

西昆仑甜水海地块巴颜喀拉山群地球化学特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学特征：对物源及构造环境的启示

董 瑞^{1,2}, 王 核^{1*}, 闫庆贺^{1,2}, 张晓宇^{1,2},
魏小鹏^{1,2}, 李 沛^{1,2}, 周楷麟^{1,2}

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 松潘-甘孜-巴颜喀拉沉积盆地位于青藏高原东北部, 主体地层为三叠系巴颜喀拉山群, 其形成与特提斯演化密切相关。前人对盆地中东部进行了大量研究工作, 但对盆地西部的研究较为薄弱。西昆仑甜水海地块位于松潘-甘孜-巴颜喀拉沉积盆地西部, 区内广泛出露三叠系巴颜喀拉山群, 是区域地层系统的重要组成部分。本文选取甜水海地块阿克萨依地区的该套地层进行全岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学研究, 限定其形成时代及物质来源, 探讨沉积构造背景。该区巴颜喀拉山群浅变质碎屑沉积岩最年轻碎屑锆石年龄峰与侵入其中的岩体限定了该区巴颜喀拉山群沉积时代为 209~246 Ma。成分变异指数(ICV)与化学蚀变指数(CIA)的研究表明原岩成熟度中等, 化学风化作用较弱。微量、稀土元素含量及比值(如, La、Ce、Th、U、Hf、 Σ REE 及 La_N/Yb_N)与大陆岛弧碎屑沉积物特征值较为接近, 结合构造判别图解, 我们认为该套浅变质碎屑岩可能沉积于大陆岛弧相关的盆地中, 这与松潘-甘孜-巴颜喀拉沉积盆地东部的大地构造环境相似, 支持其为盆地西延的观点。岩相学、地球化学、锆石形态及年龄特征分析表明, 研究区巴颜喀拉山群主要接受西昆仑造山带内的近源碎屑沉积, 少量前寒武纪碎屑可能来自冈瓦那大陆北缘。

关键词: 西昆仑造山带; 巴颜喀拉山群; 地球化学; 碎屑锆石 U-Pb 年龄; 物源; 构造环境

中图分类号: P597; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2019)06-1236-022

0 引 言

松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪沉积盆地, 位于青藏高原北东部, 构造上处于木孜塔格-昆仑-阿尼玛卿断裂带, 西金乌兰-玉树-金沙江断裂带及龙门山推覆构造围限的巨型倒三角形区域, 面积约 70 万平方千米, 盆地中的沉积物主要是三叠系巴颜喀拉山群浊积岩系(Gu, 1994; Enkelmann et al., 2007; Ding et al., 2013)。松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪沉积盆地

是古特提斯的主体范畴(孙鸿烈, 1996), 因此, 该盆地的性质、形成和演化对于探讨古特提斯的形成和构造古地理演化具有重要的科学意义, 其构造属性一直是地学界关注的重大问题: Zhou and Graham (1996)认为在华北-华南板块碰撞期间, 松潘-甘孜复理石沉积在残余海盆中, Sengor (1985)和 Gu (1994)视其为古特提斯弧后盆地; 而任纪舜和肖黎薇(2004)认为巴颜喀拉沉积盆地并不是奠基在特提斯洋壳之上, 而是奠基在劳亚南缘大陆壳之上的浊积岩盆地;

收稿日期: 2018-01-26; 改回日期: 2019-03-01

项目资助: “十二五”国家科技支撑计划项目“新疆南部三地州优势矿产预测评价关键技术研究”(2015BAB05B00)资助。

第一作者简介: 董瑞(1993-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。Email: 229239053@qq.com

通信作者: 王核(1966-), 男, 研究员, 主要从事成矿预测方面研究。Email: wanghe@gig.ac.cn

还有部分学者认为其是东昆仑-西秦岭的前陆盆地(许志琴等, 1990; 王宗起等, 2003)。关于巴颜喀拉盆地的物源, 大多数学者认为来源于昆仑、秦岭、祁连等多地块(任纪舜和肖黎薇, 2004; 朱迎堂, 2006; Enkelmann et al., 2007)。但上述研究主要集中在松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪盆地中东部, 在盆地西部, 尤其是西昆仑造山带甜水海地块, 虽然前人通过区域地层对比划分出了大面积的三叠系巴颜喀拉山群地层(陕西省地质调查院, 2006), 但对该区域这套地层的具体研究相对较少。这套地层研究对于理解松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪盆地东西部演化差异, 盆地西部物源及西昆仑中生代构造历史等方面的具有重要意义。

碎屑沉积岩的化学组成受源区特征、风化作用、搬运沉积及成岩作用的共同制约, 包含了源区物质组成, 构造环境及地质演化的重要信息, 其地球化学特征已被广泛的应用于分析物源, 揭示古风化条件及沉积构造环境等研究(Nesbit and Young, 1982; Roser et al., 2002; Hofmann, 2005)。锆石稳定的物理化学性质使得地层中碎屑锆石年代学成为研究地层形成时限及物源区构造演化的重要手段, 同时还可以对区域岩石-构造单元进行对比研究及古地理格局恢复(Berry et al., 2001; Fedo et al., 2003; Andersen,

2005; Kalsbeek et al., 2008)。本文通过对甜水海地块阿克苏依矿区巴颜喀拉山群地球化学及碎屑锆石的研究, 限定其形成时代和物质来源, 探讨其形成环境和构造演化, 对全面认识松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪盆地性质及其与昆仑造山带的区域关系提供一些线索。

1 地质背景及样品特征

1.1 区域地质背景

西昆仑造山带位于印度板块与欧亚板块结合处, 是横贯中国的秦祁昆中央造山系的重要组成部分, 西邻青藏高原, 北靠塔里木盆地, 南连喀喇昆仑山, 东被阿尔金断裂所切, 总体上呈 NW-SE 走向的巨型反 S 状展布。地质构造单元自北向南依次为: 北昆仑地块、奥依塔格-库地缝合带、南昆仑地块、麻扎-康西瓦缝合带、甜水海地块、班公湖-怒江缝合带、喀喇昆仑地块(图 1a)。

甜水海地块位于西昆仑造山带东南, 北以麻扎-康西瓦断裂为界, 南以班公湖-怒江缝合带为界, 总体上沿 NW-SE 向展布。区域上位于松潘-甘孜-巴颜喀拉三叠纪沉积盆地的西部(图 1a)。前人对于甜水海地块构造归属存在诸多争议, 有的学者认为

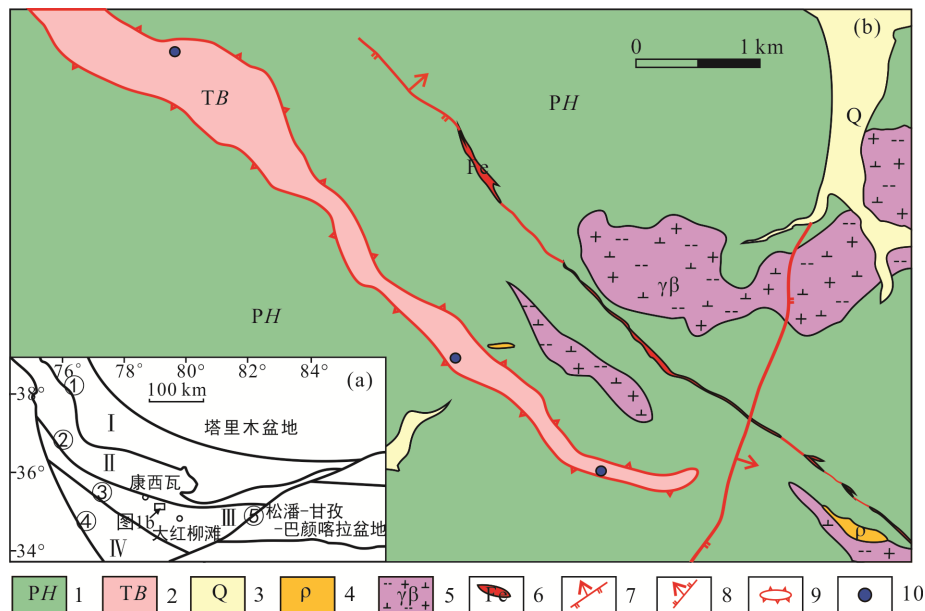


图 1a: ① 奥依塔格-库地缝合带; ② 麻扎-康西瓦缝合带; ③ 班公湖-怒江缝合带; ④ 喀喇昆仑断裂; ⑤ 阿尔金断裂。I. 北昆仑地块; II. 南昆仑地块; III. 甜水海地块; IV. 喀喇昆仑地块。图 1b: 1. 二叠系黄羊岭群; 2. 三叠系巴颜喀拉山群; 3. 第四系; 4. 三叠纪伟晶岩; 5. 新生代花岗岩; 6. 铁矿体; 7. 逆断层; 8. 正断层; 9. 构造窗; 10. 采样位置。

图 1 西昆仑造山带大地构造图(a, 据 Ding et al., 2013; 魏小鹏, 2018)和阿克苏依矿区地质简图(b)

Fig.1 Simplified tectonic geological map of the West Kunlun Orogenic Belt (a), and tectonic location of the Akesayi (b)

甜水海地块属于松潘-甘孜带的西延部分,在早中生代拼贴到西昆仑南部边缘(Xiao et al., 2005; Ding et al., 2013; Liu et al., 2015),还有部分学者认为该地块是南昆仑地块的一部分(Yuan et al., 2003; 张传林等, 2007)。甜水海地块南北两侧地层存在差异,北侧出露地层以二叠系黄羊岭群和三叠系巴颜喀拉山群等半深水-深水相复理石沉积为主,伴随着大量三叠纪侵入岩(Xiao et al., 2002, 2005)。二叠系黄羊岭群为一套浅变质深水相浊积岩夹少量滑塌堆积的碳酸盐岩块体,岩性主要为石英云母千枚岩、变质长石石英粉砂岩、变质细粒长石石英杂砂岩夹白云质大理岩;三叠系巴颜喀拉山群与二叠系黄羊岭群呈脆韧性断层接触,总体为一套较深水复理石建造,岩石组合主要为黑云母石英片岩、变细粒长石石英砂岩夹石英粉砂岩、板岩。南侧出露的地层主要为前寒武系(赛图拉群、甜水海群、布伦廓勒群)、下志留统温泉沟组以及中生代侏罗系、白垩系,侏罗纪-白垩纪花岗岩侵入活动较为普遍(魏小鹏, 2018)。赛图拉群主要为一套中深变质碎屑岩夹中基性火山岩,岩性为黑云母斜长片麻岩、二云母斜长片麻岩、黑云斜长石英片岩、黑云片岩等,时代为长城纪(汪玉珍和方锡廉, 1987)。甜水海群主要为一套滨海相-滨浅海相浅变质碎屑岩夹碳酸盐岩,形成时代为 593~532 Ma,岩石组合为硬绿泥千枚岩、片理化泥质板岩、绿泥钙质片岩夹片理化粉砂岩、大理岩、白云岩(Hu et al., 2016)。布伦廓勒群为一套角闪岩相区域变质岩,岩石组合为黑云石英片岩、石榴黑云石英片岩、角闪斜长变粒岩夹大理岩, Zhang et al. (2018)根据在帕米尔东北部布伦廓勒群获得碎屑锆石年龄(530~508 Ma),推测其沉积时代为中晚寒武世。下志留统温泉沟组为灰绿-浅灰色中厚层中粒长石石英砂岩夹粉砂及黑色薄层硅质岩,局部夹英安岩。侏罗系主要为一套紫红色泥岩、粉砂岩、砂岩夹黄褐色灰岩及灰白色白云岩的潮坪-泻湖沉积体系,而白垩系为一套紫红、砖红色的生物灰岩、生屑灰岩夹泥灰岩组合。

1.2 采样位置及样品特征

阿克萨依地区位于甜水海地块东北部,紧靠麻扎-康西瓦缝合带,构造岩浆活动频繁。区内大面积出露二叠系黄羊岭群(PH),而本次研究的巴颜喀拉山群(TB)呈带状出露于该区中部(图 1b),与下覆黄羊岭群呈断层接触。地质调查表明本区带状巴颜喀拉山群为西侧大面积出露的巴颜喀拉山群剥蚀的产

物,可代表甜水海地块的巴颜喀拉山群。由于靠近深大断裂,构造活动频繁,该区的巴颜喀拉山群热变质及动力变质较强,为一套低绿片岩相变质碎屑岩,岩性为变余长石石英砂岩、二云母石英片岩、黑云母石英片岩,但其原岩与盆地东部巴颜喀拉山群地层基本一致。

采样位置如图 1b 所示,样品主要岩性为二云母石英片岩、变质长石石英细砂岩和黑云母石英片岩,样品新鲜。其中二云母石英片岩为浅灰色,鳞片粒状变晶结构,片状构造(图 2a、b)。主要矿物为石英(60%),黑云母(15%),白云母(20%),以及少量绢云母(<5%)。黑云母石英片岩为灰色,鳞片粒状变晶结构,片状构造。岩石主要组成矿物为石英(70%),黑云母(25%)以及少量白云母(<5%),副矿物有锆石,磁铁矿等。石英呈变晶粒状,粒径 0.03~0.15 mm,波状消光明显;黑云母呈鳞片状,弱定向排列(图 2e、f)。变质长石石英细砂岩为灰绿色,变余细粒砂质结构,变余层状构造,其成分主要为石英(60%)、斜长石(20%),黑云母(15%)。石英、斜长石多为次棱角-次圆状,磨圆度低,分选一般,显示其结构和成分成熟度均较低(图 2c、d)。

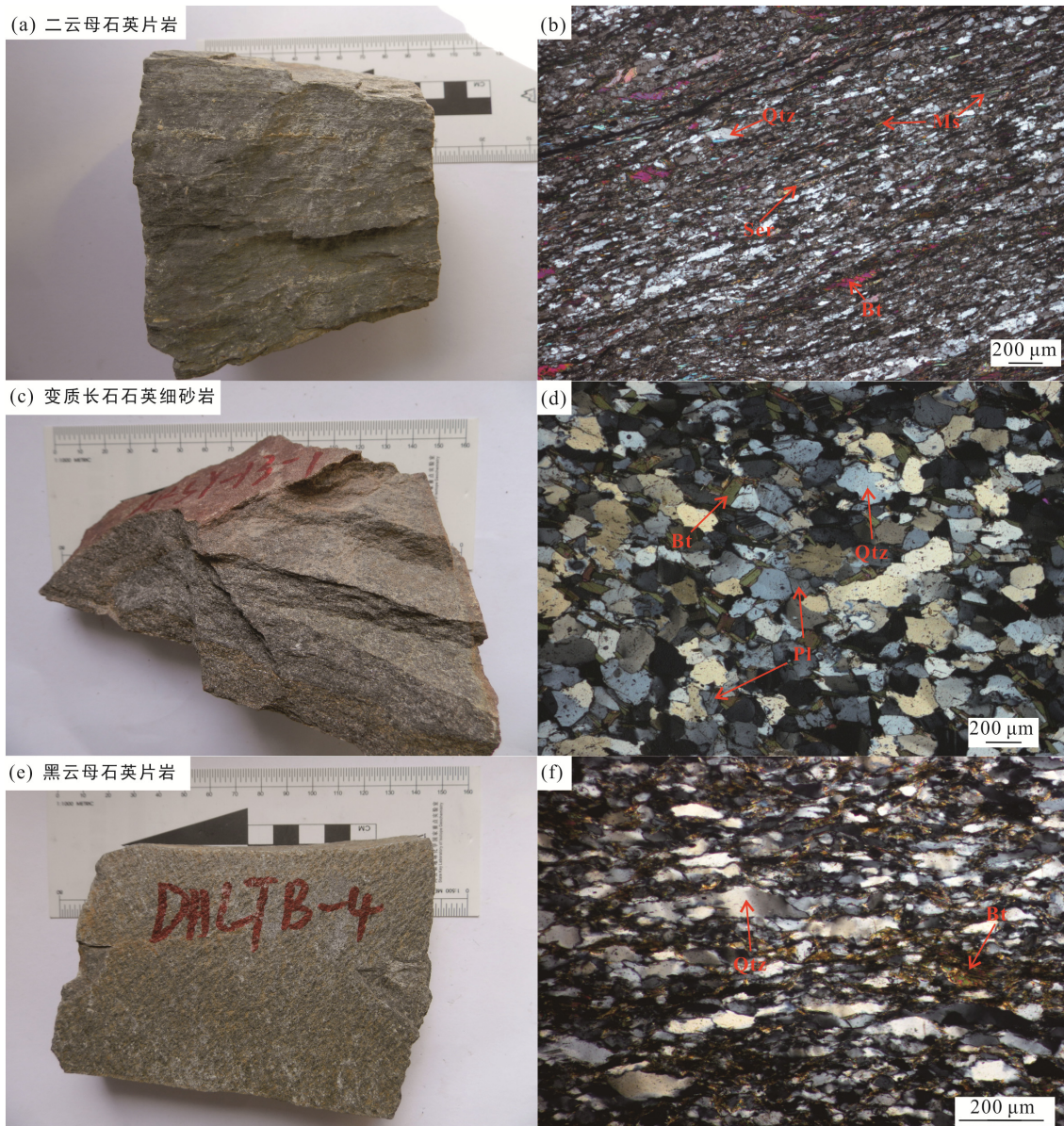
2 分析方法和样品处理

2.1 全岩地球化学分析

5 件二云母石英片岩、3 件变质长石石英细砂岩、7 件黑云母石英片岩的主微量及稀土元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室进行。样品经破碎后,岩屑用去离子水清洗后烘干,磨至 200 目,在 Rigaku RIX2000 型荧光光谱仪(XRF)上测定主量元素,分析精度优于 2%~5%。在 Per-Ekmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成微量元素测定,使用 USGS 标准 W-2 和 G-2 以及国家岩石标样 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测元素的含量,具体流程见刘颖等(1996),稀土元素的分析精度可达 3%,其余微量元素的分析精度可达 5%。

2.2 锆石 U-Pb 定年

野外采集新鲜的二云母石英片岩(AKSYS-8)、变质长石石英细砂岩(AKSYS-28)、黑云母石英片岩(DHLTBS-1),共约 10 kg,经过样品表面清洗、人工破碎成约 80 目,然后经过淘洗、重液分离和电磁分选等多种方法分离锆石。在双目镜下挑选出无裂隙、晶形完整、透明度好的锆石,粘于环氧树脂表面,



矿物代号: Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Ms. 白云母; Ser. 绢云母; Pl. 斜长石。

图 2 西昆仑阿克苏依矿区巴颜喀拉山群岩石手标本和显微镜下照片

Fig.2 Photos of hand specimens and microphotographs of rocks from the Bayankalashan Group from the Akesayi deposit in West Kunlun

固化后打磨抛光至露出一个光洁平面然后进行透反射光和阴极发光(CL)照像, 结合这些图像选择适宜的点位进行测试。锆石的原位 U-Pb 定年和微量元素分析在广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)完成。实验室采用的 ICP-MS 为 Resolution M50 Agilent 7500a, 激光剥蚀系统由 Resonetics 公司的 Resolution M50 ArF 准激光器(波长 193 nm)和光学系统组成, 激光剥蚀半径为 31 μm , 频率为 8 Hz。锆石年龄测定采用 Temora 锆石(Black et al., 2003)作为外标, 元素含量采用美国国家标样

技术研究院的人工合成硅酸盐标准参考物质 NISTSRM610 为外标, ^{29}Si 作为内标。具体实验分析方法详见涂湘林等(2011)。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu et al., 2008), 锆石年龄谐和图由 Isoplot3.0 程序完成(Ludwig, 2003)。

3 测试结果

3.1 地球化学特征

3.1.1 主量元素

巴颜喀拉山群三种类型岩石的主量元素含量见

表 1。二云母石英片岩 SiO_2 为 61.94%~64.79%, Al_2O_3 为 16.79%~18.14%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为 6.24%~6.87%, TiO_2 为 0.73%~0.79%, MgO 为 2.11%~2.29%, CaO 为 0.53%~0.74%, Na_2O 为 1.46%~1.86%, K_2O 为 3.48%~3.90%; 变质长石石英粉砂岩 SiO_2 为 74.40%~76.24%, Al_2O_3 为 10.76%~11.78%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为 4.56%~4.92%, TiO_2 为 0.40%~0.46%, MgO 为 1.20%~1.35%, CaO 为 1.61%~2.33%, Na_2O 为 2.46~2.88%, K_2O 为 1.71%~1.81%; 黑云母石英片岩 SiO_2 为 59.79%~72.95%, Al_2O_3 为 12.54%~19.01%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为 4.60%~7.52%, TiO_2 为 0.66%~0.79%, MgO 为 1.23%~2.87%, CaO 为 0.84%~2.59%, Na_2O 为 1.26%~2.86%, K_2O 为 2.09%~3.93%。二云母石英片岩与黑云母石英片岩具有相似的元素含量, 二者相比于后太古宙澳大利亚平均页岩 (PASS), 其 SiO_2 、 Na_2O 含量较高, TiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 K_2O 含量略低; 与上地壳(UCC)相比, Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 K_2O 含量较高, MgO 、 CaO 、 Na_2O 含量较低。变质长石石英细砂岩相比于 PASS, 具有较高的 SiO_2 、 CaO 、 Na_2O 及较低的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 、 K_2O ; 而与 UCC 相比, 其 SiO_2 较高, TiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 较低。二云母石英片岩与黑云母石英片岩的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值(均值分别为 3.59、4.18)与火成岩的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值(3~5) 较为相似, 暗示其成熟度较低(Rogers, 1996; Wang et al., 2015); 而变质长石石英细砂岩 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 6.61, 说明其成熟度较高。

3.1.2 稀土及微量元素

从样品微量元素分布来看(图 3a), 大部分样品 Sr、Co、Ni 呈现出一定程度的亏损, Rb、Pb、Sc、Ti、Zn 等略显富集, 其余元素含量相近。几乎所有

样品的 Sr 显示出亏损, 且与样品的 Ca 亏损具有一定的相关性, 指示其源区的斜长石在风化过程中已经遭到破坏。与两种片岩相比, 变质石英细砂岩的微量元素, 尤其是 Cr、Co、Ni、V、Ti 等亲铁元素含量较低, 表明有较少的铁镁物质参与。

巴颜喀拉山群三种类型岩石显示出相似的稀土元素配分型式(图 3b), 均呈现为轻稀土富集、重稀土相对平坦($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.14\sim 8.11$ 、 $8.54\sim 9.59$ 、 $5.89\sim 9.05$; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.53\sim 1.72$ 、 $1.45\sim 1.69$ 、 $1.13\sim 1.42$)以及中等负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.62\sim 0.73$ 、 $0.66\sim 0.77$ 、 $0.65\sim 0.71$), 与大陆上地壳的稀土元素配分型式极为相似。二云母石英片岩的 $\sum\text{REE}$ 为 148.51~167.33 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 156.69 $\mu\text{g/g}$, 黑云母石英片岩的 $\sum\text{REE}$ 为 106.85~138.57 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 124.02 $\mu\text{g/g}$, 而变质长石石英细砂岩的 $\sum\text{REE}$ 为 103.85~117.90 $\mu\text{g/g}$, 明显低于两者, 平均值为 109.57 $\mu\text{g/g}$ 。

3.2 测年结果

3.2.1 锆石特征

大部分锆石呈透明至半透明, 部分呈浅灰色, 粒径为 60~150 μm 。大部分锆石呈自形-半自形, 反映物源区较近, 碎屑短距离搬运的结果; 少数锆石磨圆度较高, 可能暗示了该类锆石及其源岩经历了长距离的搬运。CL 图像显示大多数锆石具有振荡生长环带(包括扇形环带)(图 4), 为岩浆成因; 少部分锆石具均质结构、弱分带结构、面状分带结构, 可能为变质成因。微量元素分析表明锆石的 Th、U 含量和 Th/U 值差异较大($\text{Th}=7.2\sim 1906.7$ $\mu\text{g/g}$, $\text{U}=50.5\sim 2683.8$ $\mu\text{g/g}$, $\text{Th}/\text{U}=0.01\sim 2.88$) (表 2), 表明碎屑物源复杂, 源区经历了复杂的地壳演化历史。

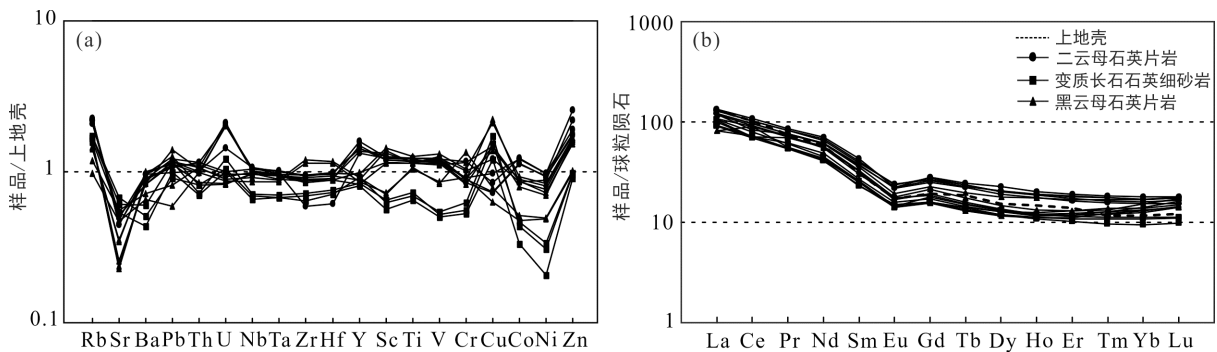


图 3 阿克萨依地区巴颜喀拉山群微量元素上地壳(UCC)标准化蛛网图(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b) (上地壳标准化值据 Rudnick and Gao, 2003; 球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 UCC (upper continent crust)-normalized trace element spider diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of rocks from the Bayankalashan Group in the Akesayi area



图 4 西昆仑阿克萨依矿区巴颜喀拉山群典型碎屑锆石 CL 图像及测点年龄

Fig.4 Representative CL images and U-Pb ages of detrital zircons from the Bayankalashan Group in the Akesayi Deposit, West Kunlun

3.2.2 锆石 U-Pb 年龄组成

为了能够达到统计学意义, 当年龄 < 1200 Ma 时, 选择 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表面年龄讨论, 当年龄 > 1200 Ma 时, 选择 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的表面年龄讨论 (Yang et al., 2012)。以谐和度 > 90% 为标准遴选 U-Pb 年龄数据。

二云母石英片岩 (AKSYS-8) 共有 71 粒有效锆石分析点。U-Pb 年龄分布范围广, 介于 223~2540 Ma 之间 (图 5a、b), 主要集中于 223~506 Ma, 占锆石总数的 77.46%, 主要的年龄峰值有 239 Ma、296 Ma、436 Ma、881 Ma、1548 Ma。最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 223±3 Ma, 时代为晚三叠世, 三颗最古老锆石 U-Pb 年龄为 2013±26 Ma、2363±23 Ma、2540±24 Ma。

变质长石石英细砂岩 (AKSYS-28) 共有 82 粒有效锆石分析点。U-Pb 年龄分布范围广, 介于 231~1735 Ma 之间 (图 5c、d), 主要集中于 231~606 Ma, 占锆石总数的 85.37%, 主要的年龄峰值有 247 Ma、288 Ma、441 Ma、606 Ma。最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 231±3 Ma, 时代为晚三叠世, 最古老锆石 U-Pb 年龄为 1735±25 Ma。

黑云母石英片岩 (DHLTBS-1) 共有 94 粒有效锆石分析点。U-Pb 年龄分布范围广, 介于 235~

2498 Ma 之间 (图 5e、f), 主要集中于 235~536 Ma, 占锆石总数的 89.36%, 主要的年龄峰值有 271 Ma、299 Ma、426 Ma、475 Ma、758 Ma。最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 235±3 Ma, 时代为晚三叠世, 最古老锆石 U-Pb 年龄为 2498±24 Ma。

4 讨论

4.1 阿克萨依地区巴颜喀拉山群沉积年龄限定

巴颜喀拉山群于 1961 年由北京地质学院创建, 广义上指分布于可可西里-巴颜喀拉山地区的一套厚度巨大的类复理石碎屑岩夹少量碳酸盐岩建造。1970 年青海区调队在《1:100 万玉树幅区域地质调查报告》中将其分为上、中、下三叠统。1984 年新疆地矿局第一区调大队十分队在进行 1:100 万区调工作时将其划为上三叠统克勒青河群。西藏区调队 (1986) 引用巴颜喀拉山群一名, 将其时代限定为晚三叠世。1997 年《西藏自治区岩石地层》将巴颜喀拉山群时代定为三叠纪。2002 年贵州省地质调查院在进行 1:25 万羊湖幅区调工作时在巴颜喀拉山群中采集到大量的牙形石及孢粉, 指示该套地层属三叠纪。

表 1 阿克萨依地区巴颜喀拉山群岩石样品主(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)分析数据
 Table 1 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) concentrations of rocks from the Bayankalashan Group in Akesayi area

样号	二云母石英片岩										变质长石石英细砂岩										黑云母石英片岩													
	AKSYS-8	AKSYS-9	AKSYS-10	AKSYS-11	AKSYS-12	AKSYS-29	AKSYS-30	AKSYS-31	DHLTBS-3	DHLTBS-4	DHLTBS-5	DHLTBS-6	DHLTBS-7	DHLTBS-8	PASS	UGG	AKSYS-2	AKSYS-3	AKSYS-4	AKSYS-5	AKSYS-6	AKSYS-7	AKSYS-8	DHLTBS-3	DHLTBS-4	DHLTBS-5	DHLTBS-6	DHLTBS-7	DHLTBS-8	PASS	UGG			
SiO ₂	63.85	61.94	63.7	64.79	61.97	74.42	74.4	76.24	65.28	65.09	59.98	72.95	71.91	63.03	62.8	66.6	65.28	65.09	59.98	59.79	72.95	71.91	63.03	62.8	66.6	65.28	65.09	59.98	59.79	72.95	71.91	63.03	62.8	66.6
TiO ₂	0.74	0.76	0.76	0.73	0.79	0.46	0.42	0.4	0.68	0.72	0.77	0.66	0.68	0.7	1	0.6	0.68	0.72	0.77	0.79	0.66	0.68	0.7	1	0.6	0.68	0.72	0.77	0.79	0.66	0.68	0.7	1	0.6
Al ₂ O ₃	17.07	18.6	17.6	16.79	18.14	11.78	11.56	10.76	16.24	16.52	19.01	12.78	12.54	17.72	18.9	15.4	16.24	16.52	19.01	19.2	12.78	12.54	17.72	18.9	15.4	16.24	16.52	19.01	19.2	12.78	12.54	17.72	18.9	15.4
Fe ₂ O ₃ ^T	6.6	6.71	6.29	6.24	6.87	4.82	4.92	4.56	6.08	6.35	7.4	4.6	4.61	6.76	7.22	5.04	6.08	6.35	7.4	7.52	4.6	4.61	6.76	7.22	5.04	6.08	6.35	7.4	7.52	4.6	4.61	6.76	7.22	5.04
MnO	0.17	0.14	0.09	0.16	0.17	0.17	0.19	0.18	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.09	0.1	0.1	0.1	0.18	0.1	0.1	0.1	0.11	0.09	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	0.09	0.1	0.1	0.1
MgO	2.26	2.29	2.11	2.12	2.27	1.3	1.35	1.2	2.49	2.58	2.81	1.23	1.37	2.61	2.2	2.48	2.49	2.58	2.81	2.87	1.23	1.37	2.61	2.2	2.48	2.49	2.58	2.81	2.87	1.23	1.37	2.61	2.2	2.48
CaO	0.58	0.57	0.74	0.57	0.53	1.78	2.33	1.61	1.37	1.4	0.81	1.47	1.74	0.84	1.3	3.59	1.37	1.4	0.81	0.88	1.47	1.74	0.84	1.3	3.59	1.37	1.4	0.81	0.88	1.47	1.74	0.84	1.3	3.59
Na ₂ O	1.71	1.7	1.46	1.86	1.56	2.88	2.46	2.6	1.91	2.04	1.29	2.86	2.77	1.26	1.2	3.27	1.91	2.04	1.29	1.36	2.86	2.77	1.26	1.2	3.27	1.91	2.04	1.29	1.36	2.86	2.77	1.26	1.2	3.27
K ₂ O	3.55	3.9	3.74	3.48	3.86	1.81	1.71	1.72	3.41	3.42	3.93	2.09	2.29	3.79	3.7	2.8	3.41	3.42	3.93	3.93	2.09	2.29	3.79	3.7	2.8	3.41	3.42	3.93	3.93	2.09	2.29	3.79	3.7	2.8
P ₂ O ₅	0.16	0.13	0.07	0.13	0.14	0.09	0.08	0.08	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.15	0.16	0.15	0.17	0.18	0.19	0.2	0.2	0.21	0.15	0.16	0.15	0.16	0.15	0.19	0.2	0.21	0.15	0.16	0.15	0.16
LOI	2.65	2.61	2.97	2.64	2.7	0.89	0.85	0.61	2.12	2.22	3.45	3.5	1.23	3.07			2.12	2.22	3.45	3.5	0.94	1.23	3.07			2.12	2.22	3.45	3.5	0.94	1.23	3.07		
Total	99.34	99.35	99.53	99.51	99	100.4	100.27	99.96	99.85	100.62	99.74	99.83	99.46	100.07			99.85	100.62	99.74	100.14	99.83	99.46	100.07			99.85	100.62	99.74	100.14	99.83	99.46	100.07		
K ₂ O/Na ₂ O	2.08	2.29	2.56	1.87	2.47	0.63	0.7	0.66	1.79	1.68	3.05	0.73	0.83	3.01	3.1	0.9	1.79	1.68	3.05	2.89	0.73	0.83	3.01	3.1	0.9	1.79	1.68	3.05	2.89	0.73	0.83	3.01	3.1	0.9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.74	3.33	3.62	3.86	3.42	6.32	6.44	7.09	4.02	3.94	3.16	5.71	5.73	3.56	70	53	4.02	3.94	3.16	3.11	5.71	5.73	3.56	70	53	4.02	3.94	3.11	5.71	5.73	3.56	70	53	
ClA	74.51	75.09	74.77	73.96	75.3	64.55	64.01	64.47	70.82	70.66	75.92	66.56	64.84	75.05			70.82	70.66	75.92	75.68	66.56	64.84	75.05			70.82	70.66	75.92	75.68	66.56	64.84	75.05		
ClW	88.17	89.12	88.89	87.36	89.67	71.65	70.7	71.88	83.2	82.77	90.05	74.69	73.55	89.4	88	69	83.2	82.77	90.05	89.55	74.69	73.55	89.4	88	69	83.2	82.77	90.05	89.55	74.69	73.55	89.4	88	69
PIA	85.52	86.62	86.3	84.56	87.23	68.15	67.28	68.23	79.64	79.2	87.78	71.17	69.44	86.9			79.64	79.2	87.78	87.21	71.17	69.44	86.9			79.64	79.2	87.78	87.21	71.17	69.44	86.9		
Sc	17.23	17.71	17.36	16.86	16.78	9.01	8.73	7.83	16.2	15.88	19.36	10.14	9.9	18.5	16	14	16.2	15.88	19.36	20.07	10.14	9.9	18.5	16	14	16.2	15.88	19.36	20.07	10.14	9.9	18.5	16	14
Ti	4583	4619	4616	4437	4420	2722	2607	2419	4278	4293	4257	3892	4010	4328	5994	3765	4278	4293	4257	4767	3892	4010	4328	5994	3765	4278	4293	4257	4767	3892	4010	4328	5994	3765
V	110	118	118.6	114.9	113.1	50.07	52.41	48.45	110.8	108	122	83.43	81.13	117.2	150	97	110.8	108	122	127.6	83.43	81.13	117.2	150	97	110.8	108	122	127.6	83.43	81.13	117.2	150	97
Cr	84	107	94	82	78	51	57	49	76	106	81	84	123	83	110	92	76	106	81	96	84	123	83	110	92	76	106	81	96	84	123	83	110	92
Mn	1284	1062	698	1212	1158	1259	1373	1245	740	737	669	762	842	623			740	737	669	705	762	842	623			740	737	669	705	762	842	623		
Co	20.9	21.1	14.8	19.6	19.5	8.0	7.5	5.7	13.8	15.0	14.9	8.2	8.9	23.0	17.0		13.8	15.0	14.9	16.1	8.2	8.9	23.0	17.0	17.0	13.8	15.0	14.9	16.1	8.2	8.9	23.0	17.0	17.0
Ni	45.6	46.1	41.1	43.7	43.8	15.8	14.3	9.7	32.9	34.1	35.9	22.8	23.1	37.5	47.0		32.9	34.1	35.9	39.2	22.8	23.1	37.5	47.0	47.0	32.9	34.1	35.9	39.2	22.8	23.1	37.5	47.0	47.0
Cu	27.19	23.62	34.12	20.58	20.35	43.04	48.13	33.62	41.68	41.2	62	17.72	21.85	38.42	55	28	41.68	41.2	62	59.25	17.72	21.85	38.42	55	28	41.68	41.2	62	59.25	17.72	21.85	38.42	55	28
Zn	126.9	172.1	146.7	116.8	119.1	65.4	64.5	60.6	106.7	101.9	108.7	66.1	67.6	112	85	67	106.7	101.9	108.7	112.6	66.1	67.6	112	85	67	106.7	101.9	108.7	112.6	66.1	67.6	112	85	67
Ga	22.16	25.15	23.95	20.75	20.74	12.4	12.36	11.12	21.44	21.12	23.95	14.44	14.29	22.79			21.44	21.12	23.95	25.16	14.44	14.29	22.79			21.44	21.12	23.95	25.16	14.44	14.29	22.79		
Ge	2.56	2.58	2.59	2.53	2.37	1.91	1.96	1.84	2.15	2.12	2.44	1.85	1.94	2.34			2.15	2.12	2.44	2.46	1.85	1.94	2.34			2.15	2.12	2.44	2.46	1.85	1.94	2.34		
Rb	180	185	185	171	170	138	140	130	119	116	128	80	97	128	160	82	119	116	128	129	80	97	128	160	82	119	116	128	129	80	97	128	160	82
Sr	158	144	143	164	163	194	215	170	110	113	73	150	177	81.5	200	320	110	113	73	76	150	177	81.5	200	320	110	113	73	76	150	177	81.5	200	320

续表 1:

样号	二云母石英片岩										变质长石石英细砂岩										黑云母石英片岩									
	AKSYS-8	AKSYS-9	AKSYS-10	AKSYS-11	AKSYS-12	AKSYS-29	AKSYS-30	AKSYS-31	DHLTBS-2	DHLTBS-3	DHLTBS-4	DHLTBS-5	DHLTBS-6	DHLTBS-7	DHLTBS-8	PASS	UGG													
Y	28.0	29.7	33.3	31.1	29.9	17.5	19.2	17.0	20.8	17.4	18.5	20.2	18.1	19.1	28.6	27	21													
Zr	115	180	184	172	183	138	123	132	164	167	177	182	219	231	169	210	193													
Nb	12.6	12.6	12.7	12.2	12.2	8.45	8.23	7.88	11.6	11.6	11.5	12.5	10.3	11.0	11.8	19.0	12.0													
Cs	9.34	10.4	9.73	9.43	9.37	23.0	20.2	16.4	6.08	6.36	5.49	5.69	5.85	5.74	6.14	15	5													
Ba	605	569	603	516	515	376	316	273	631	602	555	563	411	451	528	650	628													
La	28.55	30.77	32.01	28.7	30.9	21.99	24.89	21.56	19.39	19.36	24.39	25.63	23.43	28.36	28.04	38	31													
Ce	59.24	62.92	65.65	58.5	62.66	44.01	48.53	42.33	44.65	55.12	43.62	55.21	43.47	56.73	50.82	80	63													
Pr	7.25	7.87	8.13	7.24	7.75	5.22	5.78	5.1	5.21	5.37	6.55	6.68	5.92	6.84	7.21	8.83	7.1													
Nd	28.53	31.33	32.92	28.69	30.49	19.71	21.27	19.25	19.94	20.32	26.21	26.58	22.74	25.86	28.51	33.9	27													
Sm	5.77	6.22	6.6	5.67	6.06	3.54	3.97	3.57	3.84	3.93	4.91	5.03	4.16	4.62	5.41	5.55	4.7													
Eu	1.28	1.38	1.29	1.3	1.4	0.87	0.84	0.81	0.83	0.81	0.97	1.03	0.91	1.01	1.12	1.08	1													
Gd	5.16	5.66	5.81	5.35	5.46	3.25	3.69	3.28	3.23	3.22	3.94	4.37	3.54	3.85	4.69	4.66	4													
Tb	0.83	0.88	0.93	0.84	0.88	0.5	0.56	0.52	0.52	0.49	0.59	0.66	0.54	0.57	0.74	0.77	0.7													
Dy	4.83	5.15	5.72	5.19	5.17	3.02	3.34	3.02	3.27	2.92	3.42	3.75	3.27	3.37	4.54	4.68	3.9													
Ho	0.99	1.05	1.14	1.09	1.08	0.63	0.67	0.61	0.71	0.63	0.68	0.75	0.66	0.69	0.98	0.99	0.83													
Er	2.71	2.86	3.18	3.02	2.99	1.8	1.89	1.69	2.17	1.86	1.97	2.14	1.97	2.03	2.76	2.85	2.3													
Tm	0.4	0.42	0.47	0.45	0.45	0.28	0.29	0.25	0.35	0.31	0.33	0.34	0.31	0.32	0.43	0.41	0.3													
Yb	2.59	2.72	3.03	2.88	2.89	1.85	1.9	1.61	2.36	2.19	2.41	2.57	2.14	2.25	2.88	2.82	2													
Lu	0.39	0.42	0.46	0.44	0.45	0.28	0.29	0.25	0.38	0.36	0.41	0.44	0.36	0.36	0.44	0.43	0.31													
Hf	3.24	5.23	5.08	4.8	5.23	3.99	3.74	3.82	4.65	4.67	4.99	5.18	6	6.17	4.79	5	5.3													
Ta	0.88	0.91	0.9	0.85	0.87	0.63	0.6	0.6	0.84	0.8	0.85	0.91	0.77	0.79	0.86	1.28	0.9													
Pb	19.78	18.15	16.75	19.05	19.75	19.68	15.26	16.79	19.16	21.51	18.8	20.69	10.03	13.89	23.78	20	17													
Th	10.5	12.1	10.7	10.2	11.1	7.5	8.59	7.36	8.84	8.5	11.6	12.1	10.3	11.2	11.0	14.6	10.5													
U	5.43	5.43	3.86	5.46	5.69	3.26	2.8	2.69	2.26	2.22	2.61	2.71	2.33	2.41	2.48	3.1	2.7													
ΣREE	148.52	159.65	167.34	149.36	158.63	106.95	117.91	103.85	106.85	116.89	120.4	135.18	113.42	136.86	138.57	184.97	148.14													
(La/Yb) _N	7.91	8.11	7.57	7.14	7.68	8.54	9.38	9.59	5.89	6.33	7.27	7.16	7.85	9.05	6.98	9.72	11.12													
(Gd/Yb) _N	1.65	1.72	1.59	1.53	1.57	1.45	1.6	1.69	1.13	1.21	1.36	1.41	1.37	1.42	1.35	1.37	1.65													
Eu/Eu*	0.70	0.70	0.62	0.71	0.73	0.77	0.66	0.71	0.7	0.68	0.65	0.65	0.71	0.71	0.66	0.65	0.71													

注: CIA=100×Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)(据 Nesbitt and Young, 1982); CaO*仅代表硅酸盐矿物中的 CaO; CIW=100×Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O)(据 Harnois, 1988); PIA=100×(Al₂O₃-K₂O)/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O-K₂O)(据 Fedo et al., 1995); δEu=Eu_N/(Sm_N×Gd_N)^{1/2}(McLennan, 1989); 后太古宙澳大利亚平均页岩(PASS)标准化值据 McLennan (1989); 上地壳平均值(UCC)标准化值据 Rudnick and Gao (2003)。

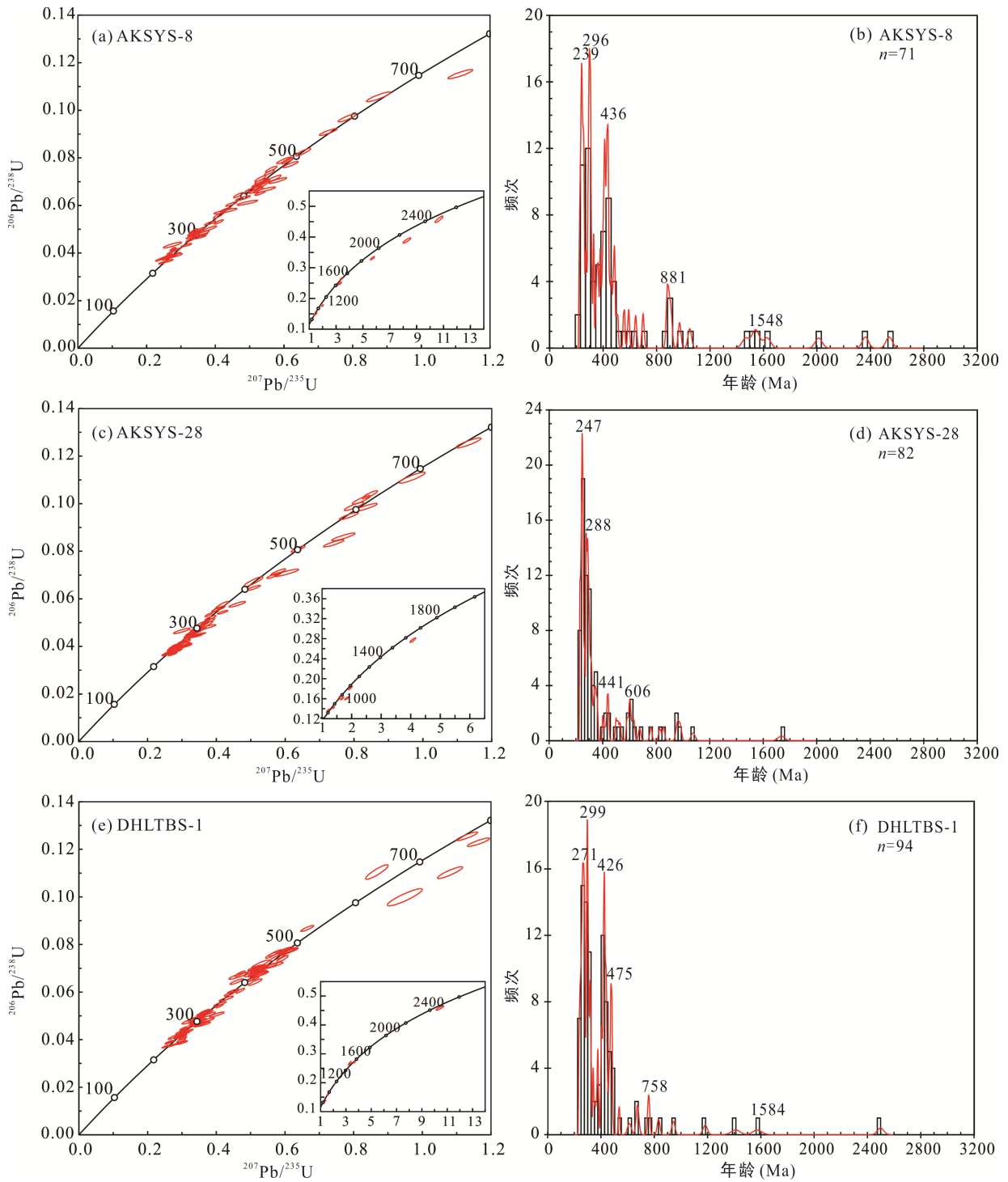


图 5 西昆仑阿克萨依矿区巴颜喀拉山群碎屑锆石 U-Pb 年龄和谐图(a, c, e)和年龄频谱图(b, d, f)

Fig.5 U-Pb concordia diagrams (a, c, e) and histograms of U-Pb ages (b, d, f) for detrital zircons from the Bayankalashan Group in the Akesayi Deposit, West Kunlun

目前对巴颜喀拉山群形成时代的年代学研究大多数集中在松潘-甘孜地区(刘飞, 2006; Enkelmann et al., 2007; 崔加伟等, 2016), 对于西昆仑地区出露的巴颜喀拉山群研究较少。2006 年陕西省地质调查院在《1:25 万康西瓦幅区调报告》中, 通过地层对

比, 将阿克萨依地区的这套地层定为巴颜喀拉山群。但相比于典型的巴颜喀拉山群, 阿克萨依地区的这套地层区域变质及动力变质程度较深, 除变砂岩外, 出现了千枚岩、片岩等, 同时缺少确定地层年代的无脊椎化石, 因此对于大红柳滩一带的该套地

层形成时代存在争议。本文对大红柳滩一带阿克萨依地区巴颜喀拉山群的碎屑锆石进行了 U-Pb 定年, 三个样品(AKSYS-8、AKSYS-28、DHLTBS-1)共 247 颗碎屑锆石的谐和年龄显示最年轻的年龄组为 223~265 Ma, 峰值年龄为 246 Ma(图 6)。这组年龄占全部谐和样品的 23%, 大部分为自形柱状, 具有较为清晰的振荡生长环带和较高的 Th/U 值表明其具有

岩浆锆石的特征。此外, 阿克萨依地区仅经历了绿片岩相变质作用, 排除了碎屑锆石中 U-Th-Pb 体系重置的可能性, 因此阿克萨依地区巴颜喀拉山群的形成时代应该小于 246 Ma。结合魏小鹏等(2017)在大红柳滩地区测得侵入到巴颜喀拉山群的大红柳滩二云母花岗岩体年龄为 209.6±1.5 Ma, 我们认为该区巴颜喀拉山群的形成时代为 209~246 Ma。

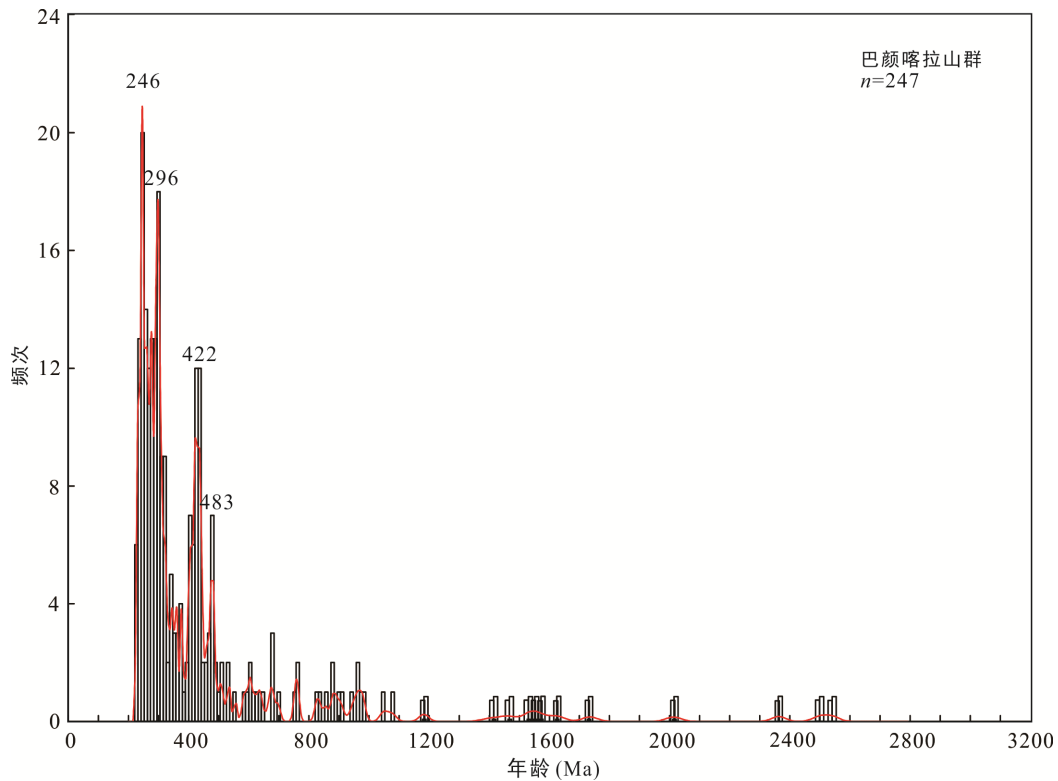


图 6 西昆仑阿克萨依矿区巴颜喀拉山群碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱图

Fig.6 Histogram of U-Pb ages for detrital zircons from the Bayankalashan Group in the Akesayi Deposit, West Kunlun

表 2 阿克萨依矿区巴颜喀拉山群碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the Bayankalashan Group in the Akesayi area

测点	含量(μg/g)		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)				谐和度(%)				
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
二云母石英片岩(AKSYS-8)																
1	1287	1317	0.98	0.05471	0.00104	0.48269	0.01001	0.06362	0.00073	467	38	400	7	398	4	99
2	295	635	0.46	0.0568	0.00123	0.61577	0.01449	0.07827	0.00093	483	48	487	9	486	6	99
3	139	172	0.81	0.05724	0.00289	0.44479	0.02245	0.0569	0.00077	502	111	374	16	357	5	95
5	906	524	1.73	0.05363	0.00165	0.26164	0.00799	0.03526	0.00041	367	75	236	6	223	3	94
6	153	410	0.37	0.06026	0.00149	0.63462	0.01461	0.07649	0.00086	613	49	499	9	475	5	95
7	852	2381	0.36	0.05455	0.00092	0.36507	0.00699	0.04824	0.00057	394	39	316	5	304	3	96
8	133	1383	0.10	0.05494	0.00114	0.34058	0.00766	0.04467	0.00051	409	46	298	6	282	3	94
9	1130	2684	0.42	0.0576	0.00094	0.6253	0.01183	0.07811	0.00089	522	35	493	7	485	5	98
10	342	680	0.50	0.05391	0.00137	0.34376	0.00909	0.04601	0.00047	369	62	300	7	290	3	96
11	884	604	1.46	0.05707	0.00172	0.37745	0.01348	0.04749	0.00081	494	67	325	10	299	5	91
13	7	577	0.01	0.0729	0.00112	1.64723	0.03006	0.16283	0.00183	1013	27	988	12	972	10	98

续表 2:

测点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
二云母石英片岩 (AKSYS-8)																
15	404	873	0.46	0.07094	0.00123	1.12873	0.02394	0.11451	0.0013	967	35	767	11	699	8	90
16	125	225	0.56	0.06197	0.00164	0.89079	0.02332	0.10496	0.00137	672	56	647	13	643	8	99
17	471	1046	0.45	0.05946	0.00112	0.67125	0.01466	0.08172	0.00107	583	45	521	9	506	6	97
18	1027	1650	0.62	0.05767	0.00153	0.39871	0.01365	0.04956	0.00073	517	59	341	10	312	4	91
21	524	2347	0.22	0.05238	0.00092	0.29375	0.00546	0.04059	0.00043	302	41	262	4	256	3	98
22	1907	663	2.88	0.05608	0.0013	0.44433	0.01041	0.05745	0.00062	457	19	373	7	360	4	96
23	510	1091	0.47	0.05279	0.00135	0.27883	0.00714	0.03824	0.00041	320	57	250	6	242	3	96
26	193	1099	0.18	0.1238	0.00182	5.70277	0.10865	0.33085	0.00398	2013	26	1932	17	1843	19	95
27	776	1511	0.51	0.05648	0.00128	0.30361	0.00645	0.03898	0.00036	472	50	269	5	247	2	91
28	701	487	1.44	0.06146	0.00162	0.59731	0.01729	0.06978	0.00082	655	56	476	11	435	5	91
29	451	1179	0.38	0.05194	0.001	0.28405	0.00626	0.0394	0.00045	283	44	254	5	249	3	98
31	562	666	0.84	0.0544	0.00124	0.35482	0.0086	0.04726	0.00058	387	47	308	6	298	4	96
33	942	1887	0.50	0.05136	0.00092	0.29107	0.00557	0.04098	0.00044	257	41	259	4	259	3	99
34	239	285	0.84	0.05392	0.00205	0.27655	0.01112	0.03714	0.00053	369	85	248	9	235	3	94
36	242	425	0.57	0.0571	0.00128	0.5507	0.01355	0.06963	0.00079	494	44	445	9	434	5	97
37	181	362	0.50	0.05943	0.00124	0.74413	0.01725	0.09015	0.00095	583	14	565	10	556	6	98
38	999	1117	0.89	0.05875	0.00116	0.42536	0.00886	0.05238	0.00063	567	44	360	6	329	4	91
39	132	319	0.42	0.06069	0.00211	0.55807	0.02154	0.06583	0.00081	628	76	450	14	411	5	90
41	249	568	0.44	0.06019	0.00129	0.79939	0.01754	0.09609	0.00112	609	46	596	10	591	7	99
42	324	389	0.83	0.05805	0.00198	0.52766	0.01718	0.06616	0.00082	532	76	430	11	413	5	95
43	189	477	0.40	0.06024	0.0014	0.58576	0.01402	0.07062	0.00094	613	50	468	9	440	6	93
44	114	147	0.77	0.05515	0.003	0.28164	0.01453	0.03782	0.00062	417	150	252	12	239	4	94
47	64	113	0.57	0.07288	0.00192	1.52461	0.04224	0.15099	0.00208	1011	49	940	17	907	12	96
48	136	447	0.31	0.05803	0.00146	0.54693	0.01316	0.06836	0.00084	532	54	443	9	426	5	96
49	944	903	1.04	0.05853	0.00139	0.53363	0.01358	0.06558	0.0008	550	56	434	9	409	5	94
51	708	705	1.00	0.05601	0.00106	0.57829	0.01147	0.07454	0.00084	454	43	463	7	463	5	99
52	79	378	0.21	0.07182	0.00126	1.49896	0.03326	0.14982	0.00194	981	35	930	14	900	11	96
53	735	1026	0.72	0.06124	0.00116	0.54517	0.0103	0.06439	0.0006	656	41	442	7	402	4	90
54	49	65	0.75	0.05834	0.00564	0.28629	0.02198	0.03786	0.00084	543	213	256	17	240	5	93
55	720	1204	0.60	0.05399	0.0011	0.30331	0.0063	0.04071	0.00042	372	46	269	5	257	3	95
59	380	387	0.98	0.05606	0.00134	0.46181	0.01109	0.05987	0.00062	454	19	386	8	375	4	97
60	479	1041	0.46	0.05602	0.00091	0.54634	0.01087	0.07054	0.00088	454	35	443	7	439	5	99
63	1233	1939	0.64	0.05763	0.00137	0.37649	0.01124	0.04681	0.00052	517	54	324	8	295	3	90
64	247	629	0.39	0.05755	0.00118	0.52913	0.012	0.06642	0.00086	522	44	431	8	415	5	96
66	112	931	0.12	0.06976	0.00112	1.41983	0.02445	0.14698	0.00156	920	33	897	10	884	9	98
68	248	1025	0.24	0.0683	0.00102	1.38519	0.02387	0.14606	0.00157	880	27	883	10	879	9	99
70	212	231	0.92	0.05929	0.00178	0.54915	0.01691	0.06794	0.00133	589	60	444	11	424	8	95
71	736	1917	0.38	0.05498	0.001	0.29146	0.00602	0.03806	0.00038	413	41	260	5	241	2	92
74	542	685	0.79	0.05457	0.00117	0.3702	0.00831	0.04914	0.00063	394	48	320	6	309	4	96
75	248	366	0.68	0.05716	0.00158	0.49581	0.01462	0.06234	0.00069	498	66	409	10	390	4	95
76	554	760	0.73	0.0554	0.00181	0.27719	0.01029	0.0359	0.00045	428	72	248	8	227	3	91
79	1329	1661	0.80	0.05534	0.00102	0.4248	0.01036	0.05509	0.00089	433	41	359	7	346	5	96
80	100	236	0.42	0.08077	0.00162	1.99139	0.04907	0.17659	0.00241	1217	39	1113	17	1048	13	94
82	1210	2026	0.60	0.05215	0.00083	0.34636	0.00602	0.04775	0.00045	300	37	302	5	301	3	99

续表 2:

测点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
二云母石英片岩 (AKSYS-8)																
84	562	1040	0.54	0.0523	0.00095	0.35266	0.00712	0.0486	0.00063	298	41	307	5	306	4	99
85	188	518	0.36	0.05547	0.00161	0.33087	0.01076	0.04258	0.00048	432	65	290	8	269	3	92
86	149	874	0.17	0.09194	0.00129	3.13942	0.04998	0.24559	0.00259	1466	27	1442	12	1416	13	98
87	227	362	0.63	0.05558	0.0015	0.40015	0.0111	0.05189	0.00061	435	59	342	8	326	4	95
89	33	51	0.65	0.04969	0.00362	0.29035	0.01773	0.04264	0.00082	189	-29	259	14	269	5	96
90	451	483	0.93	0.05	0.00151	0.25168	0.00746	0.03649	0.00042	195	70	228	6	231	3	98
91	200	230	0.87	0.05786	0.00236	0.36524	0.01494	0.04585	0.00051	524	91	316	11	289	3	91
92	191	305	0.63	0.09619	0.00147	3.31654	0.05822	0.2493	0.00316	1552	28	1485	14	1435	16	96
94	221	189	1.17	0.05494	0.00219	0.35486	0.01365	0.04743	0.00061	409	91	308	10	299	4	96
95	751	1523	0.49	0.05639	0.00087	0.57235	0.01012	0.0731	0.00075	478	35	460	7	455	5	98
96	458	420	1.09	0.06021	0.00202	0.50887	0.02004	0.06042	0.00072	613	42	418	13	378	4	90
97	1185	1431	0.83	0.05797	0.0011	0.55455	0.01032	0.06923	0.00067	528	41	448	7	432	4	96
98	299	212	1.41	0.16829	0.00232	10.66563	0.19783	0.45768	0.007	2540	24	2494	17	2429	31	97
100	149	509	0.29	0.09206	0.00123	3.35046	0.05774	0.26243	0.00345	1533	26	1493	14	1502	18	99
101	569	541	1.05	0.05707	0.00116	0.5379	0.01129	0.06792	0.00063	494	44	437	7	424	4	96
103	193	585	0.33	0.15145	0.00247	8.27398	0.19548	0.3887	0.00583	2363	23	2261	21	2117	27	93
变质长石石英细砂岩(AKSYS-28)																
1	133	355	0.37	0.06339	0.00134	0.97456	0.02486	0.11066	0.00152	720	44	691	13	677	9	97
3	276	1196	0.23	0.0523	0.00091	0.38341	0.00735	0.05303	0.00055	298	41	330	5	333	3	98
4	625	1591	0.39	0.05178	0.00094	0.28153	0.00545	0.03934	0.00041	276	41	252	4	249	3	98
5	1105	1440	0.77	0.0576	0.00144	0.35979	0.00996	0.0449	0.00039	522	56	312	7	283	2	90
6	287	595	0.48	0.05701	0.00182	0.34834	0.01129	0.04415	0.00045	500	70	303	9	278	3	91
7	379	1059	0.36	0.05749	0.00105	0.64368	0.0135	0.08072	0.00089	509	36	505	8	500	5	99
8	203	320	0.63	0.06052	0.00141	0.79065	0.01855	0.09456	0.00102	622	50	592	11	582	6	98
10	622	1328	0.47	0.05301	0.00098	0.40529	0.00855	0.05518	0.00073	328	43	345	6	346	4	99
11	114	155	0.74	0.07764	0.00159	1.95688	0.04693	0.18172	0.0027	1139	46	1101	16	1076	15	97
12	464	969	0.48	0.05513	0.00121	0.37104	0.00731	0.04905	0.00058	417	48	320	5	309	4	96
13	110	184	0.60	0.05511	0.00226	0.28121	0.01116	0.03814	0.00091	417	93	252	9	241	6	95
14	149	193	0.77	0.0568	0.00223	0.51353	0.01825	0.06696	0.00136	483	87	421	12	418	8	99
17	462	922	0.50	0.05938	0.00139	0.5856	0.0145	0.07098	0.0009	589	52	468	9	442	5	94
18	173	285	0.61	0.05434	0.00184	0.31391	0.01106	0.04182	0.0006	383	78	277	9	264	4	95
19	176	338	0.52	0.05308	0.00151	0.33308	0.01004	0.04525	0.00058	332	65	292	8	285	4	97
20	316	560	0.56	0.051	0.00141	0.25933	0.00785	0.03647	0.00042	243	63	234	6	231	3	98
21	399	449	0.89	0.05941	0.00137	0.57341	0.01414	0.06957	0.00084	583	50	460	9	434	5	94
22	477	1500	0.32	0.05501	0.00107	0.35082	0.00728	0.04584	0.00048	413	43	305	5	289	3	94
24	1011	1698	0.60	0.05265	0.00098	0.35862	0.00801	0.04901	0.00071	322	10	311	6	308	4	99
25	248	744	0.33	0.05523	0.00134	0.38655	0.00996	0.05048	0.00069	420	56	332	7	317	4	95
26	170	411	0.41	0.05106	0.00152	0.26015	0.0084	0.03657	0.00044	243	69	235	7	232	3	98
27	66	161	0.41	0.05534	0.00256	0.30905	0.0129	0.04065	0.00061	433	102	273	10	257	4	93
28	295	1071	0.28	0.05237	0.00103	0.34031	0.00728	0.04684	0.00056	302	44	297	6	295	3	99
32	1322	1623	0.81	0.05114	0.00097	0.27182	0.00544	0.03828	0.0004	256	44	244	4	242	3	99
34	633	684	0.93	0.05624	0.0013	0.42386	0.0105	0.05409	0.00052	461	56	359	7	340	3	94
35	529	1222	0.43	0.05327	0.00105	0.34712	0.00721	0.04705	0.00055	339	44	303	5	296	3	97
36	371	726	0.51	0.05292	0.00114	0.33307	0.007	0.04562	0.00047	324	48	292	5	288	3	98

续表 2:

测点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
变质长石石英细砂岩(AKSYS-28)																
37	230	545	0.42	0.05323	0.00147	0.30652	0.00873	0.04159	0.0005	339	61	271	7	263	3	96
38	759	1450	0.52	0.05538	0.00123	0.29955	0.00656	0.03909	0.00039	428	50	266	5	247	2	92
39	1068	2216	0.48	0.0505	0.00091	0.27341	0.00526	0.03899	0.00041	217	43	245	4	247	3	99
40	1712	1921	0.89	0.05412	0.00099	0.37727	0.00705	0.05039	0.00056	376	36	325	5	317	3	97
41	227	361	0.63	0.05459	0.00153	0.38858	0.01097	0.05171	0.00069	394	63	333	8	325	4	97
42	124	276	0.45	0.05401	0.00165	0.41254	0.01291	0.05558	0.00081	372	69	351	9	349	5	99
44	298	764	0.39	0.05325	0.00126	0.30539	0.00764	0.04136	0.00048	339	54	271	6	261	3	96
45	410	909	0.45	0.05583	0.00132	0.29696	0.00704	0.03853	0.00043	456	54	264	6	244	3	92
46	198	264	0.75	0.05762	0.00144	0.51351	0.0138	0.06432	0.00073	517	54	421	9	402	4	95
47	299	319	0.94	0.05901	0.00125	0.8056	0.01868	0.09861	0.00117	569	46	600	11	606	7	98
48	470	1052	0.45	0.05204	0.00126	0.26862	0.00686	0.03739	0.00046	287	56	242	5	237	3	97
49	266	632	0.42	0.05427	0.00158	0.32022	0.0089	0.04291	0.00054	383	69	282	7	271	3	95
50	361	633	0.57	0.04876	0.00155	0.16293	0.0052	0.02431	0.00029	200	74	153	5	155	2	98
51	321	705	0.46	0.0527	0.00122	0.2882	0.0076	0.03958	0.00053	317	54	257	6	250	3	97
52	371	1089	0.34	0.05578	0.00109	0.34169	0.00741	0.0442	0.00047	443	44	298	6	279	3	93
53	173	1612	0.11	0.05444	0.001	0.3315	0.00684	0.04395	0.00046	391	43	291	5	277	3	95
55	197	311	0.63	0.07538	0.00159	1.67683	0.03992	0.16054	0.00204	1080	43	1000	15	960	11	95
56	125	475	0.26	0.06504	0.00173	0.74648	0.01984	0.08304	0.001	776	56	566	12	514	6	90
57	290	541	0.54	0.05437	0.00144	0.32939	0.0094	0.04397	0.00059	387	66	289	7	277	4	95
58	79	144	0.55	0.05482	0.00268	0.27983	0.01349	0.03744	0.00053	406	105	251	11	237	3	94
59	257	1004	0.26	0.05276	0.00101	0.32159	0.00672	0.04412	0.00052	317	43	283	5	278	3	98
60	895	1446	0.62	0.05522	0.00109	0.2811	0.00605	0.03672	0.00034	420	44	252	5	232	2	92
61	87	216	0.40	0.06199	0.00154	0.84051	0.02178	0.09822	0.00107	672	53	619	12	604	6	97
62	547	1173	0.47	0.05327	0.00098	0.32042	0.00627	0.04354	0.00044	339	45	282	5	275	3	97
63	121	223	0.54	0.05735	0.00258	0.31413	0.01431	0.04019	0.00057	506	72	277	11	254	4	91
64	201	411	0.49	0.05504	0.00183	0.35665	0.01306	0.04662	0.00069	413	71	310	10	294	4	94
65	72	111	0.65	0.06372	0.00155	1.20682	0.03162	0.13706	0.00165	731	52	804	15	828	9	97
66	180	395	0.46	0.05634	0.00153	0.37898	0.01101	0.04902	0.00089	465	59	326	8	309	5	94
67	158	370	0.43	0.05853	0.00189	0.4664	0.01629	0.05744	0.0008	550	72	389	11	360	5	92
68	148	230	0.64	0.07056	0.0013	1.61416	0.03331	0.16461	0.00164	946	39	976	13	982	9	99
69	271	618	0.44	0.05074	0.00114	0.28022	0.00729	0.0396	0.00049	228	52	251	6	250	3	99
70	496	770	0.64	0.05548	0.00135	0.2933	0.00772	0.03794	0.0004	432	54	261	6	240	2	91
71	159	220	0.72	0.06157	0.00208	0.6097	0.02348	0.07068	0.00101	659	74	483	15	440	6	90
72	474	374	1.27	0.05266	0.00209	0.28537	0.01049	0.03936	0.00052	322	123	255	8	249	3	97
73	185	242	0.76	0.06531	0.00187	0.77485	0.02254	0.08575	0.00109	783	59	583	13	530	6	90
74	296	520	0.57	0.05491	0.00173	0.27773	0.00885	0.03648	0.00045	409	66	249	7	231	3	92
75	97	214	0.45	0.05651	0.00225	0.37837	0.01741	0.04782	0.0007	472	89	326	13	301	4	92
76	285	1571	0.18	0.05503	0.00119	0.35085	0.00803	0.04594	0.00047	413	48	305	6	290	3	94
77	545	2094	0.26	0.05237	0.00081	0.34734	0.00594	0.04773	0.00047	302	40	303	4	301	3	99
78	733	1442	0.51	0.05357	0.00119	0.34922	0.0098	0.04669	0.00068	354	82	304	7	294	4	96
79	267	572	0.47	0.05111	0.00126	0.27324	0.00718	0.03856	0.00044	256	57	245	6	244	3	99
80	42	544	0.08	0.05335	0.00129	0.42243	0.01271	0.05708	0.00103	343	56	358	9	358	6	99
81	415	776	0.53	0.05102	0.00114	0.25767	0.00599	0.03661	0.00044	243	55	233	5	232	3	99
82	127	333	0.38	0.06573	0.00131	1.13821	0.02408	0.12527	0.0014	798	42	772	11	761	8	98

续表 2:

测点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
变质长石石英细砂岩(AKSYS-28)																
83	91	325	0.28	0.06997	0.00139	1.37886	0.0312	0.14198	0.00142	928	41	880	13	856	8	97
84	298	383	0.78	0.05898	0.00108	0.82711	0.01757	0.10132	0.00119	565	41	612	10	622	7	98
85	90	169	0.53	0.08292	0.00228	1.84314	0.05389	0.16101	0.00216	1278	54	1061	19	962	12	90
86	113	285	0.40	0.05541	0.0021	0.29259	0.01086	0.03847	0.00051	428	90	261	9	243	3	93
87	164	349	0.47	0.05686	0.0022	0.3131	0.01348	0.03981	0.00059	487	85	277	10	252	4	90
88	159	672	0.24	0.05289	0.00128	0.32877	0.00845	0.04504	0.0005	324	28	289	6	284	3	98
89	377	745	0.51	0.0538	0.00134	0.29609	0.00768	0.0398	0.00039	361	56	263	6	252	2	95
90	1152	1451	0.79	0.05124	0.00095	0.28468	0.00568	0.04014	0.00036	250	43	254	4	254	2	99
91	61	85	0.72	0.04859	0.00273	0.30516	0.01636	0.04624	0.00075	128	126	270	13	291	5	92
92	555	458	1.21	0.10623	0.00143	4.07267	0.06653	0.27714	0.00309	1735	25	1649	13	1577	16	95
93	686	1391	0.49	0.0594	0.00086	0.85161	0.01478	0.10353	0.00111	583	31	626	8	635	7	98
黑云母石英片岩(DHLTBS-1)																
1	132	183	0.72	0.07931	0.00167	2.21927	0.05407	0.20138	0.00305	1189	41	1187	17	1183	16	99
2	542	611	0.89	0.05063	0.00127	0.2885	0.00762	0.04118	0.00058	233	57	257	6	260	4	98
3	354	740	0.48	0.05677	0.00112	0.60631	0.01356	0.07679	0.0009	483	43	481	9	477	5	99
5	82	175	0.47	0.05436	0.00185	0.50738	0.01725	0.06789	0.00096	387	76	417	12	423	6	98
6	112	139	0.81	0.09731	0.00179	3.68547	0.07611	0.27231	0.00328	1573	34	1568	17	1553	17	98
7	855	862	0.99	0.05484	0.00105	0.49785	0.01059	0.06518	0.00074	406	47	410	7	407	4	99
8	663	489	1.36	0.05231	0.00134	0.34476	0.00967	0.04729	0.00058	298	64	301	7	298	4	99
9	139	865	0.16	0.07207	0.00127	1.38488	0.02859	0.13783	0.00171	987	41	883	12	832	10	94
10	231	569	0.41	0.05658	0.00127	0.53038	0.01205	0.06776	0.0008	476	45	432	8	423	5	97
11	1067	1129	0.95	0.05091	0.00093	0.34859	0.00653	0.04933	0.00044	235	43	304	5	310	3	97
12	916	776	1.18	0.05175	0.00113	0.34212	0.00836	0.04752	0.00054	276	45	299	6	299	3	99
13	837	645	1.30	0.05373	0.00114	0.30282	0.00719	0.04054	0.00047	367	48	269	6	256	3	95
14	192	375	0.51	0.0502	0.00131	0.28998	0.00794	0.0418	0.00054	211	61	259	6	264	3	97
15	233	319	0.73	0.04933	0.00164	0.26521	0.00903	0.03897	0.00049	165	78	239	7	246	3	96
16	1433	1034	1.39	0.05162	0.00112	0.33738	0.00798	0.04725	0.00057	333	50	295	6	298	4	99
17	252	199	1.27	0.05514	0.00216	0.35901	0.01606	0.04641	0.00068	417	87	311	12	292	4	93
18	105	260	0.40	0.05713	0.00142	0.61143	0.01576	0.07746	0.00084	498	54	484	10	481	5	99
19	61	106	0.57	0.0511	0.00213	0.4646	0.01856	0.06686	0.00097	256	96	387	13	417	6	92
20	562	1074	0.52	0.05137	0.00093	0.30842	0.00636	0.04328	0.00046	257	41	273	5	273	3	99
21	117	264	0.44	0.05393	0.00146	0.51897	0.0145	0.06999	0.00091	369	61	424	10	436	5	97
22	429	500	0.86	0.05471	0.00108	0.51845	0.0112	0.06836	0.00076	467	44	424	7	426	5	99
23	212	405	0.53	0.05425	0.00141	0.38104	0.01125	0.05059	0.00067	389	59	328	8	318	4	97
24	191	118	1.62	0.16394	0.00284	10.4267	0.20414	0.45864	0.00524	2498	24	2473	18	2434	23	98
25	122	186	0.66	0.0522	0.00201	0.29621	0.01196	0.04119	0.00058	295	89	263	9	260	4	98
27	526	815	0.64	0.04822	0.00105	0.25905	0.00575	0.03876	0.00034	109	52	234	5	245	2	95
28	158	285	0.56	0.05178	0.0015	0.45967	0.01327	0.06439	0.00078	276	65	384	9	402	5	95
29	70	323	0.22	0.08885	0.00154	3.30183	0.07743	0.26719	0.00424	1411	33	1481	18	1527	22	97
31	97	308	0.32	0.05263	0.0014	0.51389	0.01433	0.07019	0.00081	322	61	421	10	437	5	96
32	583	859	0.68	0.04993	0.00104	0.46916	0.01031	0.06768	0.00081	191	48	391	7	422	5	92
33	249	414	0.60	0.05246	0.00125	0.52798	0.01672	0.07168	0.00115	306	58	430	11	446	7	96
34	211	359	0.59	0.04854	0.00213	0.32393	0.01593	0.04783	0.00083	124	106	285	12	301	5	94
35	143	601	0.24	0.05659	0.00102	0.86778	0.02188	0.11048	0.00203	476	41	634	12	676	12	93

续表 2:

测点	含量($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
黑云母石英片岩(DHLTBS-1)																
36	196	730	0.27	0.05526	0.00098	0.66516	0.01255	0.08674	0.00084	433	39	518	8	536	5	96
37	281	440	0.64	0.0576	0.00128	0.51354	0.01324	0.06419	0.0009	522	48	421	9	401	5	95
38	250	664	0.38	0.05202	0.00118	0.30114	0.00695	0.04202	0.00049	287	55	267	5	265	3	99
39	468	997	0.47	0.05501	0.00099	0.53561	0.01081	0.07028	0.00082	413	41	436	7	438	5	99
40	273	378	0.72	0.05499	0.00164	0.29785	0.00879	0.03964	0.00056	413	67	265	7	251	3	94
41	194	510	0.38	0.05217	0.00146	0.30376	0.00838	0.04242	0.00049	300	69	269	7	268	3	99
42	260	506	0.51	0.07066	0.00118	1.08109	0.02412	0.11022	0.00164	948	29	744	12	674	10	90
43	108	251	0.43	0.05588	0.00133	0.59987	0.01553	0.07759	0.00092	456	52	477	10	482	6	99
44	338	452	0.75	0.05353	0.00119	0.43861	0.01046	0.05923	0.00065	350	82	369	7	371	4	99
45	494	1137	0.43	0.05532	0.00107	0.52543	0.0133	0.06813	0.00077	433	44	429	9	425	5	99
46	251	796	0.32	0.04924	0.00105	0.30469	0.00748	0.04464	0.00053	167	50	270	6	282	3	95
47	319	589	0.54	0.05415	0.00104	0.57215	0.01263	0.07639	0.00092	376	38	459	8	475	5	96
48	35	76	0.46	0.05097	0.00258	0.34103	0.01695	0.04896	0.00076	239	117	298	13	308	5	96
49	154	198	0.78	0.05477	0.00166	0.52765	0.01665	0.06965	0.00075	467	67	430	11	434	5	99
50	265	1873	0.14	0.0578	0.00086	0.59273	0.01138	0.07392	0.00093	524	27	473	7	460	6	97
51	1458	1522	0.96	0.05585	0.00082	0.46953	0.00871	0.06055	0.0007	456	33	391	6	379	4	96
52	359	371	0.97	0.05298	0.00121	0.50339	0.01254	0.06872	0.00079	328	56	414	8	428	5	96
53	904	1135	0.80	0.05236	0.00094	0.29709	0.00566	0.04088	0.00036	302	41	264	4	258	2	97
54	407	579	0.70	0.0523	0.00117	0.35308	0.00837	0.04882	0.00057	298	47	307	6	307	4	99
56	107	177	0.60	0.05577	0.00216	0.29836	0.01145	0.03872	0.00055	443	87	265	9	245	3	92
58	215	275	0.78	0.0571	0.00176	0.40172	0.01422	0.05055	0.00071	494	64	343	10	318	4	92
59	99	138	0.71	0.05781	0.002	0.56554	0.0195	0.0712	0.00092	524	71	455	13	443	6	97
60	228	386	0.59	0.05369	0.00129	0.44882	0.01114	0.06036	0.00062	367	56	376	8	378	4	99
61	329	646	0.51	0.0545	0.00116	0.34911	0.00823	0.04613	0.00049	391	48	304	6	291	3	95
62	163	316	0.52	0.05555	0.00166	0.36225	0.01136	0.04704	0.00056	435	67	314	8	296	3	94
63	79	109	0.72	0.07277	0.00177	1.58026	0.04059	0.15766	0.00209	1009	45	962	16	944	12	98
64	144	340	0.42	0.05633	0.00135	0.52612	0.01351	0.06747	0.00078	465	52	429	9	421	5	98
65	339	663	0.51	0.06928	0.00118	1.1933	0.02274	0.12427	0.00123	907	35	797	11	755	7	94
66	436	1212	0.36	0.05463	0.00093	0.40928	0.00774	0.05413	0.00054	398	34	348	6	340	3	97
67	216	787	0.27	0.05239	0.00099	0.33347	0.0072	0.046	0.00055	302	44	292	5	290	3	99
69	612	422	1.45	0.05627	0.00177	0.30117	0.00986	0.03886	0.00044	465	70	267	8	246	3	91
70	188	278	0.68	0.05413	0.00154	0.41086	0.01232	0.05503	0.00063	376	65	349	9	345	4	98
71	157	510	0.31	0.05131	0.00128	0.29924	0.00798	0.04229	0.00047	254	57	266	6	267	3	99
72	262	364	0.72	0.05625	0.00135	0.5784	0.01574	0.07457	0.00105	461	56	463	10	464	6	99
73	169	253	0.67	0.05381	0.00151	0.35619	0.01002	0.04822	0.00047	365	68	309	8	304	3	98
76	398	637	0.62	0.04902	0.0011	0.25102	0.00615	0.03705	0.0004	150	58	227	5	235	3	96
77	147	207	0.71	0.05462	0.00168	0.42902	0.01366	0.05722	0.0007	398	70	362	10	359	4	98
79	489	883	0.55	0.04935	0.00113	0.2917	0.00692	0.04292	0.0005	165	54	260	5	271	3	95
80	276	293	0.94	0.05126	0.00165	0.36133	0.01228	0.05104	0.00061	254	74	313	9	321	4	97
81	136	281	0.48	0.05143	0.00136	0.3664	0.01042	0.05174	0.00068	261	61	317	8	325	4	97
82	235	342	0.69	0.05783	0.00128	0.61792	0.01392	0.07742	0.00082	524	50	489	9	481	5	98
83	378	600	0.63	0.05389	0.00102	0.55977	0.01102	0.07546	0.00087	365	43	451	7	469	5	96
84	126	293	0.43	0.05099	0.00138	0.30488	0.00815	0.04334	0.00041	239	63	270	6	274	3	98
85	146	273	0.54	0.05691	0.00137	0.53236	0.01357	0.06764	0.00076	487	52	433	9	422	5	97

续表 2:

测点	含量(μg/g)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
黑云母石英片岩(DHLTBS-1)																
86	261	625	0.42	0.05039	0.00119	0.30827	0.00734	0.04439	0.00047	213	49	273	6	280	3	97
87	136	232	0.59	0.04872	0.00159	0.27363	0.00947	0.041	0.00059	200	78	246	8	259	4	94
88	99	247	0.40	0.05511	0.00143	0.51363	0.01442	0.06782	0.0009	417	53	421	10	423	5	99
89	503	1077	0.47	0.05034	0.00092	0.33022	0.00684	0.04754	0.00049	209	43	290	5	299	3	96
90	471	843	0.56	0.04913	0.001	0.26351	0.00575	0.03899	0.00043	154	53	237	5	247	3	96
92	171	619	0.28	0.05335	0.00112	0.32193	0.00722	0.04372	0.00046	343	48	283	6	276	3	97
93	71	109	0.65	0.05331	0.00235	0.36781	0.01516	0.05133	0.00084	343	100	318	11	323	5	98
94	83	277	0.30	0.05137	0.0018	0.29439	0.01046	0.04158	0.00052	257	84	262	8	263	3	99
95	218	560	0.39	0.05192	0.00136	0.33265	0.00895	0.0466	0.00058	283	59	292	7	294	4	99
96	223	429	0.52	0.06505	0.0011	1.13023	0.0205	0.12547	0.0012	776	36	768	10	762	7	99
97	145	319	0.45	0.05246	0.0016	0.27127	0.00802	0.03761	0.0004	306	69	244	6	238	2	97
98	118	617	0.19	0.06645	0.00126	0.94905	0.03367	0.09984	0.00238	820	36	678	18	613	14	90
99	147	418	0.35	0.05585	0.00122	0.50671	0.01206	0.06548	0.00067	456	48	416	8	409	4	98
100	281	380	0.74	0.05251	0.00145	0.31035	0.00875	0.04274	0.00044	309	63	274	7	270	3	98
101	396	901	0.44	0.05583	0.00088	0.59594	0.01099	0.07699	0.00083	456	35	475	7	478	5	99
102	75	402	0.19	0.05561	0.00164	0.37463	0.0135	0.04816	0.00068	435	67	323	10	303	4	93
103	144	263	0.55	0.05597	0.00156	0.55138	0.01721	0.07085	0.00087	450	68	446	11	441	5	98
104	53	1330	0.04	0.05129	0.0009	0.31045	0.00578	0.04376	0.0004	254	41	275	4	276	2	99

4.2 巴颜喀拉山群构造背景

碎屑岩的地球化学特征主要取决于其物质组成,但也会受风化作用,成岩作用,变质作用等后期地质因素的影响。由于物质组成与其物源和大地构造有着密切关系,因此碎屑岩的地球化学特征常被用来示踪源区特征及构造环境(Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986; McLennan and Taylor, 1991),此外,由于不同构造环境下岩石的风化程度及沉积物的成熟度存在差异,因此风化程度和成熟度也可以一定程度的指示大地构造环境。

Cox et al. (1995)提出了成分变异指数(ICV),用来指示沉积物的成分成熟度,他指出非黏土矿物相对黏土矿物具有较低的 Al₂O₃ 含量和较高的 CaO、Na₂O、K₂O 等含量,从而具有较高的 ICV 值。ICV 值高的碎屑沉积岩指示其形成于活动构造环境下;ICV 值低的碎屑沉积岩被认为来自成熟的并含有大量黏土矿物的沉积源区,指示被动构造环境下沉积物的再循环。而化学蚀变指数(CIA)常被用来反映源区物质遭受风化作用的强弱程度(Nesbitt and Young, 1982),风化作用越强, CIA 值就越大。在 ICV-CIA 图解上,大红柳滩地区巴颜喀拉山群浅变质岩的 ICV 值介于 0.86~1.16 之间,且 CIA 值小于 75,显示原岩成熟度中等,且经历了较弱的化学风化作用(图 7),暗示其处于相对活动的构造环境下。

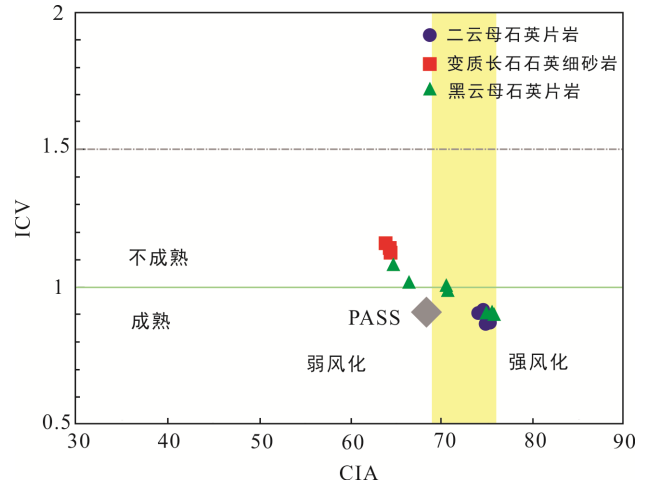


图 7 阿克萨依地区巴颜喀拉山群浅变质碎屑岩 ICV-CIA 指数图解(据 Nesbitt and Young, 1982)

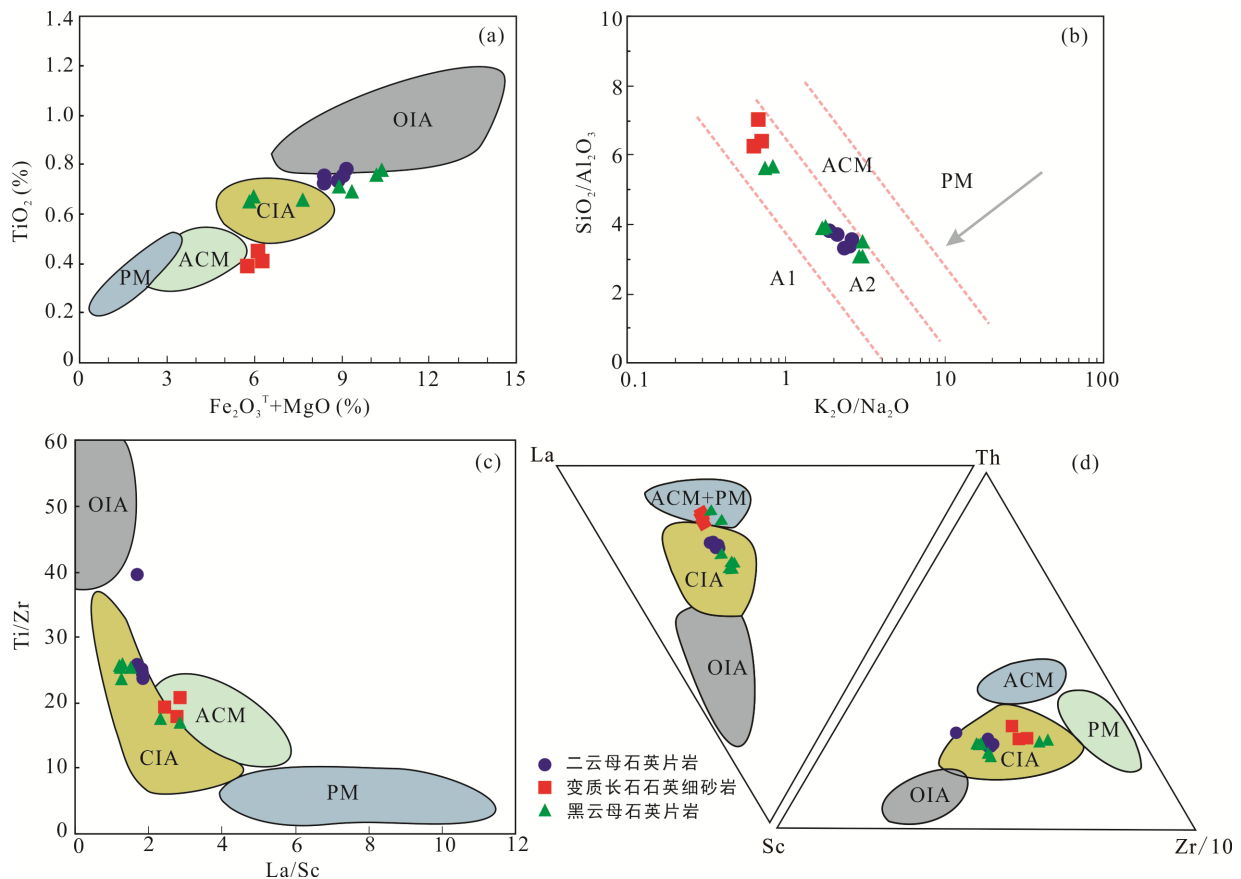
Fig.7 ICV vs. CIA plot for the low metamorphic clastic sedimentary rocks from the Bayankalashan Group in the Akesayi area

不同物源环境的碎屑沉积岩在主要元素上差异明显,尤其是 Fe₂O₃^T+MgO、TiO₂、K₂O/Na₂O、SiO₂/Al₂O₃ 等几个地球化学参数(Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1986; McLennan and Taylor, 1991)。由于巴颜喀拉山群的风化作用较弱,对其化学组分影响较小,因此上述几个参数可以作为判别构造背景的标识。

在 $TiO_2-(Fe_2O_3^T+MgO)$ 判别图中, 巴颜喀拉山群砂岩样品落在靠近活动大陆边缘的区域, 而两种片岩样品落在了大陆岛弧及其附近区域(图 8a), 总的来说暗示其为活动的、靠近大陆岛弧的构造环境(Bhatia and Crook, 1986)。而在 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 图解上, 巴颜喀拉山群所有样品均落在了演化弧区域(图 8b), 指示大陆岛弧构造环境。

碎屑沉积岩的微量元素, 尤其是 La、Th、Sc、Zr、Ti 等, 因其活动性较差, 更适合应用于碎屑沉积岩的构造环境判别。从大洋岛弧、大陆岛弧到活动大陆边缘, 再到被动大陆边缘, 碎屑沉积物具有明显不同的微量元素含量及稀土元素比值: 其 La、Ce、Th、U、Hf、 ΣREE 含量及 La_N/Yb_N 比值明显升高, δEu 则降低(Bhatia and Crook, 1986)。巴颜喀拉山群的浅变质碎屑岩普遍具有相对较低的 La(二云母石英片

岩、变质长石石英细砂岩以及黑云母石英片岩的平均值分别为 $30.2 \mu g/g$ 、 $22.8 \mu g/g$ 、 $24.1 \mu g/g$)、Ce(平均值分别为 $61.8 \mu g/g$ 、 $45.0 \mu g/g$ 、 $50.0 \mu g/g$)、 ΣREE (分别为 $156.69 \mu g/g$ 、 $109.57 \mu g/g$ 、 $124.02 \mu g/g$) 和 La_N/Yb_N 值(平均值分别为 7.68、9.17、7.22), δEu 平均值分别为 0.69、0.71、0.68, 这与大陆岛弧碎屑沉积物特征值较为接近($La=27 \pm 4.5 \mu g/g$, $Ce=59 \pm 8.2 \mu g/g$, $\Sigma REE=146 \pm 20 \mu g/g$, $La_N/Yb_N=11.0 \pm 3.6$, $\delta Eu=0.79 \pm 0.13$)(Bhatia, 1983, 1985), 说明这些浅变质碎屑岩可能形成于大陆岛弧相关盆地。在 Ti/Zr-La/Sc 以及 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解上, 除一个二云母石英片岩样品落在靠近大洋岛弧区域, 其余样品均落在大陆岛弧区域, 或大陆岛弧靠近活动大陆边缘区域(图 8c、d), 说明该套岩石可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地中。



OIA. 大洋岛弧; CIA. 大陆岛弧; ACM. 活动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘; A1. 弧区域(玄武质和安山质岩浆系列); A2. 演化的弧区域(长英质岩浆系列)。

图 8 阿克萨依地区巴颜喀拉山群浅变质碎屑岩构造环境判别图解(据 Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1986; Bhatia and Crook, 1986)

Fig.8 Discrimination diagrams of tectonic settings for the low metamorphic clastic sedimentary rocks from the Bayankalashan Group in the Akesayi area

综上, 阿克萨依地区巴颜喀拉山群地球化学特征指示了一种靠近大陆岛弧的构造背景。Liu et al. (2015) 的研究也认为晚三叠世古特提斯洋的俯冲使得甜水海地块以陆弧形式存在。松潘-甘孜-巴颜喀拉沉积盆地是古特提斯的主体范畴(孙鸿烈, 1996), 对盆地东部巴颜喀拉山群的研究均表明其形成于岛弧环境(佟鑫等, 2014; 崔加伟等, 2016)。两者相同的构造背景可能印证了前人关于甜水海地块为松潘-甘孜-巴颜喀拉盆地西延部分的观点。

4.3 巴颜喀拉山群的物源

碎屑岩的地球化学特征被广泛应用于物源示踪,

其中特征主量元素的比值对于限制物源类型具有重要作用(McLennan et al., 1993)。在 F_2 - F_1 图解上, 巴颜喀拉山群样品均落在了成熟大陆石英岩沉积物源区和长英质火成物源区之间(图 9a)。A-CN-K 图解也常被用来限定源区成分, 化学风化作用会使岩石成分在 A-CN-K 图解中将沿实线箭头方向变化, 而 K 质交代作用将使成分沿虚线箭头方向变化(图 9b)(Fedo et al., 1995)。巴颜喀拉山群浅变质岩落在花岗闪长岩到花岗岩风化趋势线之间, 但考虑到钾质交代作用, 我们认为其可能来源于相当于英云闪长岩或花岗闪长岩成分的物质源区。

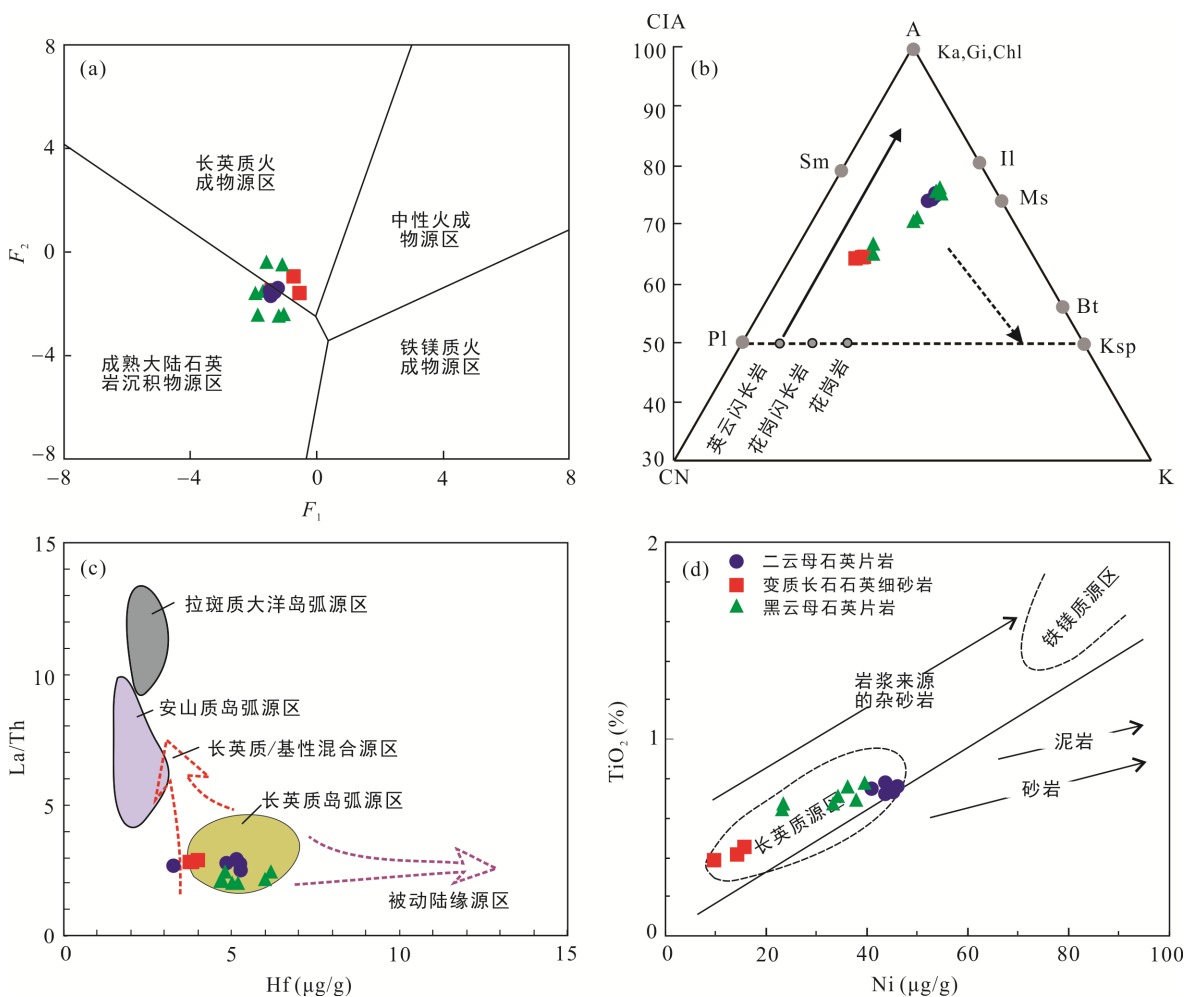


图 9 中 A、C、N、K 分别为 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 的摩尔数, 实线箭头指示理想的岩石风化趋势, 虚线箭头指示延时遭受 K 质交代蚀变方向。矿物代号: Pl. 斜长石; Ksp. 钾长石; Sm. 绢云母; Il. 伊利石; Ms. 白云母; Bt. 黑云母; Ka. 高岭石; Gi. 三水铝矿; Chl. 绿泥石。英云闪长岩, 花岗闪长岩, 花岗闪长岩数值来自 Condie, 1993。

(a) F_2 - F_1 图解(据 Roser and Korsch, 1986); (b) A-CN-K 图解(据 Fedo et al., 1995); (c) La/Th-Hf 图解(据 Floyd 和 Leveridge, 1987); (d) TiO_2 -Ni 图解(据 Floyd et al., 1990)。

图 9 阿克萨依地区巴颜喀拉山群浅变质碎屑岩源区物质组成判别图解

Fig.9 Discrimination diagrams of various source for the low metamorphic clastic sedimentary rocks from the Bayankalashan Group in the Akesayi area

微量元素(如 REE、Th、Sc、Zr 等)受风化、成岩及变质作用的影响不明显,在沉积碎屑和源岩中的含量与比值具有一致性,因此可以用来指示源岩属性(Nance and Taylor, 1976; Bhatia, 1983)。阿克萨依地区巴颜喀拉山群的稀土元素球粒陨石标准化曲线与上地壳极为相似(Rudnick and Gao, 2003)(图 3b),显示出明显的轻稀土富集和负 Eu 异常的特点,暗示其源区是以花岗质上地壳为主(汪正江等, 2000)。在 La/Th-Hf 图解上,绝大多数样品落在了长英质岛弧区域(图 9c),表明其源区物质可能以中-酸性岛弧火山岩为主;而在 TiO₂-Ni 图解上,所有样品也都落在了长英质源区(图 9d)。

构造背景分析表明阿克萨依地区巴颜喀拉山群沉积于靠近大陆岛弧的盆地环境中,这种构造环境下形成的碎屑沉积物主要来自长英质岩浆岩或火山岩,这与该套岩石地球化学特征所指示的碎屑物源性质相吻合。研究区内巴颜喀拉山群的化学蚀变指数(CIA)及成分变异指数(ICV)均较低,同时岩相学分析表明其含有长石、黑云母等不稳定组分,分选磨圆均较差,均表明巴颜喀拉山群碎屑岩属于快速剥蚀沉积的近源堆积物。因此,该套巴颜喀拉山群的碎屑沉积物主要是来自附近的长英质岩浆岩或火山岩。

锆石作为最稳定的矿物之一,抗风化能力强,受沉积分选过程影响较小,其 U-Th-Pb 同位素体系封闭温度高,受后期构造热事件影响较小(Dodson et al., 1998)。因此,碎屑锆石年龄谱可以为分析物质来源提供重要信息,结合盆地不同时代岩石的分布情况,可以达到示踪源区的目的(闫义等, 2002)。本次对阿克萨依地区巴颜喀拉山群的研究得到 206 颗显生宙碎屑锆石年龄,占总数的 83.4%,锆石 CL 图像显示大部分为岩浆锆石,锆石形态多呈半自形、柱状,反映了物源区较近,碎屑搬运距离短,暗示巴颜喀拉山群的碎屑物质主要来自西昆仑造山带内。

本次研究中我们还得到了 41 个前寒武纪碎屑锆石,这些锆石年龄大部分分布在 U-Pb 年龄谱和线之下(图 4),存在不同程度的 Pb 丢失。这些锆石年龄表明巴颜喀拉山群有少量前寒武纪物质加入。前人研究表明, Rodinia 超大陆裂解过程中,塔里木板块、以及扬子、华北、印支等地块并没有完全与印度和澳大利亚分离,而是统一汇聚到了冈瓦那北缘(Metcalf, 2011, 2013)。结合锆石磨圆度较高的特征,我们认为该地层的前寒武纪物质可能来自冈瓦那大

陆北缘。

5 结 论

(1) 阿克萨依地区巴颜喀拉山群最年轻锆石年龄峰为 246 Ma, 结合侵入该套地层中的 209.6±1.5 Ma 岩体年龄,我们认为该区巴颜喀拉山群沉积时代在 209~246 Ma 之间。

(2) 该区巴颜喀拉山群碎屑岩地球化学特征表明,原岩成熟度中等,遭受相对较弱的风化作用,沉积于大陆岛弧相关环境中,与松潘-甘孜-巴颜喀拉盆地东部相同的构造背景可能暗示甜水海地块为盆地西延部分。

(3) 岩相学、地球化学、锆石形态及年龄特征分析表明,研究区巴颜喀拉山群碎屑物源主要来自于西昆仑造山带内与原-古特提斯洋演化有关的长英质岩浆岩或火山岩,此外还有少量前寒武纪碎屑可能来自冈瓦那大陆北缘。

致谢: 感谢课题组成员在采样过程中的帮助;河海大学张传林教授和另一位匿名审稿人认真审阅了本文并提出宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

- 崔加伟, 郑有业, 田立明, 孙君一, 董俊. 2016. 松潘-甘孜造山带北部岗龙地区巴颜喀拉山群地球化学特征和锆石 U-Pb 年代学特征: 对物源及构造环境的启示. 矿物岩石地球化学通报, 35(4): 719-742.
- 刘飞. 2006. 松潘-甘孜及龙门山地区碎屑沉积岩地球化学研究. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1-85.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558.
- 任纪舜, 肖黎薇. 2004. 1: 25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱. 地质通报, 23(1): 1-11.
- 陕西省地质调查院. 2006. 1: 25 万区域地质调查报告康西瓦福.
- 孙鸿烈. 1996. 青藏高原研究的新进展. 地球科学进展, 11(6): 18-24.
- 佟鑫, 周汉文, 朱云海, 林启祥, 李益龙, 毛武林, 张赞响, 吴继光, 马智勇. 2014. 青海格尔木市黑海地区三叠系巴颜喀拉山群变质碎屑岩地球化学特征及物源分析. 岩石矿物学杂志, 33(4): 630-644.
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. RESolution 激光剥蚀系统在微量元素原位微区

- 分析中的应用. *地球化学*, 40(1): 83–98.
- 汪玉珍, 方锡廉. 1987. 西昆仑山、喀喇昆仑山花岗岩类时空分布规律的初步探讨. *新疆地质*, 5(1): 9–24.
- 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 2000. 物源分析的研究与展望. *沉积与特提斯地质*, 20(4): 104–110.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 张宗清, 王涛, 卢海峰. 2003. 从周边造山过程判断松潘-甘孜的构造性质//青藏高原及邻区地质与资源环境学术讨论会论文摘要汇编. 成都: 124.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 慕生禄, 丘增旺, 闫庆贺, 李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义. *地球化学*, 46(1): 66–80.
- 魏小鹏. 2018. 西昆仑造山带三叠纪花岗岩类时空分布、岩石成因及其构造背景. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文: 6–10.
- 许志琴, 侯立玮, 王大可, 王宗秀. 1990. 中国西南部松潘-甘孜中生代碰撞型造山带的薄壳构造及前陆逆冲系. *中国地质科学院院报*, 20(1): 126–129.
- 闫义, 林舸, 王岳军, 郭锋. 2002. 盆地陆源碎屑沉积物对源区构造背景的指示意义. *地球科学进展*, 17(1): 85–90.
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. *中国科学(D辑)*, 37(2): 145–154.
- 朱迎堂. 2006. 可可西里-巴颜喀拉三叠纪沉积盆地的形成及演化. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1–20.
- Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology*, 216: 249–270.
- Berry R F, Jenner G A, Meffre S and Tubrett M N. 2001. A North American provenance for Neoproterozoic to Cambrian sandstones in Tasmania? *Earth and Planetary Science Letters*, 192(2): 207–222.
- 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 Australian Paleozoic graywackes and mudrocks-provenance and tectonic control. *Sedimentary Geology*, 45(1–2): 97–113.
- Bhatia M R and 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.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1–2): 155–170.
- 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.
- Cox R, Lowe D R and 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.
- Ding L, Yang D, Cai F L, Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, Zhang L Y, Zhang Q H, Lai Q Z, Yue Y H and Shi R D. 2013. Provenance analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi turbidites in northern Tibet: Implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34–48.
- Enkelmann E, Weislogel A, Ratschbacher L, Eide E, Renno A and Wooden J. 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study. *Tectonics*, 26(4). doi: 10.1029/2006TC002078
- Fedo C M, Nesbitt H W and Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary-rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Fedo C M, Sircombe K N and Rainbird R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277–303.
- Floyd P A and 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: 531–542.
- Floyd P A, Leveridge B E, Franke W, Shail R and Dorr W. 1990. Provenance and depositional environment of rhenohercynian synorogenic greywackes from the Giessen-Nappe, Germany. *Geologische Rundschau*, 79(3): 611–626.
- Gu X X. 1994. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys-turbidites in northwestern Sichuan, China — Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(21): 4615–4631.
- Hofmann A. 2005. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt:

- Implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times. *Precambrian Research*, 143(1–4): 23–49.
- Hu J, Wang H, Huang C Y, Tong L X, Mu S L and Qiu Z W. 2016. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 1–25.
- Kalsbeek F, Frei D and Affaton P. 2008. Constraints on provenance, stratigraphic correlation and structural context of the Volta basin, Ghana, from detrital zircon geochronology: An Amazonian connection? *Sedimentary Geology*, 212(1–4): 86–95.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
- Liu Z, Jiang Y H, Jia R Y, Zhao P and Zhou Q. 2015. Origin of Late Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Tibet Plateau, Northwest China: Implications for Paleo-Tethys evolution. *Gondwana Research*, 27(1): 326–341.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21: 169–200.
- McLennan S M and Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *The Journal of Geology*, 99(1): 1–21.
- Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. *Gondwana Research*, 19(1): 3–21.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33.
- Nance W B and Taylor S R. 1976. Rare earth element patterns and crustal evolution — I. Australian post-Archaean sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(12): 1539–1551.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Rogers J J W. 1996. A history of continents in the past three billion years. *Journal of Geology*, 104(1): 91–107.
- Roser B P, Coombs D S, Korsch R J and Campbell J D. 2002. Whole-rock geochemical variations and evolution of the arc-derived Murihiku Terrane, New Zealand. *Geological Magazine*, 139(6): 665–685.
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Rudnick R and Gao S. 2003. The role of lower crustal recycling in continent formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18): A403.
- Sengor A M C. 1985. East Asian tectonic collage. *Nature*, 318(6041): 16–17.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Wang C L, Zhang L C, Dai Y P and Lan C Y. 2015. Geochronological and geochemical constraints on the origin of clastic meta-sedimentary rocks associated with the Yuanjiaocun BIF from the Lüliang Complex, North China. *Lithos*, 212–215: 231–246.
- Xiao W J, Windley B F, Chen H L, Zhang G C and Li J L. 2002. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan Plateau. *Geology*, 30(4): 295–298.
- Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, Jian P, Liu C Z, Yuan C and Sun M. 2005. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: A Paleozoic-early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. *Journal of Geology*, 113(6): 687–705.
- Yang D B, Xu W L, Xu Y G, Wang Q H, Pei F P and Wang F. 2012. U-Pb ages and Hf isotope data from detrital zircons in the Neoproterozoic sandstones of northern Jiangsu and southern Liaoning Provinces, China: Implications for the Late Precambrian evolution of the southeastern North China Craton. *Precambrian Research*, 216: 162–176.
- Yuan C, Sun M, Zhou M F, Zhou H, Xiao W J and Li J L. 2003. Absence of Archaean basement in the South Kunlun Block: Nd-Sr-O isotopic evidence from granitoids. *Island Arc*, 12(1): 13–21.
- Zhang C L, Zou H B, Ye X T and Chen X Y. 2018. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: New

evidence from field observations and zircon U-Pb geochronology. *Tectonophysics*, 723: 27–40.
Zhou D and Graham S A. 1996. Extrusion of the Altyn Tagh

wedge: A kinematic model for the Altyn Tagh fault and palinspastic reconstruction of northern China. *Geology*, 24(5): 427–430.

Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Ages of the Bayankalashan Group in the Tianshihai Terrain of the West Kunlun Orogenic Belt: Implication for its Provenance and Tectonic Environment

DONG Rui^{1,2}, WANG He^{1*}, YAN Qinghe^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2}, WEI Xiaopeng^{1,2},
LI Pei^{1,2} and ZHOU Kailin^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Songpan-Ganzi-Bayankala Basin is located in the northeastern part of the Tibetan Plateau, the formation of which, as well as the dominant strata, the Bayankalashan Group, is closely related to the evolution of Tethys. Study of the Bayankalashan Group could provide insight into the tectonic evolution of both the basin and the Tethys. However, most of the previous studies focused on the eastern part of the basin, while the western part is not well documented. As an important part of regional stratigraphy system, the Bayankalashan Group sedimentary rocks are also widely distributed in the Tianshuihai terrane, which is tectonically located in the western part of the Songpan-Ganzi-Bayankala Basin. Here, we present the first systematic geochemistry and zircon U-Pb study of the Bayankalashan Group in the Akesayi area, Tianshuihai terrain. These data are used to constrain the age and provenance of the Bayankalashan Group in this area, and discuss the tectonic evolution and background. The youngest detrital zircon U-Pb peak age of the Bayankalashan Group and the age of granite rocks which intrude it constrain a forming age of 209 – 246 Ma for the Bayankalashan Group. Their low index of compositional variability (ICV~1) and chemical index of alteration (CIA<75) imply relatively low maturity and weak chemical weathering for their source. The characteristics of trace element contents and ratios (e.g., La, Ce, Th, U, Hf, Σ REE and La_N/Yb_N) for rocks from the Bayankalashan Group are similar to clastic rocks deposited in continental arc setting. The similar sedimentary age and environment for the overall sedimentary rocks in the Songpan-Ganzi-Bayankala Basin support that Tianshuihai terrane is the western part of the Songpan-Ganzi-Bayankala Basin. The study of petrographical facies, geochemistry, morphology of zircon and its age spectrum indicate that the sediments were derived from felsic rocks of the West Kunlun Orogenic Belt related the Proto- and Paleo-Tethys evolution. Besides, a small amount of Precambrian components may have come from the northern margin of Gondwana.

Keywords: West Kunlun Orogenic Belt; Bayankalashan Group; geochemistry; detrital zircon U-Pb dating; provenance; tectonic background