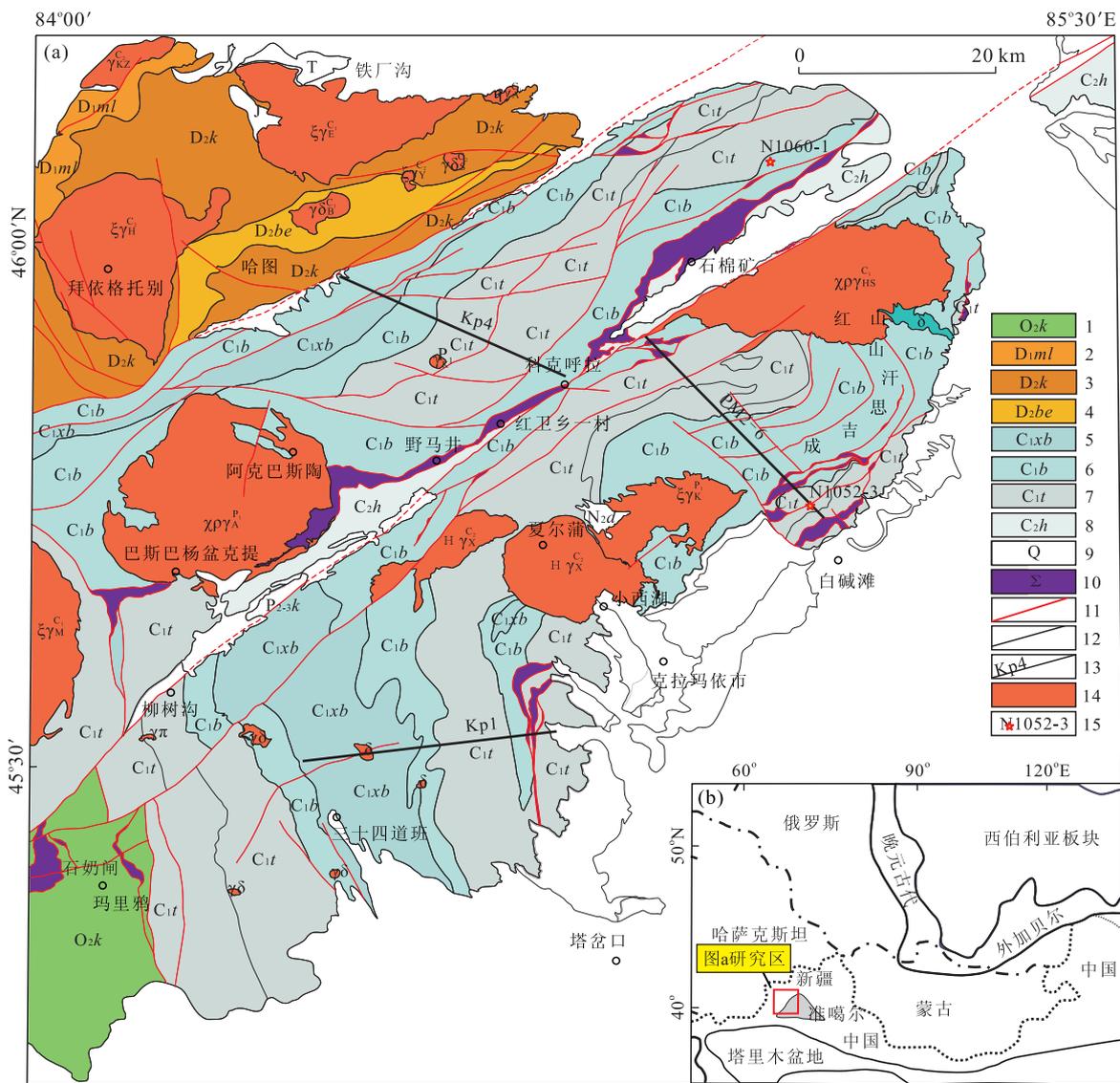


图 1 中亚造山带构造分区(a)和研究区地质简图(b)及采样点、剖面位置(实测)

Fig. 1 Simplified tectonic divisions of the Central Asian orogenic belt (a) and geological map of the study area (b) (sampling profiles and locations are marked)

图 a 据 Yang *et al.* (2012) 修改

呈厚层一块状产出,上部层理明显,水平纹层及小型交错层理、变形层理发育,层厚以中—薄层为主,夹有少量厚层—巨厚层沉积岩。

所有样品分别采自达尔布特南北两侧 3 条实测剖面中,其中全岩地球化学分析的样品数为 42 件(包古图组采集样品 17 件,太勒古拉组 25 件),碎屑锆石年代学样品为 2 件(采样位置见图 1)。因碎屑颗粒的大小影响着沉积岩地球化学特征(和政军等, 2003),为强调岩石化学数据的可比性,本次研究中选取的岩石样品尽量选取中细粒砂岩。希贝库拉斯组岩石总体粒度在粗粒—含砾级别,故此次研究将其排除在外。

2 沉积岩岩相学特征

2.1 包古图组

本次研究所采集的包古图组砂岩为中细粒碎屑结构,岩性主要为中—薄层状深灰色凝灰质粉砂岩、凝灰质中细粒长石岩屑砂岩,层理清晰,纹层发育,可见有分米—厘米级鲍马序列(图 2a, 2b)。样品分选中等或较差,磨圆度中等,碎屑颗粒多以次棱角、次圆状为主(图 3a~3d),包含陆源碎屑及火山碎屑物质,其中陆源碎屑主要为长英质矿物及火山岩岩屑。石英多为单晶石英,长石以斜长石为主,表面可见明显的高岭土化、绢云母化及碳酸盐化。火山岩岩

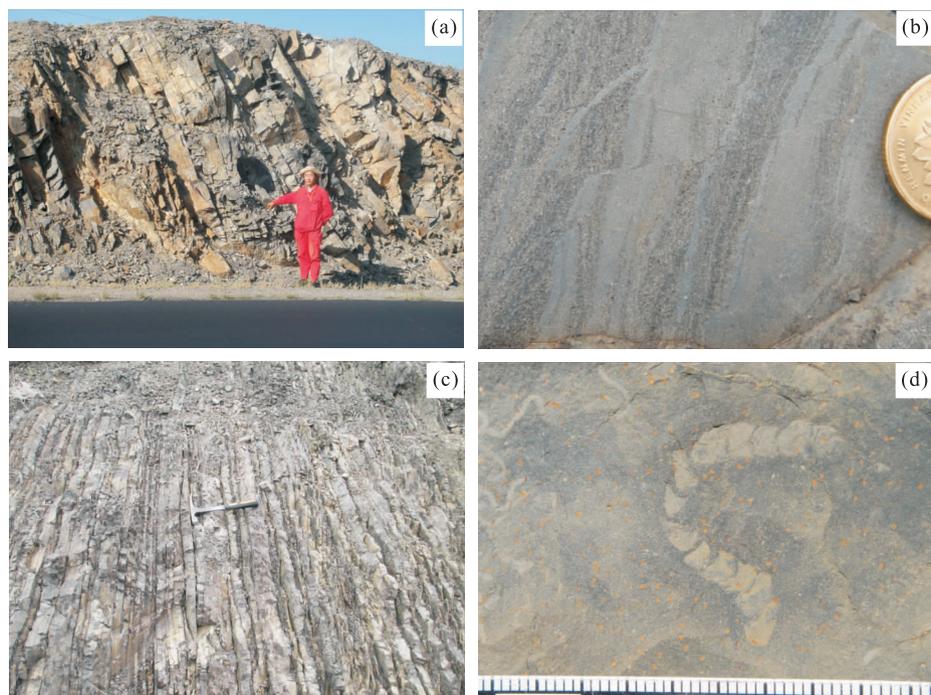


图 2 克拉玛依后山地区包古图组(a,b)和太勒古拉组(c,d)碎屑岩野外地质特征

Fig. 2 Field geological characteristics of the Baogutu Group (a,b) and Tailegula Group (c,d) from Karamay area

屑主要为安山岩、粗面岩、凝灰岩等,磨圆中等.火山碎屑物主要含有火山岩岩屑、辉石、角闪石等晶屑,以及部分棱角状的长石、石英颗粒,辉石表面存在较多裂纹,常被碳酸盐矿物交代,基质含凝灰质及泥质胶结物,表明沉积物可能未经较长距离的搬运,火山喷发后直接沉积.

2.2 太勒古拉组

太勒古拉组主要呈薄层状,主要为细粒碎屑结构,微层理构造较为发育,发育厘米级鲍马序列,局部可见遗迹化石(图 2d).分选磨圆程度较包古图组高,多为次圆状(图 3e~3h).整体粒度较包古图组细,基质多含火山灰及泥化胶结物.岩石主要由陆源碎屑及火山碎屑组成,火山碎屑有长石和石英晶屑,呈次棱角状.岩屑呈次棱角状,主要为安山岩和凝灰岩岩屑,可见极少量角闪石晶屑.陆源碎屑主要为安山岩和凝灰岩岩屑,长石以斜长石为主,含少量碱性长石,呈次圆状,部分岩石含轻微碳酸盐化.

3 分析测试方法

3.1 锆石年代学测试方法

本此研究共采集了 2 件较新鲜的砂岩年龄样品,其中包古图组为深灰色中细粒砂岩(样号 N1060-1;采样点 GPS:84°59′49.21″E,46°5′44.22″

N),太勒古拉组为灰色中细粒长石砂岩(样号 N1052-3;采样点 GPS:85°03′52.67″E,45°44′49.25″N).锆石前期处理均在廊坊诚信地质服务公司进行.先将样品进行粉碎、淘洗、重液浮选和电磁分离,在双目镜下挑纯.在制靶时,为保证数据的准确性,随机挑选不同颜色、形态及不同大小的锆石,同时增加分析锆石的数量,以提高锆石对碎屑岩年龄组成的代表性.锆石经表面抛光后进行光学和阴极发光(CL)照相,据其形态及内部结构特征作为 U-Pb 原位分析的依据.2 件碎屑岩样品中锆石含量丰富,包古图组分析了 78 个数据点,太勒古拉组分析了 92 个数据点,满足统计要求.

样品 N1052-3 中锆石的 U-Pb 同位素定年采用激光剥蚀—等离子体质谱(LA-ICP-MS)联机技术在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成.其中激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司的 GeoLas 200M(准分子激光器,193 nm ArF Excimer),等离子体质谱为 Agilent 公司 7500a ICP-MS.在进行锆石 U-Pb 同位素分析时,使用标准锆石样品 91500 作为外部校正,激光束斑直径设定为 32 μm ,测量程序按 30~50 s 气体空白、60 s 剥蚀及数据采集进行.

样品 N1060-1 锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验 LA-ICP-MS 上完成,锆石的 CL 图象分析是在中国地质

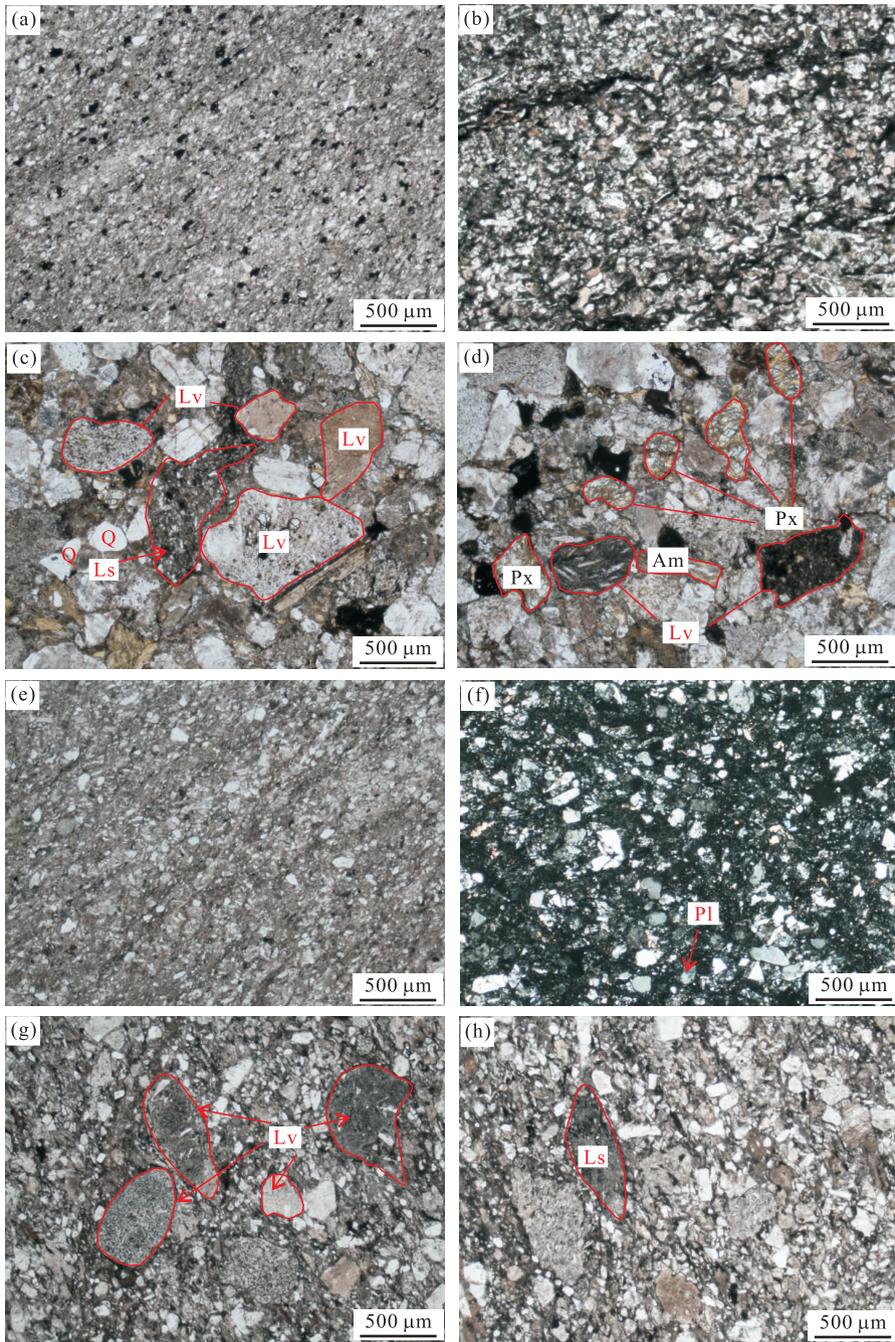


图 3 克拉玛依后山地区包古图组(a~d)和太勒古拉组(e~h)碎屑岩镜下特征

Fig. 3 Photomicrograph characteristics of the Baogutu Group (a~d) and Tailegula Group (e~h) from Karamay area
a,e. 微层理构造;b,f. 细粒碎屑结构;c,d,g,h. 岩石中的岩屑和晶屑;Lv. 火山岩岩屑;Ls. 沉积岩岩屑;Q. 石英;Px. 辉石;Am. 角闪石(F为
正交偏光,其余为单偏光)

大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验电子探针(JXA-8100)仪上完成. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析所使用的 LA-ICP-MS 为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统为德国 LambdaPhysik 公司的 GeoLas 2005 深紫外(DUV)193 nm ARF 准分子(excimer)激光剥蚀系统. 分析中采用的激光斑束直径为 24 μm,以²⁹Si 作为内标,哈佛大学标准锆石

91500 作为外标校正. NIST610 玻璃为外标标定待测样品的 U-Th 含量. 锆石 U-Pb 年龄计算采用 ISOPLOT(3.23 版)软件. 详细的分析方法和步骤见 Liu *et al.* (2010). 2 个样品锆石 U-Pb 同位素分析结果及其表面年龄 2 个样品锆石 U-Pb 同位素分析结果及其表面年龄鉴于文章篇幅所限,未随文列出,读者若有兴趣,可联系作者.

3.2 全岩地球化学分析测试方法

样品的地球化学分析均在湖北省地质实验研究所元素与同位素地球化学研究室完成, 主量元素分析采用 X 射线荧光光谱分析法(XRF), 分析误差 < 1%; 微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 分析采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析, 分析精度优于 5%~10%, 详细分析方法和流程见 Liu *et al.* (2008).

4 分析结果

4.1 碎屑锆石年代学

对包古图组中细粒砂岩 N1060-1 样品进行了

78 粒碎屑锆石分析. 碎屑锆石粒度多为 100~200 μm , 晶体长宽比在 1:1~3:1 之间. 大多数锆石为棱角状, 少许呈磨圆状, 且不同程度地保留岩浆结晶成因的振荡环带, 少数锆石颗粒发育完好的晶形边缘和震荡环带, 还可见扇形分带(图 4a). 碎屑锆石的 Th/U 值在 0.3~1.5 之间, 主体值为 0.4~0.8, 均具有典型的岩浆锆石特征.

包古图组碎屑锆石的年龄谐和度相对较差(图 5a), 主体都偏向谐和线的右侧, 大部分颗粒位于谐和线上及其附近, 部分谐和度过低的颗粒推测可能是受到后期热液活动影响, 发生少量的 Pb 丢失, 总体谐和度一般, 故本次分析选用谐和度 $\geq 60\%$ 的颗粒. 锆石年龄分布的范围介于 $296.5 \pm 5.7 \text{ Ma}$ 和

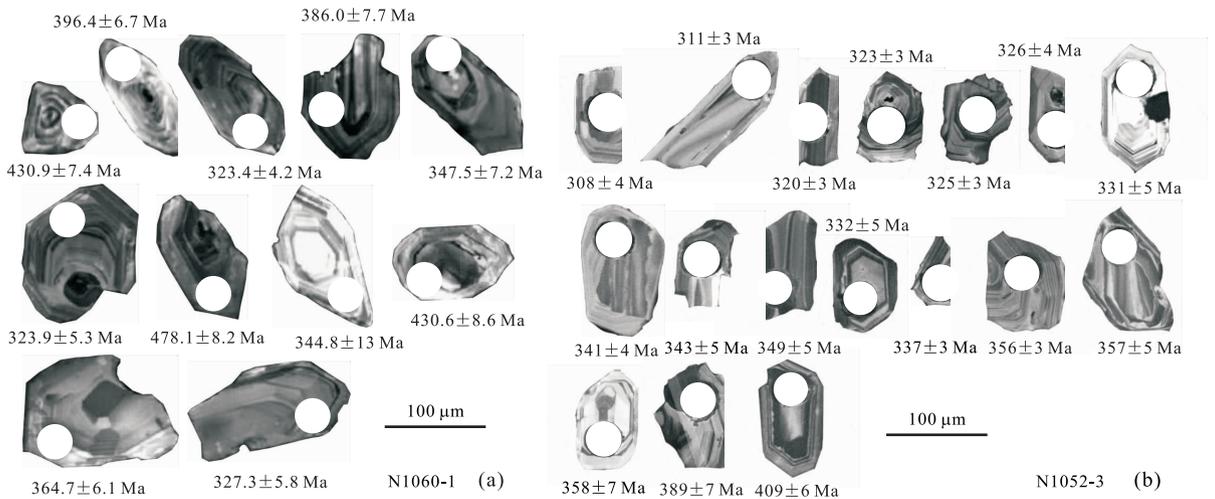


图4 克拉玛依后山地区包古图组(a)和太勒古拉组(b)代表性碎屑锆石阴极发光图像及分析点表面年龄
Fig. 4 Representative CL images (a) and of detrital zircon from the clastic rocks in Karamay area (b)

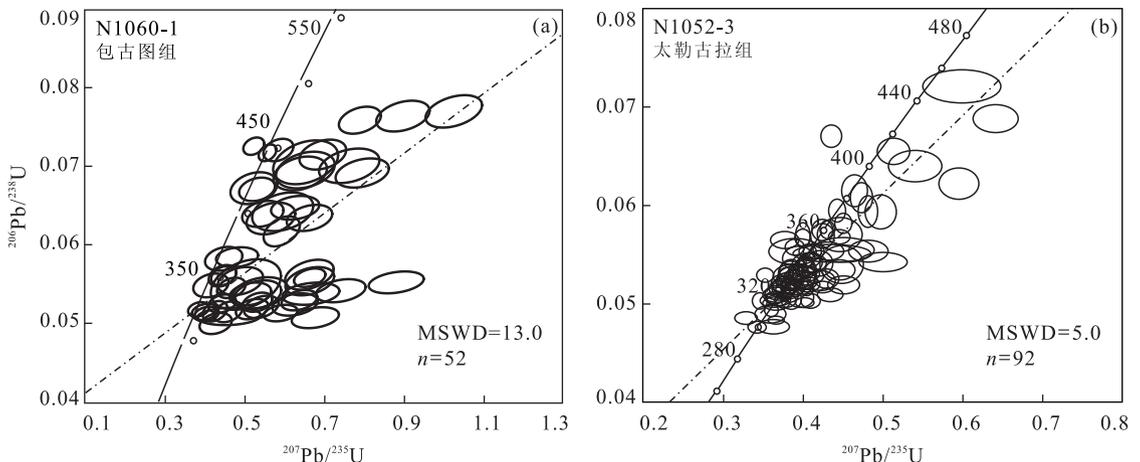


图5 克拉玛依后山地区包古图组(a)和太勒古拉组(b)碎屑锆石谐和曲线

Fig. 5 Concordia plots of detrital zircon of Baogutu Group (a) and Tailegula Group (b) from Karamay area

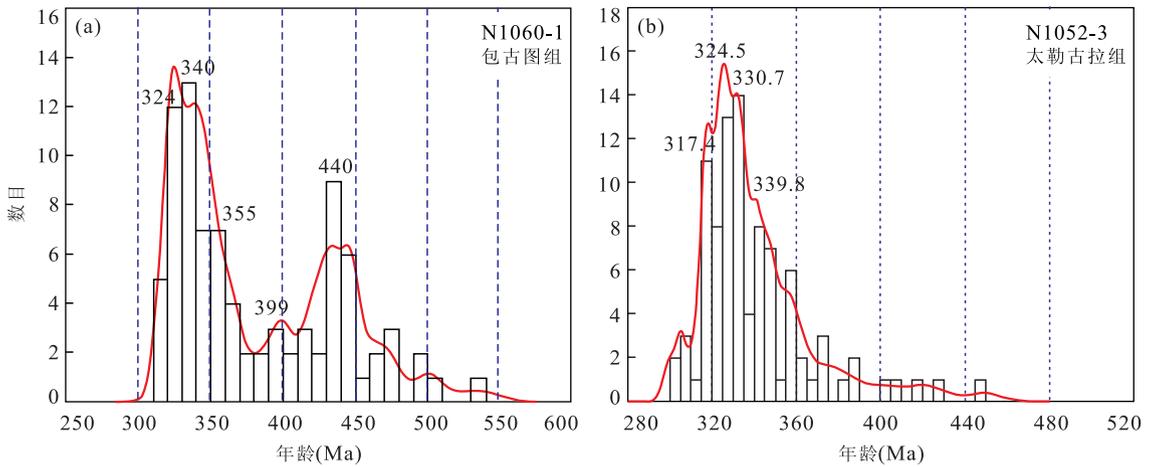


图 6 克拉玛依后山地区包古图组(a)和太勒古拉组(b)碎屑锆石 U-Pb 谐和年龄频数直方图

Fig. 6 Detrital zircon U-Pb Age distribution histograms of Baogutu Group (a) and Tailegula Group (b) from Karamay area

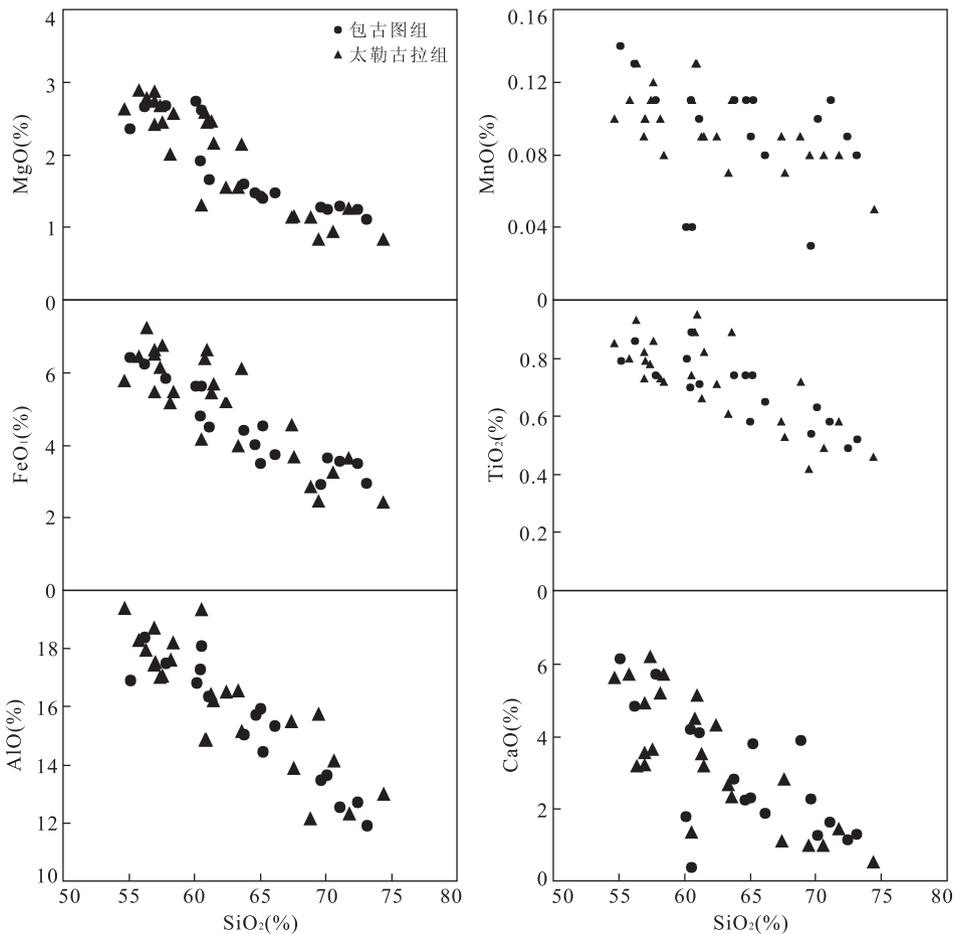


图 7 克拉玛依后山地区碎屑岩主要元素与 SiO₂ 关系

Fig. 7 Bivariate diagrams of major elements composition of the clastic rocks from Karamay area

536.1 ± 12.6 Ma 之间, 主要存在 2 个主峰值 (340 Ma 和 440 Ma) 及一个次峰值 (399 Ma), 还有少许奥陶纪和寒武纪锆石颗粒 (图 6a).

笔者对太勒古拉组中细粒长石砂岩 N1052-3

样品进行了 92 粒锆石分析. 碎屑锆石粒度多为 70~150 μm, 晶体长宽比在 1:1~3:1 之间. 锆石多为次棱角状, 少量为浑圆状, 多发育岩浆震荡环带, 极少数锆石具有完好的晶体形态、震荡环带和扇形分

表 1 克拉玛依后山地区碎屑岩主量元素分析结果
Table 1 Major element compositions of the clastic rocks in Karamay area

组名	样品号	检测项目(%)											CIA	
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺		CO ₂
包古图组	PM003-9-1(b)	66.13	0.65	15.34	3.74	0.08	1.48	1.89	4.25	3.92	0.17	1.80	0.22	1.94
	PM003-28-1(b)	65.20	0.74	14.46	4.53	0.11	1.40	3.79	3.98	2.74	0.28	2.01	0.34	2.24
	PM003-67-1(b)	63.76	0.74	15.05	4.40	0.11	1.60	2.83	5.89	2.88	0.24	2.06	0.22	2.11
	PM003-74-1(b)	55.14	0.79	16.90	6.41	0.14	2.36	6.14	3.65	3.16	0.29	2.55	1.97	4.22
	PM004-2-2(b)	61.11	0.71	16.35	4.50	0.10	1.66	4.10	2.78	4.28	0.27	2.29	1.35	3.28
	PM004-3-1(b)	60.48	0.70	17.30	4.81	0.11	1.92	4.21	3.49	3.48	0.26	2.15	0.62	2.40
	PM004-16-1(b)	57.82	0.74	17.49	5.83	0.11	2.68	5.73	3.24	2.64	0.26	2.86	0.18	2.77
	PM004-31-1(b)	56.22	0.86	18.39	6.23	0.13	2.66	4.85	3.91	3.09	0.20	2.77	0.22	2.73
	PM004-42-1(b)	71.09	0.58	12.56	3.57	0.11	1.29	1.65	3.47	2.78	0.21	1.80	0.45	2.31
	PM004-44-1(b)	70.12	0.52	11.89	2.94	0.08	1.11	1.30	4.31	2.38	0.14	1.56	0.07	1.37
	PM004-59-1(b)	73.14	0.63	13.66	3.66	0.10	1.24	1.28	4.29	2.38	0.20	1.87	0.11	1.95
	KP4-35-1	69.62	0.54	13.47	2.91	0.03	1.27	2.27	3.03	2.90	0.20	1.98	1.35	3.26
	KP4-72-1	60.15	0.80	16.82	5.61	0.04	2.74	1.79	1.94	4.84	0.14	3.40	1.01	4.68
	H7913-1	64.66	0.74	15.72	4.01	0.11	1.48	2.26	3.35	5.01	0.23	1.69	0.13	1.73
	H7913-2	65.03	0.58	15.95	3.51	0.09	1.43	2.31	2.67	5.54	0.28	1.88	0.10	1.88
	H7913-3	72.42	0.49	12.73	3.51	0.09	1.24	1.16	4.58	1.36	0.10	1.75	0.21	2.09
	b5010-1	60.53	0.89	18.08	5.64	0.04	2.61	4.40	3.61	4.04	0.15	3.23	0.07	3.42
	PM002-33-1(b)	63.60	0.89	15.12	6.07	0.11	2.13	2.32	5.06	1.72	0.18	2.31	0.16	2.26
	PM002-39-1(b)	60.82	0.89	14.81	6.36	0.13	2.57	4.48	3.39	2.63	0.20	2.35	1.01	2.94
	PM002-41-1(b)	60.94	0.95	14.85	6.61	0.13	2.43	5.12	5.00	5.55	0.23	2.45	0.39	2.54
PM002-63-1(b)	63.33	0.61	16.53	3.95	0.07	1.54	2.66	5.00	2.76	0.16	2.20	0.84	2.89	
PM006-17-1(b)	55.79	0.80	18.28	6.41	0.11	2.87	5.68	3.86	2.36	0.18	2.80	0.38	2.85	
PM006-19-1(b)	54.64	0.85	19.36	5.74	0.10	2.61	5.60	3.80	2.94	0.21	2.84	0.84	3.20	
PM006-37-1(b)	71.76	0.58	12.29	3.63	0.08	1.24	1.43	2.33	3.81	0.14	1.90	0.39	3.29	
PM006-47-1(b)	58.16	0.73	17.58	5.13	0.10	2.00	5.16	2.99	3.34	0.25	2.50	1.68	3.84	
KP4-14-1	61.29	0.66	16.41	5.40	0.09	2.45	3.50	3.49	3.74	0.14	2.26	0.18	1.92	
KP4-18-1	67.59	0.86	17.03	6.71	0.12	2.43	3.63	3.25	4.39	0.33	2.74	0.47	2.78	
KP4-19-1	62.44	0.93	16.50	5.19	0.09	1.53	4.30	3.79	3.79	0.17	2.59	0.11	2.57	
KP4-22-1	56.34	0.71	17.91	7.22	0.13	2.77	3.15	3.88	4.07	0.35	2.70	0.13	2.23	
KP4-24-1	56.95	0.82	17.41	6.59	0.10	2.72	3.19	3.64	5.06	0.31	2.59	0.16	2.17	
KP4-24-2	57.00	0.79	17.50	6.48	0.10	2.86	3.54	5.72	2.54	0.28	2.50	0.27	2.25	
KP4-71-1	68.84	0.72	12.10	2.84	0.09	1.13	3.88	3.53	2.50	0.14	1.52	2.47	3.93	
H7911-1	61.48	0.82	16.19	5.67	0.09	2.15	3.17	3.62	2.99	0.32	2.71	0.19	2.89	
H7914-1	58.39	0.72	18.18	5.45	0.08	2.55	5.69	4.12	1.79	0.24	2.05	0.15	1.92	
H7914-2	57.40	0.78	16.98	6.12	0.11	2.66	6.16	4.43	2.09	0.23	1.98	0.54	2.15	
H7915-1	60.44	0.74	19.32	4.13	0.11	1.30	1.34	8.18	1.70	0.29	1.82	0.10	1.80	
H7915-2	69.49	0.42	15.73	2.42	0.08	0.82	0.97	8.21	1.01	0.13	1.16	0.23	1.23	
H7915-3	56.94	0.73	18.70	5.44	0.09	2.40	4.91	4.24	2.86	0.22	2.31	0.59	2.63	
H7915-4	70.59	0.49	14.12	3.22	0.08	0.96	0.96	4.19	3.02	0.12	1.70	0.19	2.22	
H7916-1	67.39	0.58	15.46	4.54	0.09	1.12	1.11	5.34	1.67	0.12	1.87	0.25	1.94	
H7916-2	74.42	0.46	12.98	2.40	0.05	0.82	0.51	6.52	0.09	0.10	1.26	0.13	1.43	
H7916-3	67.61	0.53	13.87	3.66	0.07	1.14	2.81	2.61	2.42	0.12	2.66	2.04	4.80	

注: TF_{e2}O₃ 代表全铁, TF_eO = FeO + 0.899 8 × Fe₂O₃.

表 2 克拉玛依后山地区碎屑岩稀土元素分析结果
Table 2 Rare element compositions of the elastic rocks in Karamay area

组名	样品号	检测项目(10^{-6})														总和	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		Y
包古图组	PM003-28-1(b)	20.29	45.27	5.70	22.14	4.77	1.23	4.45	0.68	4.23	0.86	2.44	0.37	2.57	0.42	23.52	138.92
	PM003-29-1(b)	18.25	41.82	5.38	21.59	4.66	1.27	4.34	0.68	4.05	0.78	2.26	0.33	2.31	0.35	20.94	129.01
	PM003-67-1(b)	20.31	46.71	6.02	23.73	4.99	1.29	4.42	0.71	4.40	0.86	2.47	0.39	2.57	0.42	22.67	141.95
	PM003-74-1(b)	15.31	31.99	4.33	17.43	3.66	1.23	3.47	0.52	3.06	0.62	1.74	0.27	1.81	0.29	16.36	102.10
	PM004-2-2(b)	16.02	32.66	4.47	17.96	3.79	1.12	3.49	0.55	3.19	0.64	1.79	0.28	1.86	0.30	17.51	105.61
	PM004-3-1(b)	14.31	31.22	4.16	16.53	3.65	1.12	3.16	0.48	2.90	0.59	1.63	0.26	1.69	0.28	15.27	97.25
	PM004-16-1(b)	13.43	30.55	3.97	16.03	3.46	1.15	3.02	0.48	2.88	0.57	1.61	0.25	1.70	0.27	14.83	95.10
	PM004-31-1(b)	14.34	29.65	3.92	15.66	3.33	1.09	2.90	0.46	2.73	0.51	1.48	0.23	1.53	0.24	13.80	90.97
	PM004-42-1(b)	15.06	33.76	4.28	16.48	3.61	1.04	3.49	0.61	3.72	0.75	2.25	0.36	2.40	0.38	19.85	108.03
	PM004-44-1(b)	19.21	42.48	5.30	20.36	4.18	1.05	3.93	0.64	3.84	0.76	2.19	0.33	2.31	0.35	20.44	127.37
	PM004-59-1(b)	19.76	44.25	5.58	21.95	4.67	1.18	4.46	0.74	4.70	0.94	2.83	0.45	3.05	0.50	25.93	140.97
	KP4-35-1	16.20	33.72	4.38	16.99	3.71	0.90	3.45	0.58	3.55	0.71	2.04	0.31	2.16	0.34	20.23	109.26
	KP4-72-1	19.72	44.88	5.68	22.61	4.92	1.40	4.73	0.78	4.58	1.06	2.69	0.41	2.77	0.44	24.40	140.93
	H7913-1	20.80	47.32	5.98	25.23	5.94	1.65	5.50	0.87	5.66	1.06	3.20	0.50	3.27	0.51	31.40	158.87
	H7913-2	25.29	53.33	6.37	25.33	5.20	1.26	4.35	0.63	3.88	0.72	2.25	0.35	2.32	0.36	22.16	153.78
	H7913-3	15.88	33.82	3.89	15.58	3.37	0.82	3.10	0.54	3.28	0.66	1.96	0.28	2.08	0.31	19.50	105.08
	b5010-1	20.28	45.30	5.87	22.68	4.86	1.52	4.66	0.76	4.88	0.94	2.75	0.42	2.87	0.46	24.82	143.07
	PM002-33-1(b)	10.93	25.00	3.52	14.74	3.71	1.22	3.94	0.69	4.29	0.87	2.52	0.38	2.57	0.42	23.32	98.12
	PM002-39-1(b)	9.00	20.85	2.99	13.34	3.38	1.25	3.71	0.63	3.99	0.81	2.36	0.36	2.43	0.38	21.95	87.43
	PM002-41-1(b)	10.11	23.64	3.47	15.35	3.98	1.30	4.41	0.79	5.00	1.01	2.89	0.44	2.91	0.47	26.80	102.57
PM002-63-1(b)	19.15	42.31	5.57	21.38	4.49	1.19	4.24	0.70	4.41	0.88	2.52	0.40	2.73	0.43	23.71	134.11	
PM006-17-1(b)	12.57	26.55	3.52	14.31	3.10	1.14	2.85	0.44	2.49	0.48	1.42	0.21	1.41	0.22	12.91	83.63	
PM006-19-1(b)	14.02	30.05	3.92	15.80	3.37	1.23	3.01	0.46	2.68	0.52	1.50	0.23	1.56	0.24	13.68	92.28	
PM006-37-1(b)	13.60	30.98	4.01	15.62	3.39	0.91	3.23	0.52	3.21	0.62	1.77	0.29	1.91	0.31	16.99	97.34	
PM006-47-1(b)	14.43	30.59	4.10	16.42	3.39	1.11	3.03	0.50	2.93	0.58	1.63	0.26	1.78	0.28	15.75	96.78	
KP4-14-1	13.25	29.56	3.87	14.73	3.13	1.01	2.76	0.44	2.62	0.51	1.51	0.23	1.60	0.25	13.25	88.72	
KP4-18-1	16.86	36.86	5.15	21.04	4.67	1.40	4.13	0.68	3.81	0.75	2.05	0.30	2.06	0.32	20.27	120.35	
KP4-19-1	18.04	42.11	5.46	21.16	4.49	1.20	4.08	0.66	4.06	0.80	2.36	0.37	2.52	0.38	20.93	128.61	
KP4-22-1	17.59	39.94	5.32	21.95	4.53	1.32	4.07	0.60	4.53	0.66	1.85	0.28	1.85	0.28	17.54	121.23	
KP4-24-1	15.31	35.52	4.77	19.73	4.13	1.12	3.68	0.53	3.16	0.60	1.70	0.26	1.69	0.27	15.68	108.14	
KP4-24-2	16.40	35.83	4.69	19.09	4.08	1.23	3.60	0.53	3.07	0.60	1.71	0.25	1.69	0.26	15.74	108.77	
KP4-71-1	11.51	24.59	3.34	13.28	3.03	1.00	2.89	0.49	3.08	0.61	1.73	0.27	1.89	0.30	16.27	84.27	
H7911-1	19.51	42.49	5.22	21.75	4.65	1.22	4.00	0.70	4.27	0.82	2.42	0.35	2.56	0.40	23.68	134.04	
H7914-1	17.94	35.77	4.33	17.71	3.90	1.29	3.41	0.48	2.79	0.52	1.57	0.20	1.46	0.23	15.22	106.82	
H7914-2	16.75	34.24	4.45	18.17	4.12	1.24	3.41	0.47	2.66	0.54	1.59	0.22	1.44	0.22	15.50	105.03	
H7915-1	38.95	93.29	11.66	46.45	8.02	1.74	6.28	0.88	5.23	1.01	3.00	0.44	3.21	0.38	31.18	251.83	
H7915-2	19.16	45.81	5.60	22.28	4.68	0.92	3.88	0.60	3.64	0.74	2.30	0.33	2.52	0.38	21.98	134.82	
H7915-3	15.88	32.79	4.12	16.74	3.55	1.19	3.15	0.48	2.81	0.61	1.69	0.24	1.66	0.25	17.04	102.21	
H7915-4	18.62	40.58	4.84	19.38	4.29	1.02	4.02	0.63	3.82	0.82	2.46	0.39	2.50	0.40	23.39	127.30	
H7916-1	7.88	19.28	2.67	11.87	3.22	1.05	3.24	0.55	3.81	0.83	2.46	0.39	2.54	0.40	23.14	83.33	
H7916-2	13.52	31.22	4.06	16.82	3.81	0.87	4.02	0.72	4.79	1.07	3.17	0.50	3.31	0.52	30.77	119.15	
H7916-3	14.34	32.94	4.48	19.06	4.99	1.17	5.22	0.91	5.97	1.23	3.79	0.56	3.65	0.57	34.78	133.66	

大勒古拉组

表 3 克拉玛依后山地区碎屑岩微量元素分析结果
Table 3 Trace element compositions of the clastic rocks in Karamay area

组名	样品号	检测项目(10^{-6})											
		Rb	Th	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	Sc	Cr	V	Co	Zn
包古图组	PM003-9-1(b)	45.61	6.10	0.59	6.75	381.55	186.40	4.78	12.19	20.73	76.30	7.24	74.88
	PM003-28-1(b)	45.10	6.14	0.66	6.83	557.80	165.70	4.41	13.77	19.49	117.50	8.37	78.54
	PM003-67-1(b)	85.30	5.24	0.56	6.87	412.05	182.80	4.56	14.40	18.99	104.30	9.04	68.00
	PM003-74-1(b)	53.50	3.68	0.49	4.96	668.65	103.70	2.73	18.16	25.08	183.40	16.32	75.88
	PM004-2-2(b)	82.42	4.08	0.45	4.80	1 025.55	116.50	3.21	15.22	16.11	131.00	9.36	70.44
	PM004-3-1(b)	61.12	4.39	0.44	4.60	821.70	120.60	3.29	14.53	17.90	136.20	9.40	71.95
	PM004-16-1(b)	50.14	3.75	0.51	4.57	775.05	110.70	3.11	17.67	22.59	162.40	16.17	75.49
	PM004-31-1(b)	52.80	4.50	0.48	5.17	623.60	126.30	3.44	17.31	27.20	195.70	16.03	84.21
	PM004-42-1(b)	63.52	4.58	0.43	5.02	258.70	129.70	3.51	12.58	22.95	98.15	4.17	56.11
	PM004-44-1(b)	96.13	4.90	0.48	5.48	260.15	129.50	3.55	10.85	19.08	73.25	3.43	45.41
	PM004-59-1(b)	51.48	5.11	0.49	5.83	336.60	152.50	3.96	13.96	23.39	107.50	4.06	67.01
	KP4-35-1	70.54	4.15	0.43	5.34	291.05	139.60	3.69	11.08	17.68	73.00	3.03	37.14
	KP4-72-1	99.71	5.40	0.58	7.41	232.75	194.90	5.16	16.65	51.71	118.90	6.81	84.46
	H7913-1	81.04	5.95	0.68	8.09	275.95	215.50	5.60	17.11	71.83	123.50	7.13	84.24
	H7913-2	83.40	4.11	0.36	6.84	1 197.13	161.31	4.56	15.79	5.73	59.13	5.48	84.69
	H7913-3	132.73	7.48	0.55	8.83	1 071.30	192.86	5.17	9.76	4.19	100.27	6.41	66.71
	b5010-1	21.24	5.21	0.38	5.57	412.06	122.33	3.12	11.58	17.24	78.20	8.63	69.86
	PM002-33-1(b)	29.54	2.73	0.58	4.27	257.00	111.40	3.11	23.14	29.32	157.70	16.30	85.54
	PM002-39-1(b)	38.21	1.93	0.38	2.99	246.65	94.20	2.62	22.56	32.44	149.20	16.95	83.45
	PM002-41-1(b)	9.21	1.90	0.36	3.12	214.40	118.00	3.18	24.66	30.95	164.60	16.17	94.85
PM002-63-1(b)	43.49	4.36	0.70	7.73	382.05	180.30	4.57	11.91	17.02	76.85	7.85	69.69	
PM006-17-1(b)	44.58	3.12	0.38	4.04	795.55	94.80	2.62	18.67	25.35	181.30	16.60	79.19	
PM006-19-1(b)	50.54	4.02	0.46	4.91	904.90	116.40	3.35	17.77	25.25	179.40	16.09	80.86	
PM006-37-1(b)	86.24	5.11	0.46	5.50	248.10	141.80	3.83	11.60	22.10	86.87	6.50	61.80	
PM006-47-1(b)	68.11	3.55	0.42	4.61	540.05	111.80	3.09	16.00	19.20	140.50	10.12	81.57	
KP4-14-1	73.71	7.31	0.41	4.58	623.25	143.20	4.15	14.49	23.27	129.40	12.06	65.34	
KP4-18-1	80.73	3.74	0.40	4.23	745.40	102.50	3.07	18.99	23.46	170.00	15.10	87.15	
KP4-19-1	102.63	6.84	0.58	7.00	572.10	187.90	5.58	14.05	25.80	102.20	5.50	75.64	
KP4-22-1	85.82	5.28	0.37	4.60	729.45	125.90	3.65	17.33	27.89	212.50	14.18	88.53	
KP4-24-1	108.23	5.07	0.41	4.40	887.90	116.50	3.34	16.92	29.19	188.20	13.85	74.82	
KP4-24-2	45.08	3.51	0.39	4.28	811.10	99.60	2.80	18.87	24.25	212.70	15.38	78.73	
KP4-71-1	42.42	2.60	0.31	4.03	286.70	125.10	3.65	13.53	152.00	75.52	11.53	69.85	
H7911-1	62.16	5.81	0.41	6.15	435.10	148.93	4.06	18.18	16.96	164.32	12.12	88.14	
H7914-1	28.45	4.48	0.25	4.25	1 039.42	103.24	2.77	14.34	19.02	162.83	13.82	75.70	
H7914-2	34.69	4.12	0.24	3.98	798.11	95.07	2.61	15.64	23.26	211.34	17.10	87.37	
H7915-1	42.22	10.80	0.80	14.85	495.00	324.48	8.26	8.56	1.83	37.40	2.97	84.62	
H7915-2	0.93	9.89	0.52	7.94	151.17	208.87	5.57	8.00	2.12	30.79	3.05	52.60	
H7915-3	58.28	3.90	0.26	4.71	737.08	110.47	2.98	16.26	10.33	134.74	13.09	78.17	
H7915-4	56.05	6.07	0.54	7.77	292.21	168.41	4.81	10.07	10.88	54.76	4.41	67.46	
H7916-1	21.86	1.80	0.17	2.48	299.02	122.66	3.66	12.21	10.67	64.55	6.73	64.96	
H7916-2	1.19	5.29	0.39	5.58	142.95	193.54	5.31	10.45	14.68	41.76	5.07	56.98	
H7916-3	48.73	3.05	0.29	3.92	138.51	162.79	4.68	12.64	13.26	72.01	6.51	72.03	

大勒古拉组

带(图 4b). 碎屑锆石 Th/U 值大部分在 0.4~0.8 之间,仅有 6 个颗粒 Th/U 值约为 0.3,部分比值接近 2.0,结合锆石的结构特征,这些碎屑锆石确定为岩浆成因的锆石.

锆石的年龄谐和度相对较好(图 5b). 锆石年龄分布的范围介于 300 ± 3 Ma 和 449 ± 7 Ma 之间,年龄峰值集中在 324.5 Ma,另有少量泥盆纪、志留纪和奥陶纪的锆石颗粒(图 6b).

4.2 沉积岩地球化学

主量元素分析结果(表 1)显示,沉积岩的地球化学成分变化范围较大, SiO_2 含量为 54.64%~74.42%,平均含量为 63.01%; Al_2O_3 含量则相对较高,为 11.89%~19.36%,平均值为 15.89%; $(\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 含量比较高,但变化范围较大,为 3.22%~9.99%,平均含量为 6.73%; TiO_2 含量为 0.42%~0.95%,平均含量为 0.71%; CaO 含量为 0.40~6.16% (仅少量大于 4.00%),平均值为 3.17%. 由此可知,该区石炭系碎屑岩 SiO_2 、 Al_2O_3 含量中等一较高,表明其碎屑岩中石英、长石矿物占主要部分,从 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 、 TiO_2 等含量可以看出,岩石中应该含有少量铁镁矿物,如辉石、角闪石、黑云母和磁铁矿等,这与薄片观察到的现象一致.

在各主量元素氧化物与 SiO_2 的相关性图中(图 7;路运发,2004),上述碎屑岩的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 和 TiO_2 、 MnO 、 CaO 均显示了与 SiO_2 负相关关系,反映富石英矿物在沉积过程中随着其他不稳定矿物的分解而逐渐富集(Bhatia, 1983; Wang *et al.*, 2013).

微量元素原始地幔蛛网图中可以看出(图 8a),除个别样品之外,这些碎屑岩整体表现为大离子亲

石元素(K、Rb 和 Sr 等)相对富集、高场强元素(Nb、Ta、P 和 Th 等)相对亏损以及明显的 Nb 负异常和 Sr 正异常,分析结果见表 2.

稀土元素分析结果(表 3)表明,其稀土元素质量分数变化较大,在 $83 \times 10^{-6} \sim 252 \times 10^{-6}$ 之间变化,平均值为 118×10^{-6} . 稀土元素 Ce 无异常, Sr 大部分表现为正异常, Eu 呈微弱负异常,具有低的 ΣREE 等特征,同大洋岛弧型砂岩相似. 从稀土元素球粒陨石标准化图(图 8b)中可以看出,碎屑岩总体呈现轻稀土比重稀土富集, Eu 含量相对微弱负异常至无异常,显示出岛弧岩浆的特征(尹继元等, 2013). 同时,与典型构造环境相比,碎屑岩样品曲线介于大洋岛弧与大陆岛弧构造环境之间,表现为轻稀土元素含量比大洋岛弧高,接近大陆岛弧,但重稀土元素含量与大洋岛弧一致,较为平坦,暗示克拉玛依后山地区早石炭世碎屑岩可能源于大洋岛弧环境,同时有部分陆源物质的加入.

5 讨论

5.1 岩石风化程度

沉积岩的地球化学特征不仅受源岩化学组分及源区构造环境的影响,沉积物在剥蚀、搬运的过程中,还受到风化、成岩和分选等地质作用的影响. 化学蚀变指数(CIA)通常用来确定源岩的化学风化程度, CIA 指数的计算公式: $\text{CIA} = 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 其中化学含量均为摩尔百分比, CaO^* 指存在于硅酸盐矿物中 CaO (Nesbitt and Young, 1982; Fedo *et al.*, 1995). 通

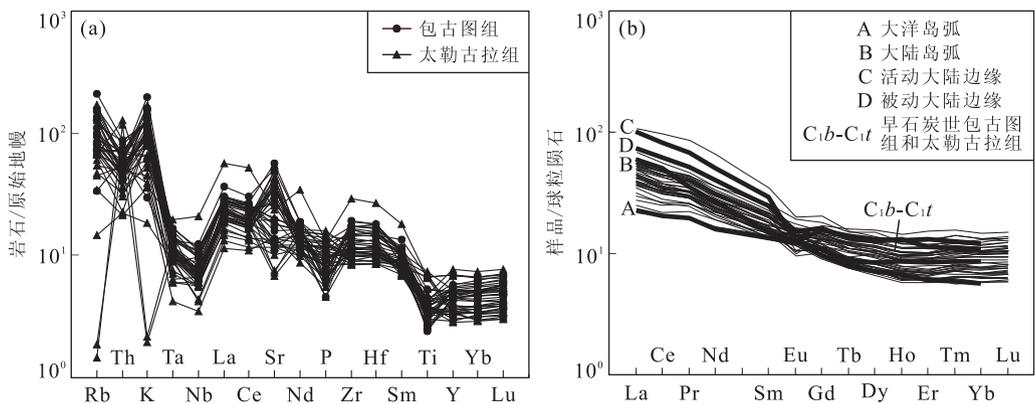


图 8 碎屑岩微量元素蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化与构造背景砂岩对比

Fig. 8 Primitive mantle-normalized spider diagrams of clastic rocks and Chondrite-normalized REE patterns and sandstone from other typical tectonic setting

a. 碎屑岩微量元素蛛网图; b. 稀土元素球粒陨石标准化, 典型构造背景稀土元素数据来自 Bhatia(1985)

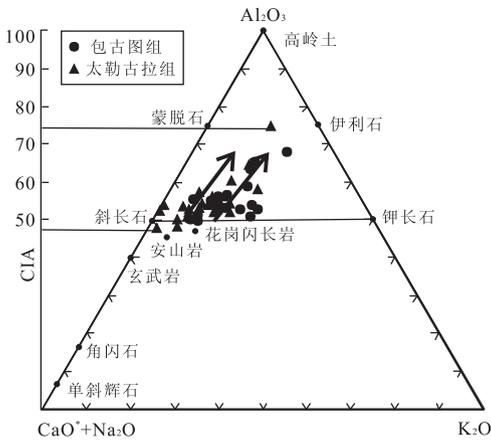


图 9 A-CN-K 图

Fig. 9 A-CN-K Ternary diagram

各端元为各元素摩尔百分比,据 Nesbitt and Young(1982),Fedo *et al.* (1995)

常认为, CIA 值在 50 左右的碎屑沉积岩,其物源区岩石未遭受化学风化; CIA 值为 100, 表明其物源区岩石遭受了强烈的化学风化. 研究区碎屑岩样品分析结果(表 3)显示,其 CIA 值变化范围为 48~75, 平均值为 55, 显示该碎屑岩经历中等一较低风化条件. 此外, 沉积物的化学风化程度也可以通过 A-CN-K 三角图(图 9)反映. 图 9 中显示样品的风化程度中等偏低. 且 2 个组的风化趋势线均近乎平行于 A-CN 一侧, 说明岩石在风化的过程中未经历钾交代作用. 由于主量元素的分析基础是母岩的主元素组合和重矿物组合的继承性(毛光周和刘池洋, 2011), 所以一般在短距离搬运和化学风化很弱的情况下, 二者才具有较好的对比性. 从以上 CIA 指数

和 A-CN-K 图解并结合镜下薄片可知, 本区岩石物源搬运距离比较近, 化学风化程度为中等一较低风化, 故沉积物很好地继承了母岩的性质.

5.2 早石炭世岩石源岩特征

5.2.1 砂岩类型 一般来说, 主量元素氧化物含量经常用于砂岩地球化学分类. 从主量元素分析结果可以看出, 碎屑岩样品中的 SiO_2 成分接近 Condie (1993) 的典型古生代杂砂岩(66.1%), Al_2O_3/SiO_2 比值可以作为碎屑沉积物成熟度的指标(Roser and Korsch, 1999), 大致反映石英与长石和层状硅酸盐矿物之间含量的变化, 进而反映源区供源成分变化(Floyd and Leveridge, 1987; 和政军等, 2005). 本区碎屑岩比值变化范围表现为 0.16~0.35, 平均值为 0.26, 同样与杂砂岩(0.20 和 0.23) 的比值接近, 显示了岩石成熟度不高, 这与岩石镜下观察到的特征一致; 同样地, K_2O/Na_2O 比值为 0.01~2.49, 平均值为 0.93, 也与古生代杂砂岩平均值(0.82) 较为接近.

5.2.2 源岩特征 利用一部分主量元素比值可以很好地区分开不同沉积物的来源, 但随粒径减小全岩成分会产生一定的差异, 投图区会有较大的重叠. Roser and Korsch(1988) 利用砂岩的 Al_2O_3 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 组成的 F1-F2 方程, 消除了这种重叠并成功地区分开了 4 种特征的沉积物源区, 即基性火山岩源区、中性火山岩源区、长英质火山岩源区以及成熟大陆石英岩源区. 该方法适用于未经受严重生物改造的岩石, 或者这种改造能够被校正的岩石. 本文利用该方法对样品主量元素进行计算投图, 结果如图 10a 所示: 所有样品中

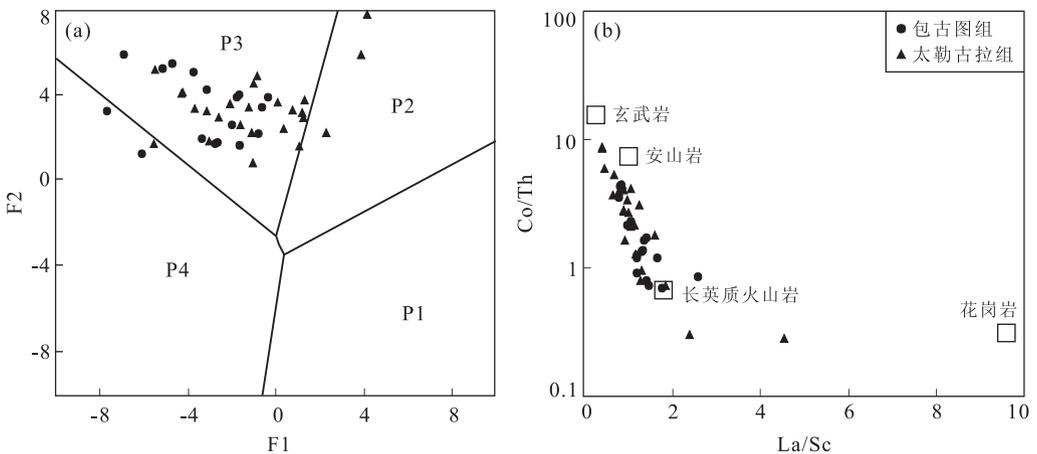


图 10 碎屑岩主量元素与微量元素源区判别

Fig. 10 Discrimination diagram illustrating sedimentary provenance

a. 碎屑砂岩方程 F1 对 F2 物源性质判别图解; P1. 基性火山岩源区; P2. 中性岩火山岩源区; P3. 酸性火山岩源区; P4. 成熟大陆石英质源区, 计算方法见 Roser and Korsch(1988); b. 微量元素 La/Sc vs Co/Th 物源性质判别(Gu *et al.*, 2002)

除少数几个落在石英质沉积岩物源区(P4)之外,均一致落在了长英质物源区(P3),表明其碎屑物质不太可能来源于古老的沉积岩再旋回堆积的产物,而主要为长英质火山岩物源区。

稀土元素在风化、成岩、变质等作用中显示了较好的稳定性(Bhatia, 1985;杨江海等,2008),所以源区岩石的 REE 特征能够被可靠地保存在沉积物中,因而比较适合用来反映源区性质(Bhatia, 1983; Gromet *et al.*, 1984). La/Sc 比值对于判别平均源区成分比较敏感,可作为区分基性—超基性与酸性物质成分的指标(Taylor and McLennan, 1985; 和政军等,2005; Wang *et al.*, 2013). 如图 10b, 克拉玛依早石炭世碎屑岩的 La/Sc 比值增大, Co/Th 比值呈急剧减小的趋势: La/Sc 值在 0.4 到 1.8 之间, 仅有 2 个比值大于 2, 而 Co/Th 值变化大, 在 0.28~8.78, 其砂岩样品主要投点在长英质火山岩和安山岩之间。

A-CN-K 三角图解(图 9)对于物源性质的确定也有一定作用. 图 9 中风化趋势线与斜长石和钾长石连接的交点反映了碎屑岩源岩中斜长石含量比钾长石更高, 可能代表了物源区母岩接近花岗闪长岩的特征, 指示了中—酸性的源岩特征。

5.3 早石炭世沉积构造环境

前人在研究砂岩的地球化学特征时发现, 砂岩的主量元素, 特别是微量元素及稀土元素不仅与源岩的地球化学特征密切相关, 同时受沉积构造环境的制约, 不同构造环境会有特定的比值变化规律. 一般来说, 从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘, 源区岩性总体存在安山岩→英安岩→花岗岩麻岩→古老沉积岩的过渡, 其 La、Ce、 Σ REE、La/Yb 和 Σ LREE/ Σ HREE 值逐渐增高(Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986). 这是由于从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘, 陆缘供给物逐渐增多, 幔源物质相应地逐渐减少。

表 4 中列出了不同沉积盆地构造背景下碎屑岩的 REE 特征, 并计算出了本区碎屑岩的 REE 值. 对比研究可见, 克拉玛依后山石炭系碎屑岩处于大洋岛弧与大陆岛弧之间的构造背景, 且总体更亲近于大洋岛弧. 由此说明在早石炭世时期, 准噶尔盆地边缘存在较大规模大洋岛弧, 是该地区石炭系碎屑岩的主要物源, 同时伴随着大洋闭合过程, 陆源碎屑物质的逐渐增多。

Bathia(1983)在研究澳大利亚古生代浊积序列

的砂岩时发现, 砂岩主量元素的含量变化能够反映不同的沉积物来源及各自构造背景, 其中最重要的参数是 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}\%$ 、 $\text{TiO}_2\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$. 从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘, 呈现 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}\%$ 、 $\text{TiO}_2\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 减少, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 增加的趋势. 本文利用其中的 $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 与 TiO_2 参数做二元图解, 判断源区构造背景, 结果如图 11a 所示, 本区碎屑岩样品主要落在大洋岛弧和大陆岛弧分布区。

与主量元素的较大活动性及可迁移性不同, 碎屑岩中微量元素具有较大稳定性, 特别是 La、Ce、Nd、Y、Th、Zr、Hf、Nb、Ti 和 Sc 等元素. 这些元素比值在海洋和河流中不受成岩作用和变质作用影响, 可以代表被搬运来的沉积岩的陆源组分, 反映物源区的地球化学特征(杨学明, 2000), 因此在对碎屑岩物源区和构造环境进行判别的时候, 微量元素比主量元素具有更大的优越性和准确性(McLennan and Taylor, 1991)。

Bathia and Crook(1986)以澳大利亚东部古生代杂砂岩的地球化学数据为基础, 首次建立了判别构造环境的微量元素图解. La-Th 双变量判别图和 La-Th-Sc 三角图解均能够很好地区分大洋岛弧和大陆岛弧, 但不能区分活动大陆边缘和被动大陆边缘的杂砂岩(图 11b, 11d). 从图 11 中可以清楚地看到样品点大部分落在大洋岛弧环境中, 有向大陆岛弧过渡的趋势. Th/Sc 可较好地区分大洋岛弧和大陆岛弧, Th/Zr 可区分活动大陆边缘和被动大陆边缘, 因此, Th-Sc-Zr 三角图解可以很好地判别碎屑岩源区构造背景. 该图 11 中, 大洋岛弧杂砂岩以低的 Th/Sc 和 Th/Zr 值为特征, 在图 11 中靠近 Sc 和 Zr 极. 活动大陆边缘以高的 Th/Sc 和 Th/Zr 比值为特征, 在图 11 中靠近 Th 极. 被动大陆边缘砂岩具有高的 Zr/Th 值, 靠近 Zr 极. 大陆岛弧碎屑岩介于上述三者之间. 在 Th-Sc-Zr/10 图解(图 11c)中, 大部分点落入大洋岛弧区及其与大陆岛弧之间的过渡区, 说明克拉玛依后山地区早石炭世碎屑岩物质主要来源于大洋岛弧, 同时还有部分大陆岛弧物质的参与. 不同时代的样品无明显的分区性, 表明研究区早石炭世源区构造环境没有太大变化。

5.4 碎屑物质来源

从岩石镜下可以看到, 包古图组与太勒古拉组均为中细粒碎屑岩, 2组岩石样品整体以陆源碎屑

表 4 不同沉积盆地构造背景下碎屑岩的 REE 特征

Table 4 REE characteristics of clastic rock from different sedimentary basins

形成环境	源岩类型	La	Ce	∑REE	La/Yb	LaN/YbN	∑LREE/∑HREE	δEu
大洋岛弧	未切割岩浆岛弧(Bhatia, 1985)	8.0±1.7	19.0±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	已切割岩浆岛弧(Bhatia, 1985)	27.0±4.5	59.0±8.2	146±20	11.0±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
活动大陆边缘	抬升基底(Bhatia, 1985)	37.0	78.0	186.00	12.50	8.50	9.10	0.60
被动大陆边缘	克拉通内核(Bhatia, 1985)	39.0	85.0	210.00	15.90	10.80	8.50	0.56
早石炭世碎屑岩	初始岩浆弧(张雷等,2014)	16.7	36.9	96.99	7.69	5.41	5.99	0.90

注:数据均为平均值,除比值外,含量单位为 10⁻⁶。

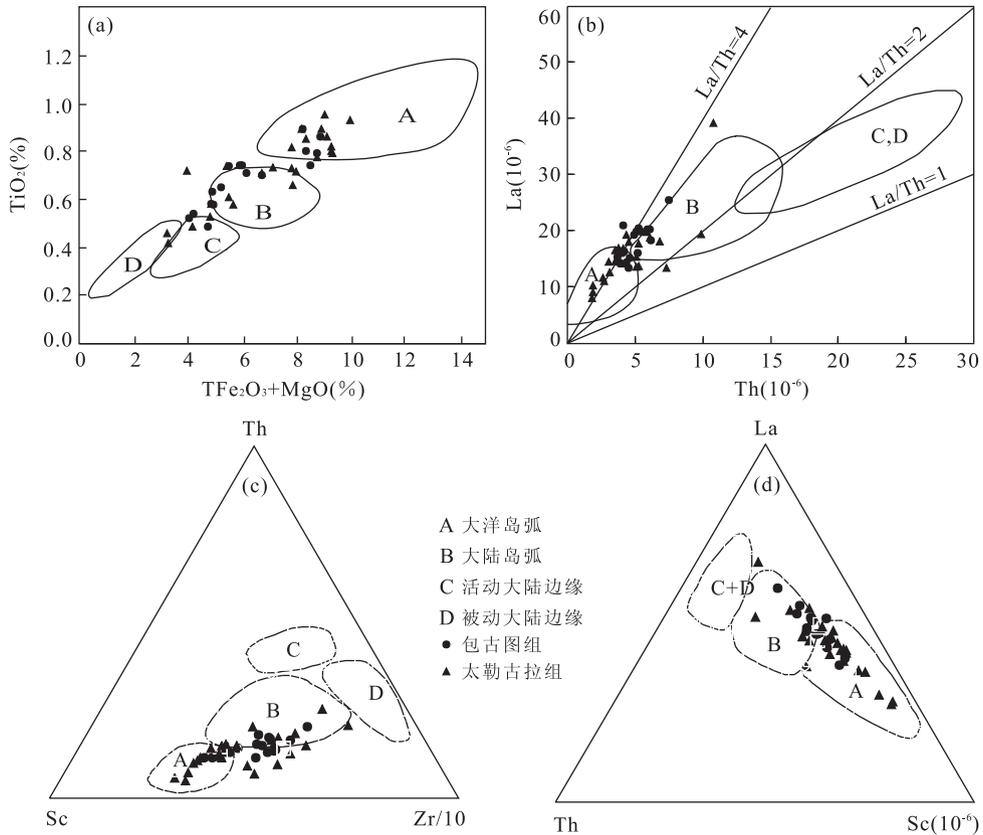


图 11 克拉玛依后山石炭纪包古图组和太勒古拉组碎屑岩构造环境判别

Fig. 11 Tectonic setting diagrams using major and trace elements

a. TFe₂O₃+MgO-TiO₂ 判别(Bathia, 1983); b. La-Th 图解; c. Th-Sc-Zr/10 三角图解; d. La-Th-Sc 三角图解(Bathia, 1986)

为主,含少量火山碎屑,其矿物形态及组合反映了岩石成熟度低,其中不稳定矿物及大量火山岩岩屑的存在,表明岩石具有快速搬运的特点,是相对近源或者相对较为快速的成岩过程,源区应与岩浆弧物源相关。

通过前文的地球化学分析结果,我们认为克拉玛依后山地区早石炭世包古图组和太勒古拉组碎屑岩的源区均具有大洋岛弧—大陆岛弧环境的特征,且更亲近大洋岛弧;同时源岩性质均显示为以中酸性火成岩为主,可能含有部分基性火成岩,但很少古老沉积物混入。

由于沉积盆地具有多元化的物源供给,为此探

讨碎屑岩的物源区及构造背景存在着一定的困难。因此除对样品岩石学特征、全岩地球化学特征进行研究外,碎屑岩的锆石年代学证据及沉积盆地周围的地质体特点,可以更准确地定位物源区,为讨论物源区构造演化提供宝贵的证据。

沉积岩中的碎屑锆石年代学证据能够对沉积物源区的确定及邻区构造单元对比起到很重要的作用(Fedo *et al.*, 2003; Moecher and Samson, 2006; Wang *et al.*, 2010; 王鹏鸣等, 2012; 张英利等, 2011)。其记录的年龄信息不仅可以限定源区岩石形成年龄或变质结晶年龄,且可用来进行地层形成年代的限制、区域岩石—构造单元对比研究以及古地

理格局恢复. 本次研究区早石炭世沉积岩中碎屑锆石的分析结果显示(图 6), 包古图组存在 2 个年龄主峰值(340 Ma 和 440 Ma), 太勒古拉组却只有一个年龄峰值(约 330 Ma), 可见二者的源区性质虽然较为相似, 但是来源区却存在明显差异.

资料表明, 研究区北侧莫合台—谢米斯台山一带及南西侧巴尔雷克山—玛依力山一带发育大量的泥盆纪—石炭纪火山岩, 主要以中酸性及中基性火山岩为主(梁云海等, 2004). 其中以泥盆纪的玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩组合最多, 石炭纪的玄武岩—流纹岩组合次之, 主要分布于下泥盆统马拉苏组、中泥盆统巴尔雷克组、中泥盆统库鲁木迪组、上泥盆统铁列克提组、下石炭统黑山头组、希贝库拉斯组及太勒古拉组地层之中. 泥盆纪时期, 准噶尔区火山活动强烈, 发育基、中、酸性火山熔岩及火山碎屑岩(王庆明, 2000).

包古图组碎屑锆石年龄有一个主峰值 340 Ma 和一个次峰值 440 Ma, 含部分泥盆纪及少量奥陶纪和寒武纪的锆石, 代表其物质来源比较复杂, 主要与石炭纪、泥盆纪及志留纪时期火山岩有关. 其中主峰值 340 Ma 的碎屑锆石与田陟贤等(2013)测得的下石炭统黑山头组火山岩年龄(349 ± 8 Ma) 较为接近, 同时该组在巴尔雷克山一带主要为玄武岩—安山岩—英安岩组合, 与本次碎屑岩地球化学研究结果相一致. 同时该组地球化学特征显示大离子亲石元素(Ba、Th、K 和 Sr) 相对富集, 高场强元素 Nb、Ta 相对亏损, 显示为岛弧火山岩的地球化学特征(田陟贤等, 2013). 推测其为包古图组提供了物质来源; 其次, 次峰值为 440 Ma 的早志留世碎屑锆石可能与该区发育的一系列蛇绿混杂岩带有关. 前人研究表明, 玛依勒混杂岩带中碎屑锆石年龄在 413~460 Ma 不等(Flavien *et al.*, 2012), 其地球化学特征显示为大洋板内的洋岛环境(何国琦等, 2001; 杨高学, 2012), 与本次研究结果一致. 而少量的泥盆纪碎屑锆石, 则可能来源于该区发育的中泥盆统库鲁木迪组与巴尔雷克组火山岩. 这 2 个组的火山岩组合为玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩, 下部为中酸性火山岩及其火山碎屑岩, 中部为中基性火山岩及凝灰熔岩、角砾凝灰熔岩、火山角砾岩、凝灰岩夹硅质岩, 上部主要为安山岩—英安岩—流纹岩及火山角砾岩、火山灰凝灰岩, 同样与本次地球化学研究结果一致.

太勒古拉组碎屑锆石年龄只有一个峰值(330 Ma), 物质来源则较为单一, 主要来源于石炭

纪火成岩, 少量泥盆纪的锆石代表了可能还有少量泥盆纪火成岩. 前人研究表明, 西准噶尔北部谢米斯台山西缘博什库尔—成吉斯火山弧中发育早石炭世中酸性火山岩, 其中富集轻稀土及大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素, 地球化学综合研究发现其为岛弧火山岩; 同时其锆石 U-Pb 年龄为 331 ± 2.4 Ma (易善鑫等, 2014), 与本次研究所得的主峰值为 330 Ma 的石炭纪锆石存在较大相关性, 因此推测广泛发育在西准噶尔北部的博什库尔—成吉斯火山弧石炭纪地层为太勒古拉组提供了物质来源. 与此同时, 其他泥盆纪地层可能也作为物源供给碎屑物质. 可见, 从早石炭世到晚石炭世, 主要物源供给方向发生了迁移, 从南西侧巴尔雷克山转向北侧谢米斯台山一带, 这可能与区域上同时期的构造活动有关. 这与纵瑞文等(2014)的研究结果近乎一致, 他们根据区域上地层厚度、碎屑粒度的变化、粗细碎屑岩的含量比、沉积相标志的类型及鲍马序列 A 段厚度等的变化规律, 推测研究区在早石炭世维宪期(包括希贝库拉斯组和包古图组), 其浊流下游方向为 NE 向; 从太勒古拉组沉积开始, 浊流下游方向演变为 SW 向.

区域地质资料还显示, 全区石炭纪海侵范围由南西往北东退缩. 沉积—喷出中心亦由南往北、由西向东迁移, 在玛依力山和巴尔雷克山下石炭统出露零星, 厚度小且夹有煤层, 主要为陆源碎屑岩沉积. 往北东方向广泛分布有中下石炭统, 地层厚度增大, 伴有火山作用(周良仁等, 1987). 这从侧面说明了早石炭世西准噶尔地区还是处于一种岛弧环境, 碎屑物沉积的同时伴随着火山作用的发生.

综合以上的讨论, 我们认为克拉玛依后山地区早石炭世不同时代的碎屑岩源区构造背景较为相似, 均为大洋岛弧—大陆岛弧环境, 且更亲近大洋岛弧类型. 可能受构造活动影响, 早石炭世—晚石炭世物源区发生了从南西—北东的迁移. 同时地球化学资料显示, 物质来源并没有来自古老沉积物再旋回的物质, 碎屑锆石年龄也显示存在很少古老的锆石, 推测研究区可能不存在寒武纪基底, 或基底出露范围很小, 不足以作为供源区.

6 结论

(1) 克拉玛依后山地区碎屑岩中的碎屑颗粒主要为次棱角—次圆状, 分选程度一般, 显示较低成熟度, 表明碎屑物质是近源快速堆积; 对其主量元素、

稀土元素及微量元素所使用的物源判别及沉积构造背景判别图(图10)结果显示,该区沉积物母岩可能来自于与大洋岛弧—大陆岛弧型构造背景有关的中酸性火山岩,夹有少量基性火山岩,而不具有更老的沉积岩再循环特征。

(2)碎屑锆石年代学结果显示,下石炭统包古图组物质来源较为复杂,主要为志留纪、泥盆纪、石炭纪的火成岩为主,太勒古拉组主要为石炭纪的火成岩,同时混有部分泥盆纪火成岩。2个样品的碎屑锆石中均存在很少的古老锆石,结合不具有更古老的沉积岩再循环的物源特征,可推测西准噶尔地区可能不存在前人认为的前寒武纪结晶基底,或者基底出露面积不大,不足以作为物质来源。

(3)根据地球化学特征及碎屑锆石年代学特征,结合区域地质特征,初步判断研究区下石炭统包古图组碎屑来源于研究区南西侧巴尔雷克山一带的中泥盆世、早石炭世中酸性火山岩及中志留世的蛇绿混杂岩;太勒古拉组碎屑来源可能与研究区北部谢米斯台山西缘早石炭世中酸性岛弧火山岩有关,同时研究区在早石炭世时期处于岛弧环境,在沉积的同时伴随着火山作用,为样品中火山碎屑及火山灰物质的提供来源。由此可见,早石炭世—晚石炭世时期,源区发生了南西—北东的迁移,可能与区域上的构造活动有关。

致谢:本文撰写过程中,项目组吴涛、杨钢、纵瑞文、晏文博等师兄提出了许多宝贵的意见,其他项目组成员参与了部分野外工作及室内整理,在此一并表示非常感谢!

References

Bhatia, M. R., 1983. Plate-Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *Journal of Geology*, 91(6): 611—627.

Bhatia, M. R., 1985. Rare Earth Element Geochemistry of Australia Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control. *Sedimentary Geology*, 45(1—2): 97—113. doi: 10. 1016/0037—0738(85)90025—9

Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181—193. doi: 10. 1007/BF00375292

Cai, T. C., 1999. The Xinjiang Uygur Autonomous Region Rock Strata. China University of Geosciences Press,

Wuhan (in Chinese).

Condie, K. C., 1993. Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust; Contrasting Results from Surface Samples and Shales. *Chemical Geology*, 104(1—4): 1—37. doi: 10. 1016/0009—2541(93)90140—E

Ding, P. Z., Yao, S. M., 1985. Some Early Stage of Lower Carboniferous Brachiopods from Western Part of Karamay, Xinjiang and Its Significances. *Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, (11): 65—74 (in Chinese with English abstract).

Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleo-Weathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10): 921—924. doi: 10. 1130/0091—7613(1995)023<0921:UTEOPM>2. 3. CO;2

Fedo, C. M., Sircombe, K. N., Rainbird, R. H., 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277—303. doi: 10. 2113/0530277

Flavien, C., Dominique, C., Michel, F., et al., 2012. New Constraints on the Pre-Permian Continental Crust Growth of Central Asia (Western Junggar, China) by U-Pb and Hf Isotopic Data from Detrital Zircon. *Terra Nova*, 24(3): 189—198. doi: 10. 1111/j. 1365—3121. 2011. 01052. x

Floyd, P. A., Leveridge, B. E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531—542. doi: 10. 1144/gsjgs. 144. 4. 0531

Gao, R., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2013. Paleozoic Magmatism and Tectonic Setting in Western Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3413—3434 (in Chinese with English abstract).

Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., et al., 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393—407.

Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., et al., 1984. The “North American Shale Composite”: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2469—2482. doi: 10. 1016/0016—7037(84)90298—9

Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., et al., 1998. Post-Collisional Mantle-Derived Magmatism and Vertical Growth of the Continental Crust in North Xinjiang. *Geological Review*, 44

- (4):396—406 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., Jia, J. D., et al., 2001. A Discussion on Age and Tectonic Significance of Ophiolite in Eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis*, 37(6): 852—858 (in Chinese with English abstract). doi:10.13209/j.0479—8023.2001.144
- He, Z. J., Li, J. Y., Mo, S. G., et al., 2003. Analysis the Tectonic Setting and Provenance Using Geochemical Data of Mohe County Foreland Basin Sandstones. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1219—1226 (in Chinese).
- Li, Y. J., Tong, L. L., Zhang, B., et al., 2010. On the Old and New Relationship between Xibeikulasi Formation and Baogutu Formation of the Carboniferous System, Western Junggar. *Xinjiang Geology*, 28(2): 130—136 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y. H., Li, W. Q., Li, W. D., 2004. Characteristics of Polycyclic Opening-Closing Tectonics in the Junggar Orogenic Belt, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 279—285 (in Chinese with English abstract).
- Liao, Z. T., Wang, Y. J., Wang, K. L., et al., 1993. In: Tu, G. C., ed., The Research Progress in Northern Xinjiang Carboniferous Biostratigraphic. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons From Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chem. Geol.*, 257(1—2): 34—43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Lu, Y. F., 2004. Geokit—A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel. *Geochemistry*, 33(5): 459—464.
- Mao, G. Z., Liu, C. Y., 2011. Application of Geochemistry in Provenance and Depositional Setting Analysis. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 337—348 (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. doi:10.1086/629470
- Moecher, D. P., Samson, S. D., 2006. Differential Zircon Fertility of Source Terranes and Natural Bias in the Detrital Zircon Record: Implications for Sedimentary Provenance Analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 247(3—4): 252—266. doi:10.1016/j.epsl.2006.04.035
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715—717. doi:10.1038/299715a0
- Regional Geological Survey Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1966. Regional Geological Survey Report of Kelamayi, Scale 1: 200 000 (L—45—XIX) (in Chinese).
- Regional Geological Survey Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1983. Regional Geological Survey Report of Baiyanghe, Scale 1: 200 000 (L-15-[13]) (in Chinese).
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *Journal of Geology*, 94: 635—650. doi:10.1086/629071
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1): 119—139. doi:10.1016/0009—2541(88)90010—1
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1999. Geochemical Characterization, Evolution and Source of a Mesozoic Accretionary Wedge: The Torlesse Terrane, New Zealand. *Geological Magazine*, 136(5): 493—512. doi:10.1017/S0016756899003003
- Song, C. H., Wang, J. R., Huang, H. F., 1996. Study of Deep-Water Sediments of Tailegula Formation on the North of Baijiantan, West of Junggar Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 32(3): 132—137 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Tian, Z. X., Yan, J., Li, Y. J., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Setting of the Volcanic Rocks in the Heishantou Formation from the Area of Barleik, Western Junggar. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 343—352 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B. Q., Wang, W., Zhou, M. F., 2013. Provenance and Tectonic Setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terrane, Tibet. *Geoscience Frontiers*, 4(6): 765—777.

- doi:10.1016/j.gsf.2013.02.007
- Wang, L. J., Griffin, W. L., Yu, J. H., et al., 2010. Precambrian Crustal Evolution of the Yangtze Block Tracked by Detrital Zircon from Neoproterozoic Sedimentary Rocks. *Precambrian Research*, 177(1–2): 131–144. doi:10.1016/j.precamres.2009.11.008
- Wang, P. M., Yu, J. H., Sun, T., et al., 2012. Geochemistry and Detrital Zircon Geochronology of Neoproterozoic Sedimentary Rocks in Eastern Hunan Province and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3841–3857 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. M., 2000. Palaeogeography of the Devonian in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 18(4): 319–323 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Jin, Y. G., Jiang, N. Y., 1987. On The Age and Palaeoenvironmental Features of the Halaalate Formation. *Journal of Stratigraphy*, 11(1): 53–57 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. Z., Qi, X. F., Tang, Y., et al., 2008. Carboniferous Strata and Lithofacies Palaeogeography & Source Rock in Northern Xinjiang. *Geoscience*, 22(4): 549–557 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, K. P., Li, Y. J., Xu, L., et al., 2013. Discussing the Application of “Tailegula Formation” in Baogutu-Hatu Region, Western Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 31(3): 148–152 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G. X., 2012. Geological Characteristics and Tectonic Evolution of Paleozoic Ophiolitic Mélange in the Western Junggar (Dissertation). Chang’an University, Xi’an (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Du, Y. S., Xu, Y. J., 2008. Two Suits of Sandstones in the Lower Paleozoic at Jingtai, Eastern North Qilian: Trace and Rare Earth Elements Characteristics and Tectonic Setting. *Journal of Palaeogeography*, 10(4): 395–408 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. F., He, D. F., Qing, C. W., et al., 2012. Provenance and Tectonic Setting of the Carboniferous Sedimentary Rocks of the East Junggar Basin, China: Evidence from Geochemistry and U-Pb Zircon Geochronology. *Gondwana Research*, 22: 567–584. doi:10.1016/j.gr.2011.11.001
- Yang, X. M., 2000. Rock Geochemistry. University of Science and Technology of China Press, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Yi, S. X., Li, Y. J., Jiao, G. L., et al., 2014. Geochemistry Characteristics of the Early Carboniferous Volcanic Rocks in the Boshchekul-Chingiz Volcanic Arc, Western Junggar and Its Tectonic Implication. *Xinjiang Geology*, 33(1): 14–18 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. Y., Chen, W., Yuan, C., et al., 2013. Ages and Tectonic Implication of Late Paleozoic Plutons in the Western Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA-ICP-MS Zircon Geochronology. *Geochimica*, 42(5): 414–429 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Wang, G. C., Gao, R., et al., 2015. U-Pb Chronology of Carboniferous Detrital Zircons and Its Geological Implications in Western Junggar. *Geotectonica et Metallogenia*, in press (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. L., Wang, Z. Q., Yan, Z., et al., 2011. Provenance of Neoproterozoic Rocks in Quruqtagh Area, Xinjiang: Evidence from Detrital Zircon Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 121–132 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. R., Zhao, Z. C., Zhang, J. S., 1987. Characteristics of Geological Structure and Magmatic Evolution of the Western Junggar Area. *Bull. Xi’an Inst. Geol. Min. Res.*, *Chinese Acad. Geol. Sci.*, (2): 3–55, 171 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. Q., Feng, Y. M., 1994. Plate Tectonics and Evolution in Western Junggar of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 12(2): 91–105 (in Chinese with English abstract).
- Zong, R. W., Gong, Y. M., Wang, G. C., 2014. Carboniferous Stratal Sequence and Its Palaeogeographical Evolution in Southern Western Junggar, NW China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 216–233 (in Chinese with English abstract). doi:10.13745/j.esf.2014.02.016

附中文参考文献

- 蔡士赐, 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 丁培榛, 姚守民, 1985. 新疆克拉玛依西部早石炭世晚期腕足类化石及地层意义. 中国地质科学院西安地质矿产研究所文集, (11): 65–74.
- 高睿, 肖龙, 王国灿, 等, 2013. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景. 岩石学报, 29(10): 3413–3434.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 等, 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长. 地质论评, 44(4): 396–406.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等, 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077–1086.
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 等, 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 852–858.
- 和政军, 李锦轶, 莫申国, 等, 2003. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析. 中国科学(D辑), 33(12): 1219–1226.
- 路远发, 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软

件包. 地球化学, 33(5): 459—464.

李永军, 伶丽莉, 张兵, 等, 2010. 论西准噶尔石炭系希贝库拉斯组与包古图组的新老关系. 新疆地质, 28(2): 130—136.

梁云海, 李文铅, 李卫东, 2004. 新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征. 地质通报, 23(3): 279—285.

廖卓庭, 王玉净, 王克良, 等, 1993. 见: 涂光炽编, 新疆北部石炭纪生物地层研究新进展. 北京: 科学出版社.

毛光周, 刘池洋, 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用. 地球科学与环境学报, 33(4): 337—348.

新疆维吾尔自治区地质矿产局区域地质测量大队, 1966. 1: 20 万《克拉玛依幅》(L-45-XIX) 区域地质调查报告(区域地质).

新疆维吾尔自治区地质矿产局区域地质调查大队, 1983. 1: 20 万《白杨河幅》(L-15-[13]) 区域地质调查报告(区域地质).

宋春晖, 王金荣, 黄华芳, 1996. 西准噶尔白碱滩北部太勒古拉组深水沉积研究. 兰州大学学报(自然科学版), 32(3): 132—137.

田陟贤, 阎军, 李永军, 等, 2013. 西准噶尔巴尔雷克一带石炭系黑山头组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境. 地质学报, 87(3): 343—352.

王鹏鸣, 于津海, 孙涛, 等, 2012. 湘东新元古代沉积岩的地球化学和碎屑锆石年代学特征及其构造意义. 岩石学报, (12): 3841—3857.

王庆明, 2000. 新疆泥盆纪古地理. 新疆地质, 11(1): 319—323.

王玉净, 金玉环, 江纳言, 1987. 论哈拉阿拉特组的时代及古环境特征. 地层学杂志, 11(1): 53—57.

吴晓智, 齐雪峰, 唐勇, 等, 2008. 新疆北部石炭纪地层、岩相古地理与烃源岩. 现代地质, 22(4): 549—557.

向坤鹏, 李永军, 徐磊, 等, 2013. 西准噶尔包古图—哈图地区“太勒古拉组”使用商榷. 新疆地质, 31(3): 148—152.

杨高学, 2012. 西准噶尔古生代蛇绿混杂岩地质特征及其构造演化(博士学位论文). 西安: 长安大学.

杨江海, 杜远生, 徐亚军, 2008. 北祁连东段景泰地区下古生界两套砂岩微量元素和稀土元素特征及其构造意义. 古地理学报, 10(4): 395—408.

杨学明, 2000. 岩石地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社.

易善鑫, 李永军, 焦光磊, 等, 2014. 西准噶尔博什库尔—成吉斯火山弧中早石炭世火山岩的地球化学特征及其构造意义. 新疆地质, 33(1): 14—18.

尹继元, 陈文, 袁超, 等, 2013. 新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义: 来自锆石 LA-ICP-MS 定年的证据. 地球化学, 42(5): 414—429.

张雷, 王国灿, 高睿, 2015. 新疆西准噶尔石炭系碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 大地构造与成矿学, 待刊.

张英利, 王宗起, 闫臻, 等, 2011. 库鲁克塔格地区新元古代沉积物源分析: 来自碎屑锆石年代学的证据. 岩石学报, (1): 121—132.

周良仁, 赵志长, 张金声, 1987. 西准噶尔地区地质构造发展及岩浆演化特征. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (2): 3—55, 171.

朱宝清, 冯益民, 1994. 新疆西准噶尔板块构造及演化. 新疆地质, 12(2): 91—105.

纵瑞文, 龚一鸣, 王国灿, 2014. 西准噶尔南部石炭纪地层层序及古地理演化. 地学前缘, 21(2): 216—233.

(上接 460 页)

肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等, 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 104—123.

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.

杨海波, 高鹏, 李兵, 等, 2005. 新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征. 新疆地质, 23(2): 123—126.

尹继元, 袁超, 王毓婧, 等, 2011. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录. 大地构造与成矿学, 35(2): 278—291.

张驰, 黄萱, 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38(6): 509—524.

张继恩, 肖文交, 韩春明, 等, 2010. 西准噶尔石炭纪洋脊俯冲岩浆活动: 以玛里雅蛇绿岩为例. 岩石学报, 26(11): 3272—3282.

张连昌, 万博, 焦学军, 等, 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达

克岩特征及其地质意义. 中国地质, 33(3): 626—631.

张元元, 郭召杰, 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. 岩石学报, 26(2): 421—430.

赵磊, 何国琦, 朱亚兵, 2013. 新疆西准噶尔北部谢米斯台南山南坡蛇绿岩带的发现及意义. 地质通报, 32(1): 195—205.

赵振华, 王强, 熊小林, 等, 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22(5): 1249—1265.

朱永峰, 徐新, 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22(12): 2833—2842.

朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等, 2007. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究. 岩石学报, 23(7): 1739—1748.

纵瑞文, 韩非, 龚一鸣, 2013. 新疆额敏东部志留纪化石的发现及其意义. 地层学杂志, 37(4): 607—609.