

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.039



西南天山下泥盆统阿帕达尔坎组 砂岩物源及构造环境

罗彦军¹, 王斌^{1*}, 王国灿², 陈博¹, 张海迪¹, 马伯永³

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 晚古生代是南天山洋盆演化的关键时段, 通过对南天山晚古生代沉积记录进行研究, 对于恢复南天山晚古生代构造古地理, 揭示南天山晚古生代构造演化具有十分重要的意义. 西南天山别迭里地区泥盆系出露齐全, 是研究南天山晚古生代构造演化的有效载体. 对西南天山下泥盆统阿帕达尔坎组砂岩进行了岩石地球化学、重矿物特征, 以及碎屑锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨了其沉积物质来源及地质意义. 结果表明, 砂岩以石英砂岩与岩屑砂岩为主, 其岩屑组分以中酸性火山岩为主. 砂岩 CIA 值和 ICV 值平均为 63.1 和 1.19, 属于中等程度风化作用, 经历了一定的分选再旋回过程. 重矿物以锆石、磷灰石、金红石等为主, 分选磨圆较差. ATi 指数为 20.0~47.2, ZTR 指数为 20~60, 反映阿帕达尔坎组物源区的火山岩较为发育, 且搬运距离近. 地球化学物源分析图解及重矿物特征均指示母岩以长英质岩浆岩为主, 其次为再循环古老沉积物组分. 砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄分 5 期: 主要为 397~486 Ma、669~959 Ma, 其次为 1 190~1 476 Ma、1 782~2 094 Ma、2 300~3 660 Ma. 表明物源区地质体主要为早古生代、新元古代, 其次为新太古代、古元古代、中元古代, 与塔里木克拉通北缘岩浆岩带和前寒武基底岩浆活动事件比较吻合, 指示物源来自塔里木北缘. 构造判别图解显示阿帕达尔坎组为活动大陆边缘环境下的产物.

关键词: 西南天山; 别迭里; 下泥盆统; 碎屑锆石年代学; 物源分析; 构造地质; 地球化学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2025)07-2759-16

收稿日期: 2021-10-21

Provenance and Tectonic Environment of Lower Devonian Apadalkan Formation in Southwest Tianshan

Luo Yanjun¹, Wang Bin^{1*}, Wang Guocan², Chen Bo¹, Zhang Haidi¹, Ma Boyong³

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

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: The Late Paleozoic is the key period of ocean basin evolution in South Tianshan. By studying the Late Paleozoic sedimentary records, we can restore Late Paleozoic paleogeography and reveal tectonic evolution history of the South Tianshan. The Devonian strata are well preserved in the Biedieli area of Southwest Tianshan, as an important carrier for the study of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2021YFE0190500); 中国地质调查局地质调查项目(No.DD20190445).

作者简介: 罗彦军(1985—), 男, 工程师, 主要从事中亚造山带地质矿产研究. ORCID: 0000-0003-1931-9436. E-mail: luoyanjuncgs@163.com

* **通讯作者:** 王斌, E-mail: 305590518@qq.com

引用格式: 罗彦军, 王斌, 王国灿, 陈博, 张海迪, 马伯永, 2025. 西南天山下泥盆统阿帕达尔坎组砂岩物源及构造环境. 地球科学, 50(7): 2759-2774.

Citation: Luo Yanjun, Wang Bin, Wang Guocan, Chen Bo, Zhang Haidi, Ma Boyong, 2025. Provenance and Tectonic Environment of Lower Devonian Apadalkan Formation in Southwest Tianshan. *Earth Science*, 50(7): 2759-2774.

early Late Paleozoic tectonic evolution of the South Tianshan. In this paper, in order to reveal their source and geological significance, we study the geochemical characteristics, heavy mineral characteristics and geochronological data of sandstone in Lower Devonian Apadalkan Formation. The CIA and ICV of sandstone are 63.1 and 1.19, respectively, showing that the sandstone belongs to intermediate weathering and has experienced sorting and recycling. The heavy minerals are mainly zircon, apatite, rutile, etc., and their sorting and roundness are poor. The ATi and ZTR index is 20.0–47.2 and 20–60, respectively, indicating the volcanic rocks in the source area of the Apadalkan Formation were abundant, and their transportation distance was relatively short. The geochemical provenance analysis diagram and heavy mineral characteristics indicate that the source rock is mainly felsic magmatic rocks, followed by recycled ancient sediment components. According to the LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircon grains, the source rocks of Apadalkan Formation are derived from terrains with five different geological periods, mostly 407–486 Ma and 669–959 Ma, and subordinately 1 190–1 476 Ma, 1 782–2 094 Ma and 2 300–3 660 Ma, indicating that source rocks are mostly derived from Early Paleozoic and Neoproterozoic, followed by Neoproterozoic, Paleoproterozoic and Mesoproterozoic. They are equivalent to magmatic event on the northern margin and the Precambrian basement of the Tarim. It also indicates that the materials of Apadalkan Formation are mainly derived from the northern margin of Tarim. The Tectonic discriminant diagrams show that the Apadalkan Formation is a product of an active continental margin environment.

Key words: southwest Tianshan; Biedili; Lower Devonian; chronology of detrital zircon; provenance; tectonics; geochemistry.

0 引言

南天山造山带位于中亚造山带西南部(图 1a),是南天山洋盆俯冲消减闭合作用的直接产物,记录了南天山洋盆地质演化过程中丰富的地质信息(Xiao *et al.*, 2010; 贾晓亮等, 2017). 长期以来,南天山洋构造演化是地学界研究的热点之一,其关键的地质问题是南天山洋盆的闭合时限与俯冲极性(董云鹏等, 2005; 朱志新等, 2008; 高俊等, 2009; Xiao *et al.*, 2013; 张斌等, 2014). 关于其俯冲

方式,多数学者认为南天山洋盆在志留纪–石炭纪一直向北俯冲,在中天山南缘形成活动大陆边缘,而塔里木盆地北缘为被动大陆边缘环境(李锦轶等, 2006; 朱志新等, 2008). 近年来,随着塔里木北缘一系列古生代钙碱性侵入岩类的发现,部分学者认为南天山古洋盆存在向南俯冲的阶段,塔里木克拉通北缘在该时期具有活动大陆边缘的性质,从而提出南天山洋壳双向俯冲的构造演化模式(王超等, 2009; 郭瑞清等, 2013; 张斌等, 2014; 贾晓亮等, 2017). 前人的研究更多是从岩浆岩的角度探讨南天

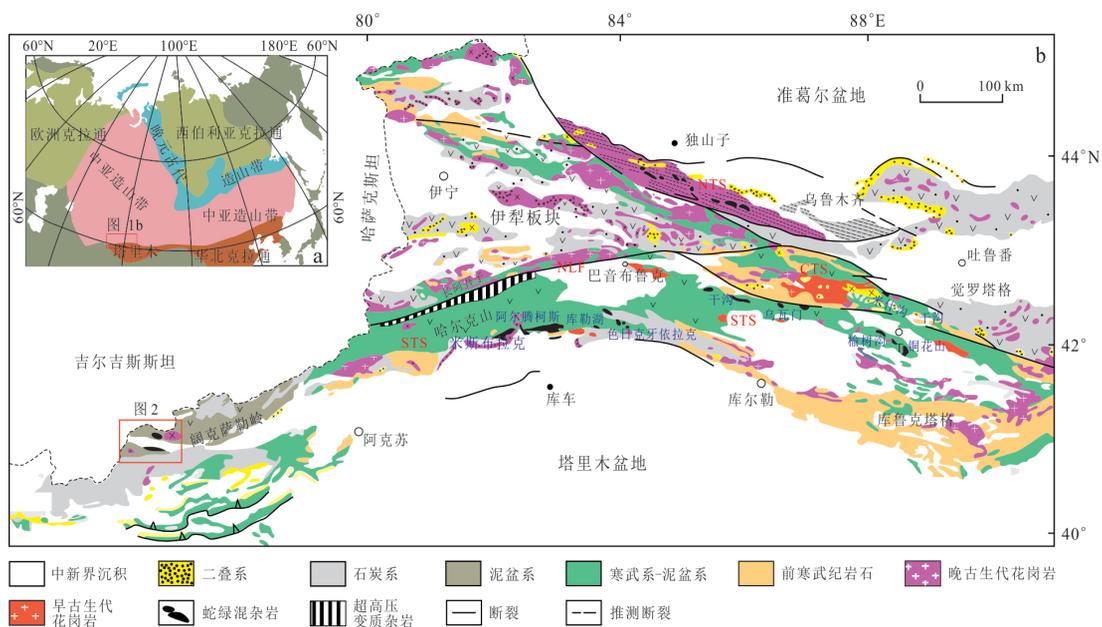


Fig.1 Regional geology of South Tianshan

据钟凌林(2019)修改. STS.南天山; CTS.中天山; NTS.南天山; NLF.那拉提断裂

山洋俯冲方式,但岩浆事件并不能完整地刻画南天山洋构造演化的各个环节,而沉积地层却蕴含着古构造环境和洋-陆转化的重要信息,是连接相邻时空不同构造事件的纽带(苏联国等,2019).所以,通过对沉积地层中碎屑岩开展碎屑岩岩石学、岩石地球化学以及碎屑锆石 U-Pb 年代学特征研究,可以准确识别并恢复造山带沉积盆地构造原型,是直接判别和认识造山作用方式、俯冲极性与时限的重要依据之一(闫臻等,2018).本文以西南天山别迭里地区下泥盆统阿帕达尔坎组砂岩为研究对象,从岩石地球化学、重矿物及碎屑锆石 U-Pb 年龄等方面入手,分析探讨了砂岩的物源环境以及形成的大地构造背景,为进一步研究南天山洋的俯冲时间以及俯冲极性等问题提供新的证据.

南以塔里木北缘断裂带为界,夹持于伊犁-哈萨克斯坦板块和塔里木板块之间(图 1b),其形成于古生代南天山洋的俯冲消减过程,与塔里木地块和中天山地块的碰撞造山过程密切相关,经历了复杂的构造演化和地壳增生过程(朱志新等,2008;高俊等,2009).南天山造山带组成非常复杂,在地质上不仅包含了南天山洋俯冲消减过程中形成的弧前增生体系,还包含了塔里木与伊犁-哈萨克斯坦板块陆陆碰撞造山过程中形成的构造混杂岩,物质组成上主要表现为塔里木北缘前寒武纪基底岩石和附着其上的洋壳增生物质,以及部分塔里木地块北缘的陆缘/浅海沉积物.南天山造山带主要发育两条蛇绿岩带,呈小岩块形式产于高压变质岩层之中,或散布在古生代地层之中.其中,北支呈东西向分布于长阿吾子-干沟-乌瓦门-榆树沟-铜花山一带,南支经米斯布拉克、阿尔腾柯斯、库勒湖至色日克牙依拉克一线分布.

1 区域地质背景

南天山造山带北以中-南天山缝合带为界,

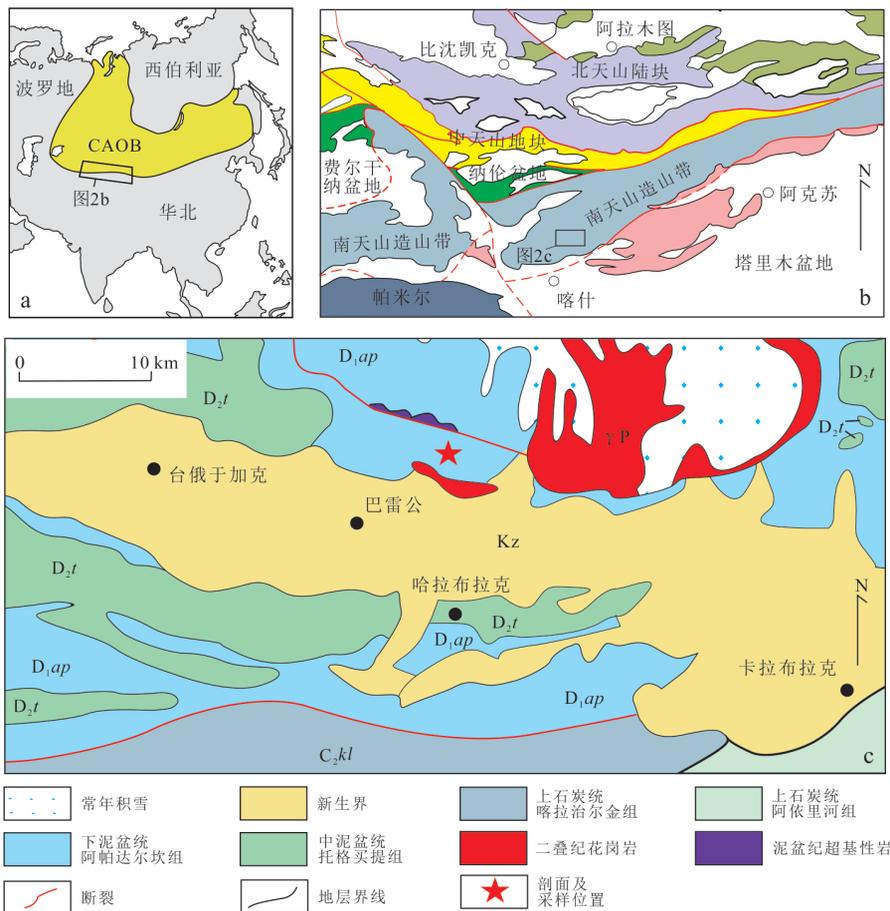


图 2 西南天山区域地质简图与剖面位置

Fig.2 Regional geology of the study area and profile locations

据王超等(2009)和 Alexeiev *et al.* (2016)修改

南天山造山带侵入岩主要分布于南天山北部(中天山南缘)与南天山南部(塔里木北缘)(图 1),以古生代花岗质侵入岩为主,含少量辉长岩、闪长质侵入岩,中天山南缘古生代岩浆活动持续长,奥陶纪-石炭纪岩浆岩均有发育,被认为是南天山古洋盆沿伊犁-中天山陆块南缘向北的俯冲产物(王超等,2009);塔里木北缘古生代岩浆岩形成时限较窄,主要由欧西达坂-色日克亚依拉克一带发育的志留纪-泥盆纪 I 型花岗岩与南天山西段发育的晚石炭世同碰撞 S 型花岗岩、二叠纪后碰撞 A 型花岗岩组成(郭瑞清等,2013)。

南天山出露的地层主要以古生界为主(图 1),前寒武系零星出露,主要由古元古界木扎尔特群、兴地塔格群以及阿克苏群和新元古界碳酸盐岩、碎屑岩组成。古生界在南天山广泛发育,寒武系-奥陶系以巨厚海相碳酸盐岩沉积为主,志留系-泥盆系以陆源碎屑岩、火山沉积岩以及少量碳酸盐岩为代表;石炭系为海相生物碎屑碳酸盐岩;二叠系以陆相沉积为主。

本次研究剖面位于南天山西部阔克萨勒岭地区,研究区内岩浆岩主要出露有巴雷公镁铁-超镁铁质杂岩与巴雷公花岗岩。其中巴雷公镁铁-超镁铁质杂岩的结晶年龄为(450±2) Ma,具有 SSZ 型蛇绿岩的特征,是南天山蛇绿岩重要部分;巴雷公花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(291±3) Ma,具有 A 型花岗岩特征,被认为是碰撞后背景的产物。阔克萨勒岭地区出露地层以泥盆系、石炭系以及新生界沉积为主(图 2)。其中下泥盆统阿帕达尔坎组是区内分布最广的地层单元,其下部为一套灰色、深灰色钙质砂岩、粉砂岩夹页岩、碳酸盐岩;上部为中-酸性火山岩(安山岩、石英斑岩等)和玄武岩等火山熔岩夹火山碎屑岩,与上覆中泥盆统托格买提组呈整合接触关系。托格买提组主要岩性由基性火山岩、硅质岩、灰岩以及千枚岩组成。石炭系由上石炭统阿依里河组滨海-浅海相碳酸盐岩建造与喀拉治尔金组滨海相砂岩、粉砂岩组成。新生界为砾石、砂、泥土。

2 样品特征与分析方法

本次研究的样品主要采自阔克萨勒岭别迭里地区,区内主要出露阿帕达尔坎组下部层位,岩性以灰色-深灰色钙质细粒石英砂岩、细粒岩屑砂岩夹页岩,碳酸盐岩为主,具体采样位置见图 2 和图 3。其中 BDLP1-3、5、6、7、12、13 均为细粒石英砂

岩,碎屑成分以石英为主,含量在 70% 以上,岩屑含量约 5%,岩屑多以酸性喷出岩为主,基质含量约 25%(图 4a);BDLP1-14、20 为细粒岩屑砂岩,石英含量约 50%(图 4b、4c),岩屑含量约 30%,以酸性喷出岩、泥质岩为主,长石含量约 5%,基质含量约 15%;BDLP1-17 为细粒岩屑石英砂岩,石英含量约 65%,岩屑含量约 15%,以酸性喷出岩为主,长石含量约 5%,基质含量约 10%(图 4d)。

主量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所元素与同位素地球化学研究室完成,采用 X 射线荧光光谱分析法(XRF),分析误差 < 1%。微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室完成,采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析法,分析精度优于 5%~10%。

锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室完成,U-Pb 年龄测定采用 LA-ICP-MS 仪器,CL 图像分析采用电子探针(JXA-8100)仪器。其中,LA-ICP-MS 仪器为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 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 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。

重矿物分析是在廊坊诚信地质公司进行,首先用颚式破碎机(XPE100×125)和双辊破碎机(HFSG200×75)将样品进行细碎;然后将细碎的矿物样品烘干和称重,利用矿物比重的差异使用传统淘洗法把重部分提取出来,剩余尾砂及淘洗污水进行称重计算损耗率,利用三溴甲烷(密度为 2.89 g/cm³)将待测定的重矿物样品进行轻重矿物分离;再利用磁选机将重矿物分离出磁性组和无磁性组,最后将分离出来的重矿物部分在双目显微镜下进行鉴定,每个重矿物样品鉴定颗粒数均在 500 粒以上。

3 分析结果

3.1 全岩主量元素特征

西南天山下泥盆统阿帕达尔坎组 9 个砂岩样品主量元素平均含量为:SiO₂ 70.84%, Al₂O₃ 9.71%, TiO₂ 0.55%, TFe₂O₃ 3.77%, MgO 1.99%, CaO 3.88%, K₂O 1.73%, Na₂O 1.88%(附表 1)。与被动大陆边缘砂岩相比, SiO₂ 含量明显偏低; TFe₂O₃、

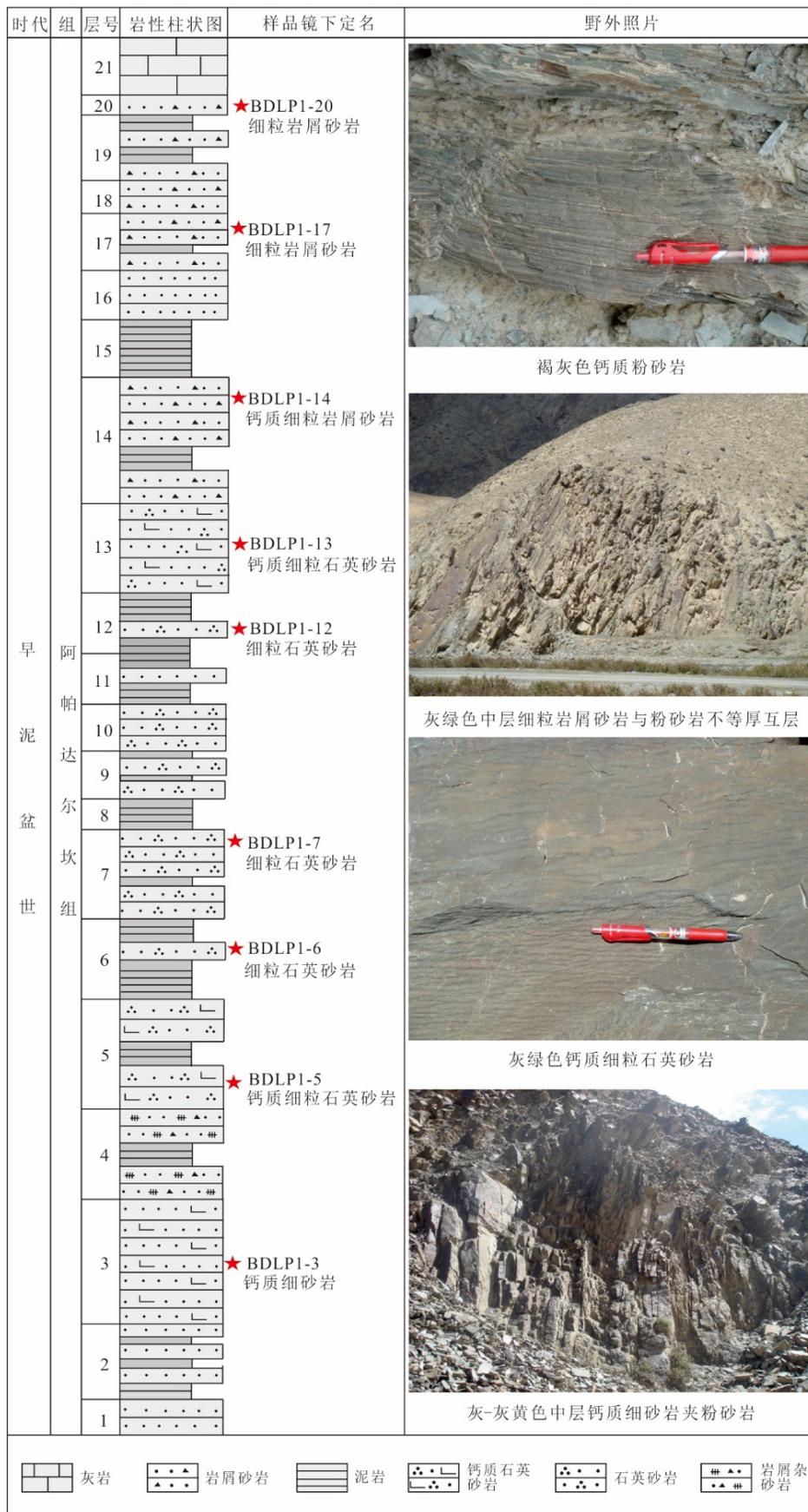


图 3 阿帕达尔坎组岩性柱状图

Fig.3 Stratigraphic and lithologic column map of Apadalkan Formation

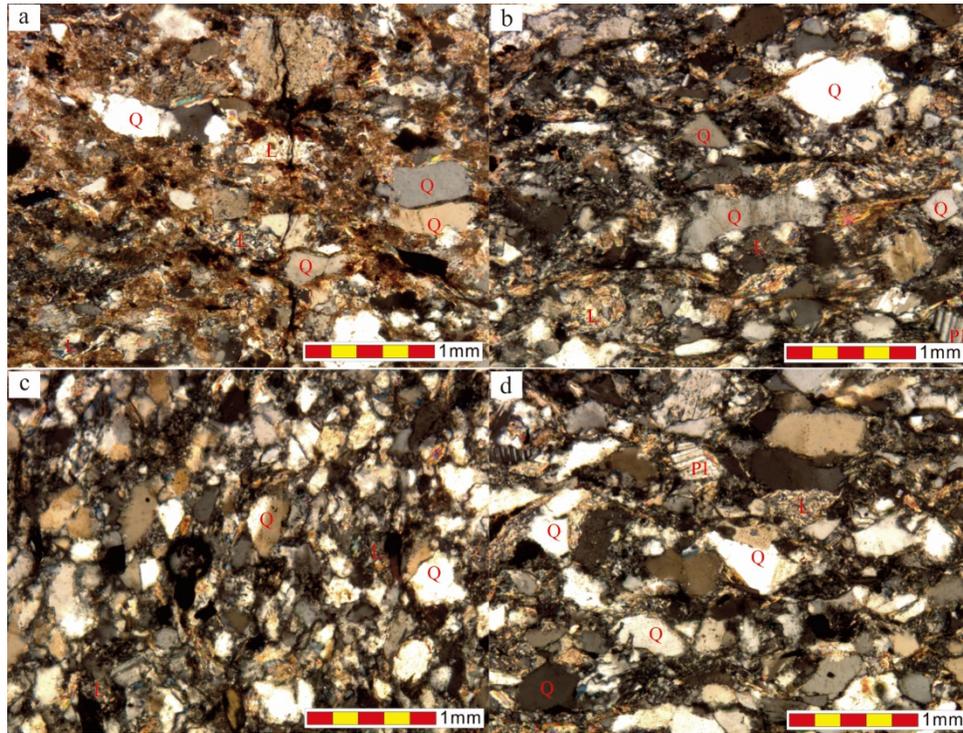


图 4 阿帕达尔坎组砂岩镜下结构特征

Fig.4 The micrograph feature of lithic sandstone of Apadalkan Formation

Q. 石英; Pl. 长石; L. 岩屑

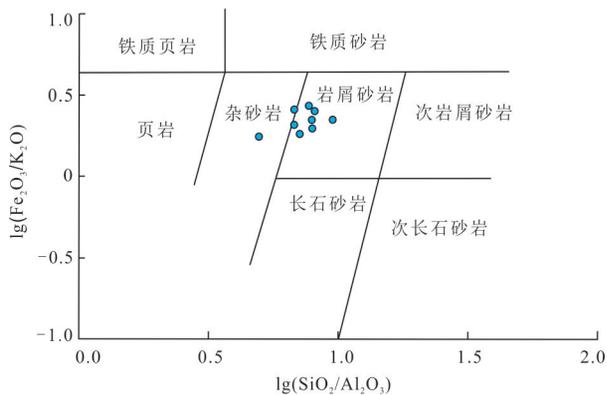
图 5 碎屑岩的 $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ - $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变异图(据 Herron, 1988)

Fig.5 Geochemical plot for lithic sandstone from Apadalkan Formation (after Herron, 1988)

MgO、Na₂O 含量偏高,与活动大陆边缘砂岩相当, SiO₂/Al₂O₃ 比较低,平均值为 7.47(附表 2),表明阿帕达尔坎组砂岩石英含量低于被动大陆边缘环境,砂岩成分成熟度较低.在岩石类型判别图解中,阿帕达尔坎组砂岩大多分布于杂砂岩-岩屑砂岩的区域(图 5).

3.2 微量、稀土元素特征

阿帕达尔坎组砂岩样品微量元素含量总体变

化较大(附表 1).其中,相容元素 Cr、Co、Ni、V 含量分别为 $33.79 \times 10^{-6} \sim 63.06 \times 10^{-6}$ 、 $6.85 \times 10^{-6} \sim 18.42 \times 10^{-6}$ 、 $14.54 \times 10^{-6} \sim 49.88 \times 10^{-6}$ 、 $39.75 \times 10^{-6} \sim 80.57 \times 10^{-6}$,均低于上地壳平均值.大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 的含量分别为 $47.57 \times 10^{-6} \sim 119.68 \times 10^{-6}$ 、 $222.73 \times 10^{-6} \sim 409.88 \times 10^{-6}$ 、 $26.93 \times 10^{-6} \sim 399.11 \times 10^{-6}$,也均低于上地壳平均值.高场强元素 Th、U、Zr、Hf、Y 的含量分别为 $6.90 \times 10^{-6} \sim 14.83 \times 10^{-6}$ 、 $1.4 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ 、 $109 \times 10^{-6} \sim 240.07 \times 10^{-6}$ 、 $2.93 \times 10^{-6} \sim 6.84 \times 10^{-6}$ 、 $20.29 \times 10^{-6} \sim 33.42 \times 10^{-6}$,可见除 U、Zr 低于上地壳平均值之外,其余均高于上地壳平均值.

稀土元素含量为 $122.4 \times 10^{-6} \sim 177.9 \times 10^{-6}$,平均值为 147.8×10^{-6} ,低于上地壳稀土元素含量 (165.3×10^{-6}).从样品稀土元素球粒陨石标准化模式图可以看出,各砂岩均具有相近的稀土元素配分模式(图 6),呈现明显右倾配分模式,具有明显轻稀土富集 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.37 \sim 16.97$,平均值为 13.65) 特征.样品具有明显 Eu 负异常 $\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 0.71$,平均值为 0.63.砂岩样品的 PAAS(澳大利亚后太古代页岩)标准化稀土元素配分模式与活动大陆边缘或者大陆岛弧杂砂岩稀土元素配分模式相似.

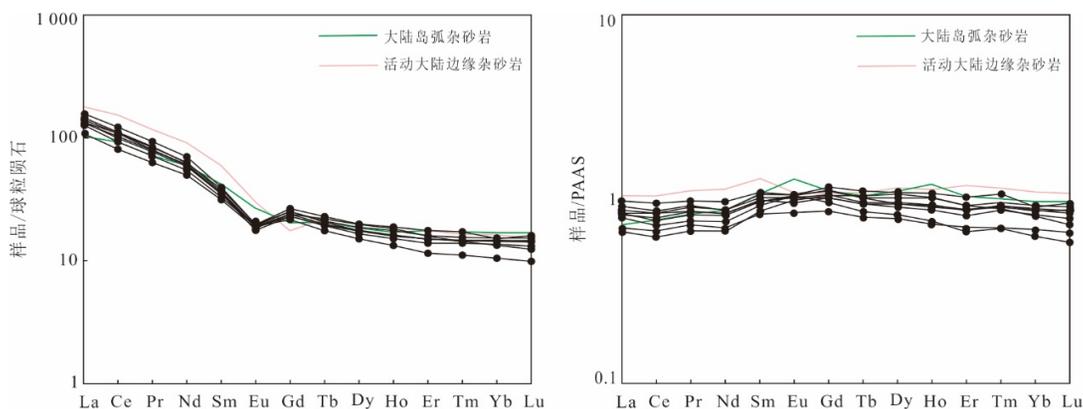


图 6 下泥盆统阿帕达尔坎组砂岩稀土元素球粒陨石标准化模式(a)和稀土元素 PAAS 标准化模式(b)

Fig.6 Chondrite-normalized rare element diagram (a) and PAAS-normalized rare earth element diagram (b) of sandstone from Apadalkan Formation

a. 标准化值据 Boynton,1984; b. 标准化值据 Hu and Gao,2008

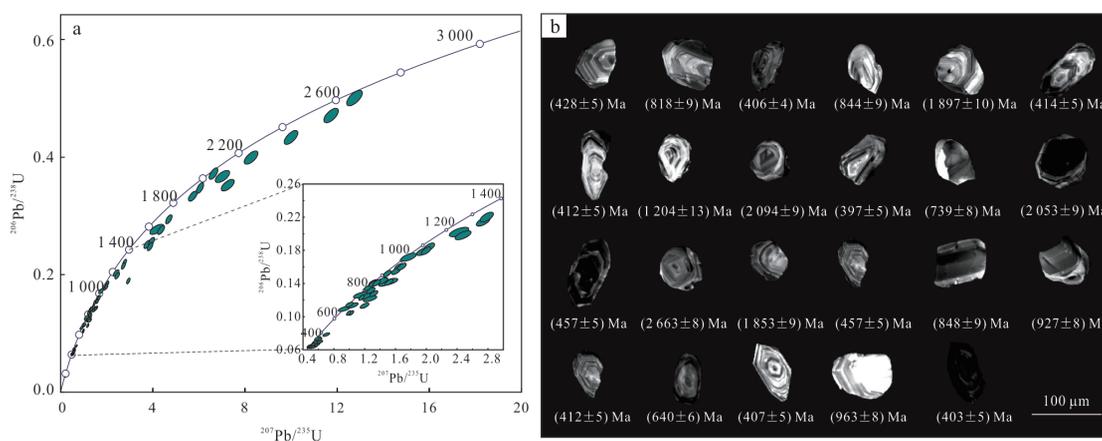


图 7 阿帕达尔坎组砂岩碎屑锆石 U-Pb 谐和图(a)及碎屑锆石阴极发光图像(b)

Fig.7 Concordia diagram of zircon data (a) and cathodoluminescence images of zircons (b) of lithic sandstone from Apadalkan Formation

3.3 重矿物特征

通过对阿帕达尔坎组 9 件砂岩样品重矿物组分及含量统计(附表 3),鉴定出 11 种重矿物.其中所有样品中均有锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、白钛石、黄铁矿、电气石、赤(褐)铁矿等矿物出现,含量较大的重矿物有锆石、黄铁矿、电气石、赤(褐)铁矿,个别样品中可见角闪石、辉石组合,也有个别样品发现少量磁铁矿.锆石占总体重矿物的 10%~29%,平均值为 18.9%,深、浅玫瑰色,主要为次棱角状,个别为柱状自形,表明其为近源沉积,未经长途搬运;磷灰石占 3%~17%,平均 8.6%,白色,次滚圆柱状、粒状;金红石占 2%~11%,平均值为 4.1%,黑色、暗红色,次棱角柱状;锐钛矿占 1%~6%,平均值为 2.9%,黄色,不规则粒状;白钛石占 2%~16%,平均值为 5.1%,灰白色,柱状;电气石

占 6%~28%,平均值为 15.4%,绿色、茶褐色,次棱角状、粒状;黄铁矿占 1%~60%,平均值为 16.3%,黄铜色,不规则粒状;赤(褐)铁矿占 1.0%~48%,平均值为 14.3%,褐黑色,粒状.

3.4 锆石 U-Pb 年代学

挑选阿帕达尔坎组岩屑砂岩(BDLP1-20-4)样品中碎屑锆石开展 U-Pb 年代学研究.锆石透反射光以及 CL 图像显示,部分锆石颗粒较小,粒径小于 100 μm,呈等轴状和柱状,保留了岩浆结晶锆石原有的长柱状晶体形态,表明其可能为近源沉积锆石.部分锆石呈浑圆状,反映其经历了长期的搬运或为沉积再循环锆石.在 CL(阴极发光)图像中(图 7b),大部分锆石发育明显的振荡环带结构,具有岩浆锆石的特征,个别锆石发育有明显的核幔结构.随机挑选 65 粒具有明显岩浆振荡生长环带锆石进行 U-Pb

同位素定年测试,剔除不谐和度大于 20% 的测点 2 个,舍弃部分 Th/U 小于 0.1 的锆石数据,获得有效的碎屑锆石测点 62 个.测试结果显示,所有锆石的 Th/U 值介于 0.11~27.80,大多数大于 0.4,表明大部分锆石为岩浆成因锆石.所测锆石年龄大于 1 000 Ma 的数据,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,而小于 1 000 Ma 的数据,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄.获得锆石年龄分布在 397~3 660 Ma,主要峰值为 397~486 Ma、669~959 Ma,其次为 1 190~1 476 Ma、1 782~2 094 Ma、2 300~3660 Ma,其中 410 Ma 左右的年龄最密集(图 7a).

4 讨论

4.1 风化作用与再旋回特征

源区风化作用、分选作用过程与源区母岩直接控制了碎屑岩的物质组成,也是判别物源区环境的重要标志之一(Nesbitt and Young, 1982).为此,通过碎屑岩地球化学成分反演源区风化作用与分选作用过程,成为认识物源区环境特征的重要手段.其中化学蚀变指数(CIA)是定量评价风化作用最为广泛的指标,其表达式为: $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$ (氧化物均为摩尔比)(Nesbitt and Young, 1982),其中 CaO^* 是指硅酸盐矿物中 CaO 的含量,而磷酸盐和碳酸盐矿物中的 CaO 除外.由于硅酸盐中 CaO 和 Na_2O 通常以 1:1 比例存在,所以当 CaO^* 含量高于 Na_2O 的含量时, $m\text{CaO}^* = m\text{Na}_2\text{O}$,而 CaO^* 含量低于 Na_2O 的含量时, $m\text{CaO}^* = m\text{CaO}$ (McLennan *et al.*, 1993).阿帕达尔坎组砂岩的 CIA 指数介于 52.0~72.5,平均值为 63.1,低于页岩平均值(70~77)(Nesbitt and Young, 1982),表明其遭受了中等程度的风化作用.A-CN-K 风化程度图可以有效地指示母岩的性质及其风化趋势(图 8),图解中阿帕达尔坎组砂岩风化趋势线近平行于 A-CN 线,且主要集中于长石线与白云母线之间,表明其主要经历了由长石向白云母风化的阶段.Th/U 的比值随着岩石风化程度的增强而增大,当 Th/U 比值大于 4 时,表明与风化作用有关,阿帕达尔坎组砂岩 Th/U 介于 5.13~5.96,平均值为 5.46,指示其源岩经历了中等强度的风化作用.

成分变异指数 ICV 可以用来判断沉积再循环作用对细碎屑岩成分的改变程度,其表达式为: $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (氧化物为质量比).一般认为,若 ICV 值

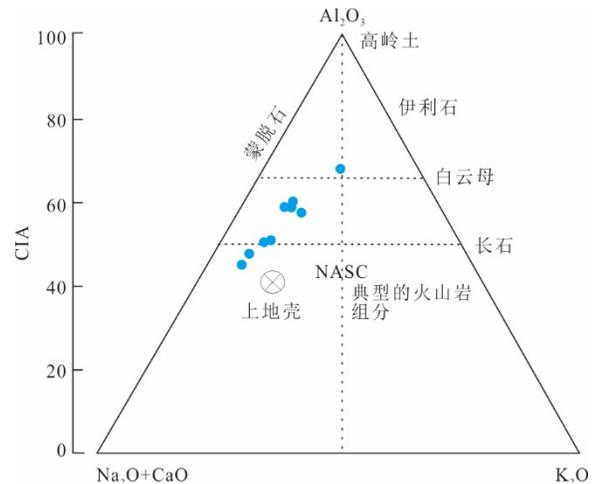


图 8 阿帕达尔坎组砂岩风化程度 A-CN-K 图解(据 Nesbitt and Young, 1982)

Fig.8 A-CN-K of lithic sandstone from Apadalkan Formation (Nesbitt and Young, 1982)

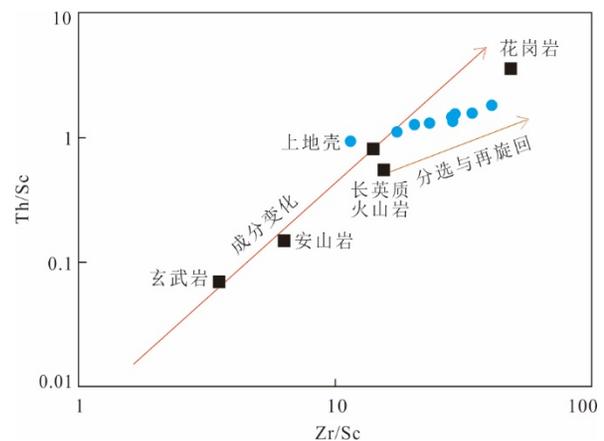


图 9 阿帕达尔坎组砂岩成分分选与再旋回 Th/Sc-Zr/Sc 图解(据李晨等, 2021)

Fig.9 The Th/Sc-Zr/Sc diagram (Li *et al.*, 2021) of lithic sandstone from Apadalkan Formation

>1,表明细碎屑岩含很少黏土物质,反映的是在活动构造带的首次沉积;若 ICV 值 <1,表明细碎屑岩含黏土成分,即沉积物经历了沉积再旋回作用,或是强烈风化作用下的首次沉积(Cox *et al.*, 1995).阿帕达尔坎组成分变异指数 ICV 介于 1.01~1.45,均略大于 1,表明其受到一定的分选再旋回作用,但程度不高.Zr/Sc 与 Th/Sc 可以很好地反映碎屑岩中矿物分选和再旋回特征,其中未发生明显分选作用的碎屑岩表现为 Th/Sc 与 Zr/Sc 呈正相关,随着强烈分选和再旋回作用的加深 Zr/Sc 比值增长较快,而 Th/Sc 比值一般变化较小 (McLennan *et al.*, 1993).在 Th/Sc-Zr/Sc 图解中(图 9),阿帕达尔坎

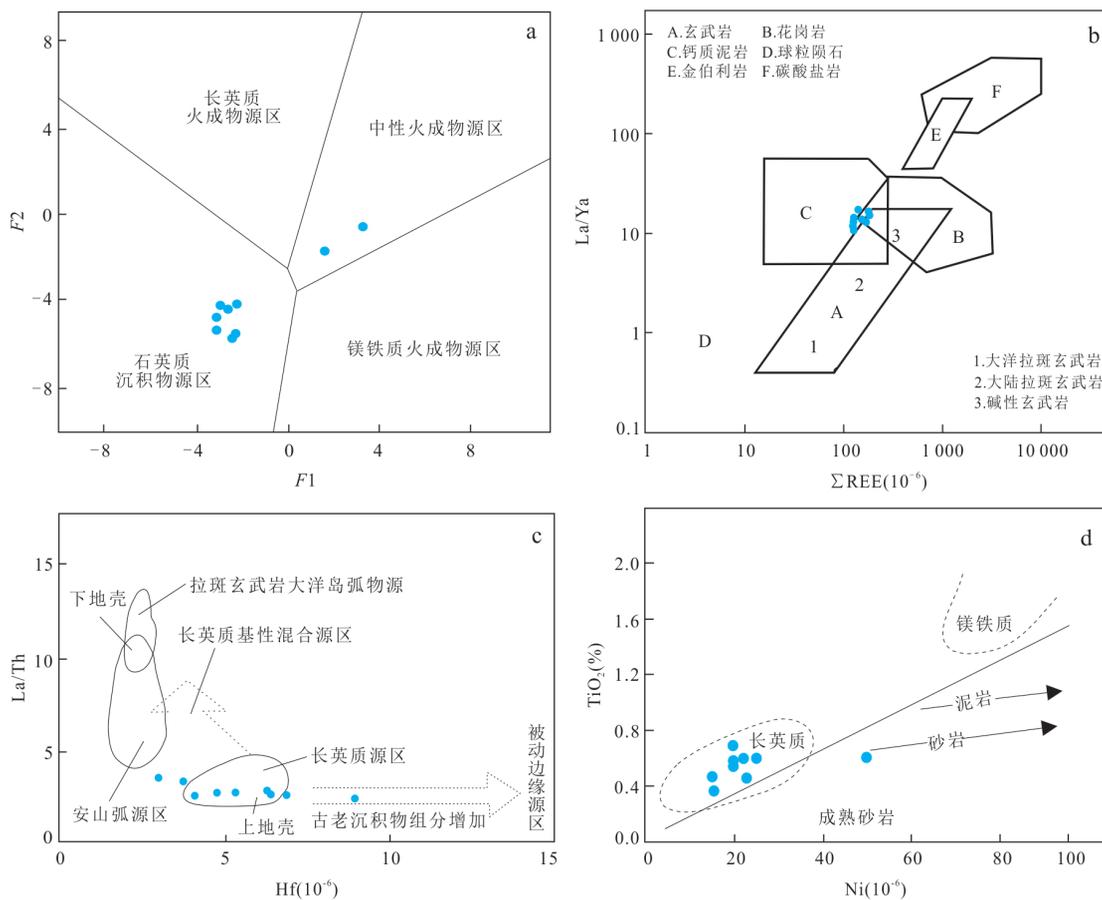


图 10 阿帕达尔坎组砂岩物源判别图

Fig.10 Provenance discrimination diagrams for lithic sandstone from Apadalkan Formation

a. 据 Roser and Korsch, 1988; b. 据王金贵等, 2020; c. 据 Floyd and Leveridge, 1987

组砂岩在长英质火山岩与上地壳附近, 表明其源区可能为长英质火山岩, 但石英组分明增加, 其 Zr/Sc 与 Th/Sc 呈正相关性, 但其近似平行于分选与再旋回趋势线, 指示其经历了弱的分选再旋回作用。

4.2 物源分析

综合利用碎屑岩主量元素, REE、Th、Sc、Co、Hf 等微量元素判别物源区物质组成成为研究碎屑岩物源区环境的重要手段, 然而沉积岩容易遭受内外地质作用影响, 因此在利用沉积岩地球化学组分进行源岩属性分析时, 应当选取多种判别标志综合分析. Roser and Korsch (1988) 建立了碎屑岩 F1-F2 主量元素判别函数图解, 以此来限定碎屑岩物源. 在 F1-F2 判别函数图解中 (图 10a), 阿帕达尔坎组砂岩大部分落入富石英质沉积岩物源区, 有两个样品落在长英质物源区, 指示其物源主要来自于富石英沉积岩与长英质火成岩. Al 和 Ti 为不易移动元素, 它们的比值能够反映原岩的特征, 据 Girty *et al.* (1996) 研究, Al_2O_3/TiO_2 值可用于初步确定沉积

物的源区成分, 当 Al_2O_3/TiO_2 小于 8 时, 反映源岩为镁铁质基性火山岩; 当 Al_2O_3/TiO_2 介于 8~21 时, 反映源区以中性火山岩为主; 当 Al_2O_3/TiO_2 大于 21 时, 反映源岩为长英质岩石. 阿帕达尔坎组样品的 Al_2O_3/TiO_2 值介于 13.45~22.51, 指示阿帕达尔坎组砂岩源区以中性火成岩与长英质岩石为主.

REE、Th、Sc、Ti、Zr、Cr 等微量元素以及相容性相差较大的元素质量分数比值, 如 Cr/Th、Th/Sc、La/Sc 等受风化作用、分选过程、成岩及变质作用的影响很小, 因而具有较好的物源指示意义 (Bhatia and Crook, 1986). 从阿帕达尔坎组砂岩稀土元素配分模式图可以看出, 所有样品的曲线变化完全一致, 表明其漫长沉积过程中物源相同. 随着成岩作用的演化 Zr、La、Hf 和稀土元素在长英质岩石中富集, Cr、Ni 等高温元素在镁铁质岩石中富集, 因此长英质岩石与镁铁质岩石中的 Cr/Th、Th/Sc、La/Sc 具有明显差异; 阿帕达尔坎组砂岩 Cr/Th 介于 4~15, Th/Sc 介于 0.93~1.56, La/Sc 介于 2.47~4.54, 均在长英质

火成岩源岩范围内.而且阿帕达尔坎组砂岩具有明显 Eu 负异常, δEu 介于 0.61~0.71, 均指示其来源于长英质岩石. Floyd and Leveridge (1987) 根据微量元素 La/Th 比值和 Hf 的含量来确定砂岩物源特征, 在 La/Th-Hf 图解 (图 10c) 中, 阿帕达尔坎组砂岩大部分落在长英质物源区, 有两个点落入长英质/基性岩物源区, 有一个点落入古老沉积物物源区; REE-La/Yb 图解 (图 10b) 中样品均落入花岗岩-钙质泥岩-碱性玄武岩的交汇区域, 属于靠近陆壳一侧; 在 TiO_2 -Ni 源岩属性判别图解 (图 10d) 中, 也落入酸性火山岩物源区. 综上所述, 阿帕达尔坎组砂岩物源主要来自上地壳长英质源区和古老沉积岩源区.

不同类型的母岩所含矿物组分不同, 经剥蚀风化后所产生的重矿物组合也不相同, 重矿物因其耐磨蚀并具有较高的稳定性, 能够较多地保留母岩的特征, 因此重矿物的组合特征能有效地反映出母岩类型 (闫臻等, 2008; 李双应等, 2014). 阿帕达尔坎组碎屑砂岩重矿物统计结果显示, 研究区样品大部分为锆石-磷灰石-电气石-长英质轻矿物组合, 指示源区以长英质火成岩为主; 部分样品含有赤褐铁矿和黄铁矿, 应为沉积岩再旋回物源; 另也有部分样品中含有辉石-角闪石等不稳定组合, 且其矿物晶体多呈次棱角状, 反映其搬运距离较短, 为近源沉积. Morton and Hallsworth (1994) 提出应用重矿物特征指数来判别物源区, 其中, ZTR 指数是稳定矿物锆石、电气石和金红石在透明重矿物中所占的比例, 代表重矿物的成熟度; ATi 指数用于判断物源为火山岩的样品数量和风化程度; GZi 指数用来分析是否存在角闪岩或麻粒岩物源; RuZi 指数反映来自基性岩物质; MZi 指数可以用来探讨物源具有深成岩的比例. 阿帕达尔坎组 ZTR 指数变化范围大, 介于 20~60, 平均值为 38.39, 且锆石多呈次棱角状、柱状, 表明其物源供给区距离不远; ATi 指数介于 20~47.2, 平均值为 37.30, 表明其物源区有火山岩的发育; RuZi 指数介于 9.38~31.42, 指示源区基性岩向其提供了一定沉积物质; MZi 与 GZi 指数很低, 表明源区变质岩与中、酸性深成侵入岩较少.

根据阿帕达尔坎组碎屑锆石 U-Pb 年龄分析结果, 由老到新可识别出 2 300~3 660 Ma、1 782~2 094 Ma、1 190~1 476 Ma、669~959 Ma、397~486 Ma 五期年龄, 指示 5 期主要的构造-岩浆热事件 (图 11).

397~486 Ma 是阿帕达尔坎组砂岩碎屑锆石主

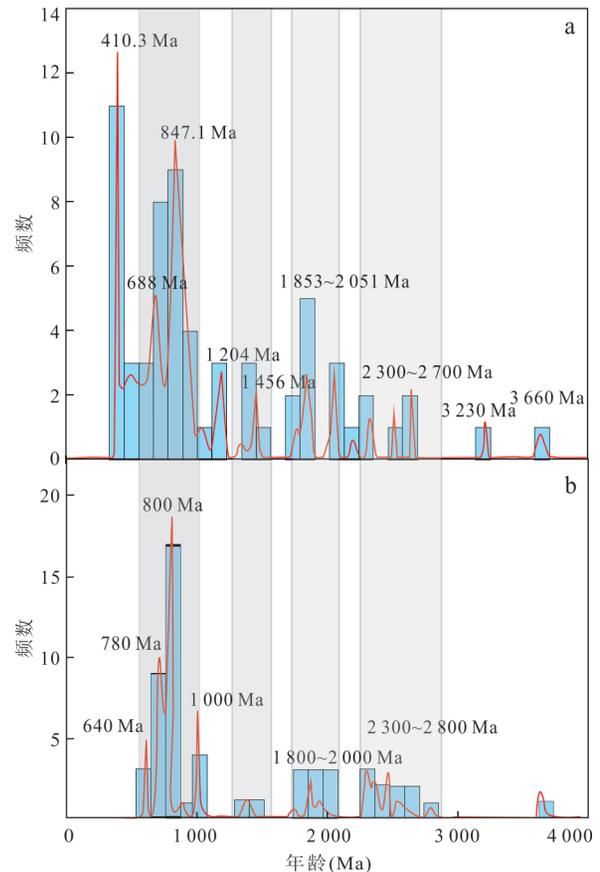


图 11 阿帕达尔坎组砂岩碎屑锆石年龄频谱图 (据 Zhang *et al.*, 2013)

Fig.11 Detrital zircon age frequency histogram of lithic sandstone from Apadalkan Formation (Zhang *et al.*, 2013)

要峰期年龄, 同期的岩浆活动在中天山南缘、南天山以及塔里木板块北缘均有发育, 如中天山南缘比开地区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 479 Ma (龙灵利等, 2007); 巴音布鲁克西南艾尔宾山花岗闪长岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 446 Ma (徐学义等, 2006); 塔里木北缘喀拉吾勒细粒闪长岩以及欧西达坂花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 413.2 Ma 与 407.3 Ma (贾晓亮等, 2017); 塔里木北缘色日牙克依拉克花岗闪长岩 SHRIMP 年龄为 418 Ma (朱志新等, 2008). 对比分析中天山地块、南天山与塔里木同位素年代学资料发现, 中天山南缘地区早古生代岩浆活动持续长, 并未见长时间明显的构造-岩浆活动间歇期, 主要发育在 490~436 Ma、419~393 Ma 两个时间段 (王超等, 2009; 张斌等, 2014); 南天山早古生代岩浆活动年龄主要集中在 420~450 Ma; 塔里木北缘出露的早古生代岩浆岩年龄主要集中在 426.3~404.8 Ma (徐学义等, 2006; 王超等, 2009;

郭瑞清等,2013;黄河,2013;张斌等,2014;贾晓亮等,2017)。然而,阿帕达尔坎组碎屑砂岩中早古生代年龄峰值为410.3 Ma,如果其来自于北部中天山南缘,应该有大量490~436 Ma锆石年龄,可见其并非来自于中天山南缘。南天山洋在早古生代并未闭合,南天山内部同期岩浆岩能否提供物源还值得商榷。塔里木北缘岩浆岩年龄主要集中在426.3~404.8 Ma,与阿帕达尔坎组碎屑砂岩中早古生代年龄峰值(410.3 Ma)基本一致,指示下泥盆统阿帕达尔坎组早古生代物源应来自于塔里木北缘。1782~2094 Ma、1190~1476 Ma、669~959 Ma等前寒武纪年龄在中天山地块与塔里木板块均有发现(舒良树等,2019),其中1782~2094 Ma代表了哥伦比亚超大陆聚合过程岩浆事件;1190~1476 Ma是哥伦比亚超大陆裂解的岩浆活动时间;669~959 Ma则主要反映Rodinia超大陆聚合、裂解,也可能反映了泛非造山所造成的弧后拉张(邬光辉等,2009;何景文等,2015)。测试样品中有7颗锆石的年龄介于2300~3230 Ma,对应于古元古代-太古代,与新疆地区的大陆基底年龄进行对比,塔里木古大陆为太古宙-古元古代基底区(3200~2200 Ma),昆仑-阿尔金造山带为古元古代基底区(2000~1800 Ma),中天山为古中元古代基底区(2100~1700 Ma)(胡霁琴等,2001)。由此可见,阿帕达尔坎组古元古代-太古代年龄锆石应来源于塔里木板块。

综上所述,阿帕达尔坎组砂岩地球化学特征以及重矿物特征均指示物源主要来自长英质火成岩与再循环古老沉积物组分,结合碎屑锆石年代学证据,认为阿帕达尔坎组砂岩物源主要来源于塔里木北缘早古生代岩浆岩带与克拉通基底沉积物。

4.3 沉积构造背景分析

目前,利用碎屑岩主量、微量元素判别沉积岩构造背景得到广泛应用,然而由于砂岩在成岩过程中存在一些化学成分迁移或溶解交代,地球化学数据在沉积学的研究中存在多解性,所以在应用地球化学特征判别沉积形成的构造环境时,必须结合沉积建造组合特征以及源区岩浆岩形成环境进行综合分析。

前人对已知构造环境的古生代杂砂岩和现代砂岩进行了主量元素的地球化学研究,建立了不同构造环境下的主量元素特征(附表2),提出了 $TiO_2-TFe_2O_3+MgO$ 、 $Al_2O_3/SiO_2-TFe_2O_3+MgO$ 、 $K_2O/Na_2O-TFe_2O_3+MgO$ 、 K_2O/Na_2O-SiO_2 等砂岩构造

环境主量元素判别图解,广泛应用于碎屑岩沉积构造环境分析研究中,取得大量成果(Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1988; 李双应等, 2014; 李晨等, 2021)。对比不同构造环境下沉积砂岩的主量元素特征(附表2),阿帕达尔坎组砂岩的 TFe_2O_3+MgO 平均值为5.75(3.94~8.35), Al_2O_3/SiO_2 平均值为0.14(0.10~0.20),均介于主动大陆边缘与被动大陆边缘平均值之间。 K_2O/Na_2O 平均值为0.92,接近于活动大陆边缘平均值。在 $TiO_2-TFe_2O_3+MgO$ 、 $Al_2O_3/SiO_2-TFe_2O_3+MgO$ 、 $K_2O/Na_2O-TFe_2O_3+MgO$ 、 K_2O/Na_2O-SiO_2 判别图解(图12)中,阿帕达尔坎组砂岩均集中于活动大陆边缘区域。

La、Ce、Nd、Y、Th、Zr、Hf、Nb、Ti和Sc等微量元素化学性质稳定,能够很好地反映物源区经搬运、沉积、成岩过程中的陆源组分,用于确定源区和构造位置。Bhatia and Crook(1986)通过对澳大利亚东部研究程度较高的古生代杂砂岩带的微量元素地球化学研究,建立了不同源区构造背景下砂岩的稀土元素特征判别标志(表1),阿帕达尔坎组砂岩La平均值为 31.0×10^{-6} 、Ce平均值为 55.3×10^{-6} 、 ΣREE 平均值为 147.8×10^{-6} 、La/Yb平均值为13.7、LREE/HREE平均值为8.3,均指示靠近大陆岛弧一侧。 $(La/Yb)_N$ 平均值为9.2, Eu/Eu⁺平均值为0.64,指示其介于大陆岛弧与安第斯型活动大陆边缘环境。

在微量元素判别图中,阿帕达尔坎组砂岩多集中落在活动大陆边缘-大陆岛弧区内,其中在Ti/Zr-La/Sc图解(图13)中,阿帕达尔坎组岩屑砂岩集中于活动大陆边缘区域;在Zr-Th、La-Sc-Th、Th-Sc-Zr/10、Th-Co-Zr/10图解中(图11),阿帕达尔坎组砂岩均集中于大陆岛弧区域。

综合阿帕达尔坎组砂岩地球化学分析结果,认为其形成的构造环境应为活动大陆边缘环境。区域上,早泥盆世早期为一套相对稳定的陆缘碎屑岩组成,早泥盆世晚期一直到中泥盆世区内发育大量中-酸性火山岩(安山岩、石英斑岩等)和玄武岩等火山熔岩夹火山碎屑岩、硅质岩,表明区内早泥盆世晚期-中泥盆世有较强的岩浆活动,阿帕达尔坎组应为活动大陆边缘环境沉积。结合前文物源分析,阿帕达尔坎组砂岩物源区很可能是塔里木北缘长英质火成岩与再循环古老沉积物组分,阿帕达尔坎组为塔里木早古生代北部大陆边缘体系沉积。塔里木北缘沿老虎台,经黑英山、密勒洞、野云沟至库尔

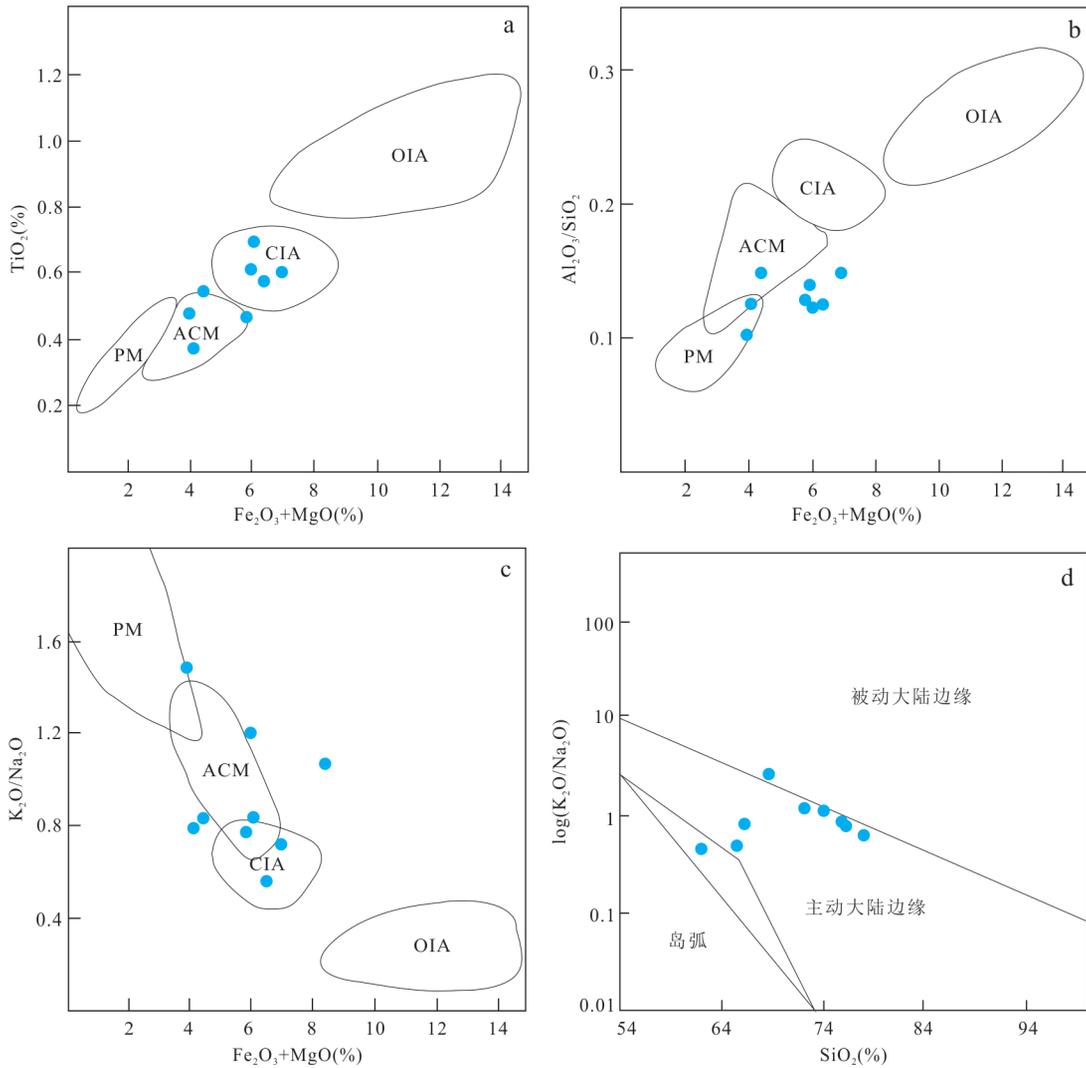


图 12 阿帕达尔坎组砂岩主量元素构造环境判别

Fig.12 The major element discrimination diagrams of tectonic settings for lithic sandstone from Apadalkan Formation a、b、c. 据 Bhatia,1983;d. 据 Roser and Korsch,1986. PM. 被动大陆边缘;ACM. 活动大陆边缘;CIA. 大陆岛弧;OIA. 大洋岛弧

表 1 不同构造背景砂岩稀土元素(10⁻⁶)特征比较

Table 1 REE (10⁻⁶) characteristics of sandstone from different tectonic environments

构造背景	La	Ce	ΣREE	La/Yb	(La/Yb) _N	LREE/HREE	Eu/Eu*
大洋岛弧(Ma)	8.0±1.7	19.0±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	8.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧(Ma)	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
安第斯型活动大陆边缘	37.0	78.0	185	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	39.0	85.0	210	15.9	10.8	8.5	0.56
阿帕达尔坎组	31.0	55.3	147.8	13.7	9.2	8.3	0.64

注:大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘数据据 Bhatia and Crook(1986).

勒一带发育一套闪长岩-石英闪长岩-花岗岩的侵入岩组合,这些侵入岩形成时间集中在 426.3~386.0 Ma,与阿帕达尔坎组碎屑锆石古生代峰值年龄相吻合,且均为钙碱性系列岩石,均具有高场强元素亏损、大离子亲石元素富集的地球化学特征.

与安第斯型活动大陆边缘火成岩的岩石学和地球化学特征有很大的相似性(姜常义等,2001;朱志新等,2008;王超等,2009;郭瑞清等,2013;黄河,2013;张斌等,2014),这一系列近东西向展布的侵入岩组合表明塔里木北缘在志留纪-早泥盆世处于

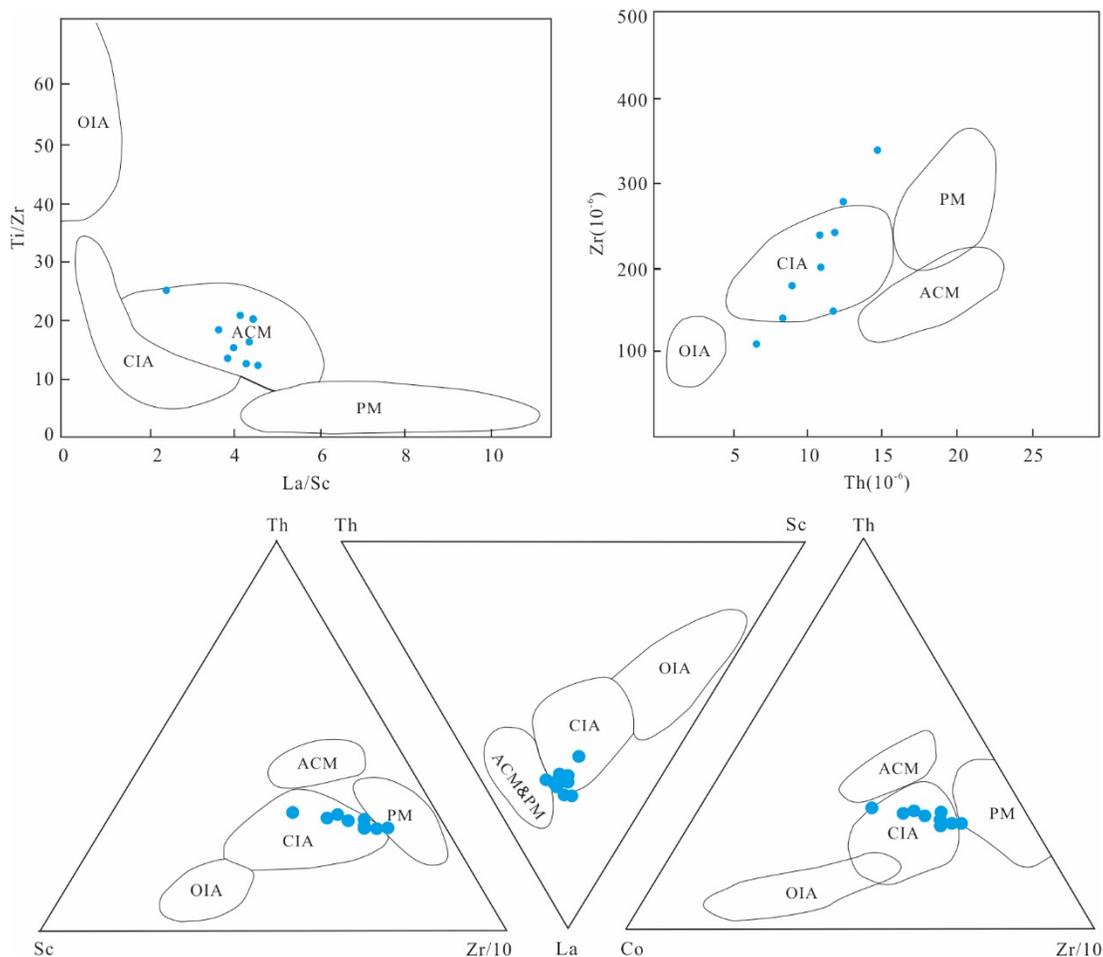


图 13 阿帕达尔坎组砂岩微量元素构造环境判别

Fig.13 The trace element discrimination diagrams of tectonic settings for lithic sandstone from Apadalkan Formation 据 Bhatia and Crook(1986). PM. 被动大陆边缘; ACM. 活动大陆边缘; CIA. 大陆岛弧; OIA. 大洋岛弧

安第斯型活动大陆边缘构造环境,进一步表明阿帕达尔坎组砂岩沉积于安第斯型活动大陆边缘构造环境。

5 结论

(1)阿帕达尔坎组砂岩化学蚀变指数 CIA 值介于 52.0~72.5,平均值为 63.1,低于页岩平均值(70~77),反映了中等偏弱的风化作用。成分变异指数 ICV 值介于 1.01~1.45, Th/Sc-Zr/Sc 图解均反映其经历了弱的分选再旋回过程。

(2)阿帕达尔坎组砂岩地球化学、重矿物特征,以及主量元素、微量元素判别图解显示阿帕达尔坎组砂岩源岩为长英质火成岩与再旋回沉积岩。碎屑锆石年龄主要集中在 2 300~3 660 Ma、1 782~2 094 Ma、1 190~1 476 Ma、669~959 Ma、407~486 Ma,显示了与塔里木克拉通的亲缘性,其中碎屑锆石主峰期的峰值年龄为 410.28 Ma,与

塔里木北缘早古生代中酸性岩浆岩年龄相吻合,表明阿帕达尔坎组砂岩沉积物源来自于塔里木北缘早古生代中酸性侵入岩与克拉通再旋回沉积物。

(3)区域上阿帕达尔坎组发育中基性火山岩与火山碎屑岩组合,表明其形成于岩浆活动相对强烈的构造环境。砂岩的主量元素、微量元素特征及相关地球化学图解指示阿帕达尔坎组砂岩沉积构造背景为活动大陆边缘环境。

附表见 <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.039>。

References

Alexeiev, D. V., Kröner, A., Hegner, E., et al., 2016. Middle to Late Ordovician Arc System in the Kyrgyz Middle Tianshan: From Arc-Continent Collision to Subsequent Evolution of a Palaeozoic Continental Margin. *Gondwana Research*, 39: 261–291. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.02.003>

Bhatia, M. R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Com-

- position of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Dong, Y. P., Zhou, D. W., Zhang, G. W., et al., 2005. Tectonic Setting of the Wuwamen Ophiolite at the Southern Margin of Middle Tianshan Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 37–44 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Gao, J., Qian, Q., Long, L. L., et al., 2009. Accretionary Orogenic Process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804–1816 (in Chinese with English abstract).
- Girty, G. H., Ridge, D. L., Knaack, C., et al., 1996. Provenance and Depositional Setting of Paleozoic Chert and Argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107–118.
- Guo, R. Q., Nijiat, A., Qin, Q., et al., 2013. Geological Characteristics and Tectonic Significance of Silurian Granitic Intrusions in the Northern Tarim Craton, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(S1): 220–238 (in Chinese with English abstract).
- He, J. W., Zhu, W. B., Zheng, B. H., et al., 2015. Provenance of Sinian Sugetbrak Sedimentary Rocks in the Aksu Area, NW Tarim: Evidence from Detrital Zircon Geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 149–162 (in Chinese with English abstract).
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 58: 820–829. <https://doi.org/10.1306/212f8e77-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Hu, A. Q., Zhang, G. X., Chen, Y. B., et al., 2001. A Model of Division of the Continental Crust Basement and the Time Scales of the Major Geological Events in the Xinjiang—Based on Studies of Isotopic Geochronology and Geochemistry. *Xinjiang Geology*, 19(1): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., 2013. Paleozoic Granitoids in the Chinese South Tianshan and Its Implications for Geological Evolution of the Region (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Jia, X. L., Zhai, M. G., Guo, R. Q., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry Characteristics of the Devonian Calcium-Alkaline Intrusive Rocks in Southern Tianshan and Their Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3057–3075 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. Y., Mu, Y. M., Zhao, X. N., et al., 2001. Petrology and Geochemistry of an Active Continental-Margin Intrusive Rock Belt on the Northern Margin of the Tarim Plate. *Regional Geology of China*, 20(2): 158–163 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Chen, S. Y., Lou, D., et al., 2021. Geochemical Characteristics and Signatures of Mesozoic Sandstones from Huanghua Depression. *Earth Science*, 46(8): 2903–2918 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Wang, K. Z., Li, Y. P., et al., 2006. Geomorphological Features, Crustal Composition and Geological Evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895–909 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Y., Yang, D. D., Wang, S., et al., 2014. Characteristics of Petrology, Geochemistry, Heavy Minerals and Isotope Chronology of Upper Carboniferous Detrital Rocks in the Middle Segment of South Tianshan and Constraints to the Provenance and Tectonic Evolution. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 167–184 (in Chinese with English abstract).
- Long, L. L., Gao, J., Xiong, X. M., et al., 2007. Geochemistry and Geochronology of Granitoids in Bikai Region, Southern Central-Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 719–732 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniell, D.K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A., eds., Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. *Geological Society of America Special Papers*, 284: 21–40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>
- Morton, A. C., Hallsworth, C., 1994. Identifying Provenance-Specific Features of Detrital Heavy Mineral Assemblages in Sandstones. *Sedimentary Geology*,

- 90(3/4): 241—256. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90041-8)
- 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. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635—650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Roser, B. P., Korsch, J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67: 119—139.
- Shu, L. S., Deng, X. L., Ma, X. X., et al., 2019. Tectonic Affinity between Central Tianshan Basement and Tarim Block Craton. *Earth Science*, 44(5): 1584—1601 (in Chinese with English abstract).
- Su, Z. G., Pei, X. Z., Li, R. B., et al., 2019. Detrital Zircon U-Pb Ages and Geological Significance of Metasedimentary Rocks from Guanjiagou Formation in Huoshenmiao Area, Mianlue Tectonic Belt of South Qinling. *Earth Science*, 44(4): 1424—1438 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Luo, J. H., Che, Z. C., et al., 2009. Geochemical Characteristics and U-Pb LA-ICP-MS Zircon Dating of the Oxidaban Pluton from Xinjiang, China: Implications for a Paleozoic Oceanic Subduction Process in Southwestern Tianshan. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 272—283 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Zhang, X. Q., Wei, W. T., et al., 2020. Paleontology, Geochemistry and Provenance of Sedimentary Rocks from the Triassic Langjiexue Group in the Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet and Their Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1208—1226 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Zhang, B. S., Guo, C. L., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Dating for the Silurian in Northern Tarim Basin and Its Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 418—426 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Huang, B. C., Han, C. M., et al., 2010. A Review of the Western Part of the Altaids: A Key to Understanding the Architecture of Accretionary Orogens. *Gondwana Research*, 18(2—3): 253—273. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.01.007>.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Allen, M. B., et al., 2013. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316—1341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.012>
- Xu, X. Y., Ma, Z. P., Xia, Z. C., et al., 2006. TIMS U-Pb Isotopic Dating and Geochemical Characteristics of Paleozoic Granitic Rocks from the Middle-Western Section of Tianshan. *Northwestern Geology*, 39(1): 50—75 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Bian, Q. T., Korchagin, O., et al., 2008. Provenance of Early Triassic Hongshuichuan Formation in the Southern Margin of the East Kunlun Mountains: Constraints from Detrital Framework, Heavy Mineral Analysis and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1068—1078 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Wang, Z. Q., Yan, Q. R., et al., 2018. Identification and Reconstruction of Tectonic Arche Type of the Sedimentary Basin within the Orogenic Belt Developed along Convergent Margin. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1943—1958 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Chen, W., Yu, S., et al., 2014. Subduction Process of South Tianshan Ocean during Paleozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2351—2362 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Zou, H. B., Li, H. K., et al., 2013. Tectonic Framework and Evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1306—1315. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.009>
- Zhong, L. L., 2019. Paleozoic Accretionary Orogeny and Crustal Evolution of the Western Segment of Chinese Central Tianshan (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. X., Li, J. Y., Dong, L. H., et al., 2008. Age Determination and Geological Significance of Devonian Granitic Intrusions in Seriyakeyilake Region, Northern Margin of Tarim Basin, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 971—976 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等, 2005. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境. *岩石学报*, 21(1): 37—44.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等, 2009. 西天山的增生造山过程. *地质通报*, 28(12): 1804—1816.
- 郭瑞清, 尼加提·阿布都逊, 秦切, 等, 2013. 新疆塔里木北缘志留纪花岗岩类侵入岩的地质特征及构造意义. *地质通报*, 32(S1): 220—238.
- 何景文, 朱文斌, 郑碧海, 等, 2015. 塔里木西北缘阿克苏地区震旦系苏盖特布拉克组沉积物源分析: 碎屑锆石年代学证据. *地质学报*, 89(1): 149—162.
- 胡霁琴, 张国新, 陈义兵, 等, 2001. 新疆大陆基底分区模式

- 和主要地质事件的划分. 新疆地质, 19(1): 12—19.
- 黄河, 2013. 中国南天山地区古生代花岗岩与区域地质演化 (博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 贾晓亮, 翟明国, 郭瑞清, 等, 2017. 新疆南天山泥盆纪钙碱性侵入岩的形成时代、地球化学特征及构造意义. 岩石学报, 33(10): 3057—3075.
- 姜常义, 穆艳梅, 赵晓宁, 等, 2001. 塔里木板块北缘活动陆缘型侵入岩带的岩石学与地球化学. 中国区域地质, 20(2): 158—163.
- 李晨, 陈世悦, 楼达, 等, 2021. 黄骅拗陷中生界砂岩地球化学特征及意义. 地球科学, 46(8): 2903—2918.
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等, 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. 地质通报, 25(8): 895—909.
- 李双应, 杨栋栋, 王松, 等, 2014. 南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束. 地质学报, 88(2): 167—184.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等, 2007. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究. 岩石学报, 23(4): 719—732.
- 舒良树, 邓兴梁, 马绪宣, 2019. 中天山基底与塔里木克拉通的构造亲缘性. 地球科学, 44(5): 1584—1601.
- 苏联国, 裴先治, 李瑞保, 等, 2019. 南秦岭勉略构造带火神庙地区关家沟组变质沉积岩系碎屑锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 地球科学, 44(4): 1424—1442.
- 王超, 罗金海, 车自成, 等, 2009. 新疆欧西达坂花岗质岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS 定年: 西南天山古生代洋盆俯冲作用过程的启示. 地质学报, 83(2): 272—283.
- 王金贵, 张鑫全, 魏文通, 等, 2020. 西藏雅鲁藏布缝合带三叠系朗杰学群沉积岩古生物、地球化学特征及其物源区和构造背景分析. 地质学报, 94(4): 1208—1226.
- 邹光辉, 张宝收, 郭春利, 等, 2009. 塔里木盆地北部志留系碎屑锆石测年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 33(3): 418—426.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 等, 2006. 天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究. 西北地质, 39(1): 50—75.
- 闫臻, 边千韬, Korchagin, O.A., 等, 2008. 东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区特征: 来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据. 岩石学报, 24(5): 1068—1078.
- 闫臻, 王宗起, 闫全人, 等, 2008. 造山带汇聚板块边缘沉积盆地的鉴别与恢复. 岩石学报, 34(7): 1943—1958.
- 张斌, 陈文, 喻顺, 等, 2014. 南天山洋古生代期间俯冲作用过程探讨. 岩石学报, 30(8): 2351—2362.
- 钟凌林, 2019. 中天山西段古生代增生造山作用与地壳演化 (博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等, 2008. 新疆塔里木北缘色日牙克依拉克一带泥盆纪花岗质侵入体的确定及其地质意义. 岩石学报, 24(5): 971—976.