

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.007

新疆北部友谊峰一带喀纳斯群碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对阿尔泰造山带构造演化的启示

王星^{1,2}, 蔺新望^{1,2}, 张亚峰^{1,2}, 赵端昌^{1,2}, 赵江林^{1,2}, 仵桐^{1,2}, 刘坤²WANG Xing^{1,2}, LIN Xinwang^{1,2}, ZHANG Yafeng^{1,2}, ZHAO Duanchang^{1,2}, ZHAO Jianglin^{1,2},
WU Tong^{1,2}, LIU Kun²

1.陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068;

2.陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054

1. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:新疆北部阿尔泰山西段友谊峰一带发育的喀纳斯群碎屑沉积岩中保留了大量的古陆缘演化及沉积、变质等地质信息。采集了2个层位的碎屑锆石进行同位素年龄研究,结果显示:2套碎屑岩的锆石 U-Pb 年龄分布特征相近,最年轻的岩浆锆石年龄分别为 546 ± 4 Ma 和 545 ± 4 Ma,代表了沉积时代的下限;较老的锆石年龄可分为太古宙的 3063 ± 16 Ma、 2548 ± 18 Ma 和 2541 ± 18 Ma,古—中元古代的 2223~1463 Ma,新元古代的 985~781 Ma,据此推断,沉积物源存在前寒武纪结晶基底;较新的锆石变质年龄为 421~429 Ma,与阿尔泰地区强烈的岩浆活动时间相近,可能与地层遭受后期的热液变质事件有关。结合地质构造演化,表明新疆北部地区大致经历了太古宙陆核形成阶段、Columbia 超大陆形成和演化阶段、Rodinia 超大陆汇聚和裂解阶段、震旦纪—寒武纪复理石沉积阶段,以及加里东期剧烈岩浆活动阶段。

关键词:碎屑锆石 U-Pb 年龄;喀纳斯群;构造演化;阿尔泰造山带;新疆北部;地质调查工程

中图分类号:P597⁺.3;P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)09-1574-15

Wang X, Li X W, Zhang Y F, Zhao D C, Zhao J L, Wu T, Liu K. Detrital zircon U-Pb age of the Kanas Group from the Friendship Peak region in northern Xinjiang and its implications for the tectonic evolution of the Altay Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1574-1588

Abstract: A large amount of geological information about the evolution, sedimentation and metamorphism of paleo-continent margin is retained in fragment sedimentary rocks from the Kanas Group, which is developed in the Friendship Peak region in the western section of the Altay Mountains, northern Xinjiang. The detrital zircon samples were collected in two rock formations for the study of isotopic dating. The results showed that the distribution characteristics of zircon U-Pb age in the two sets of clastic rocks were similar. The youngest magmatic zircon ages were 546 ± 4 Ma and 545 ± 4 Ma, respectively, which represents the lower limit of the sedimentary age. The relatively older zircon ages can be divided into three categories: 3063 ± 16 Ma, 2548 ± 18 Ma and 2541 ± 18 Ma in Archean Eon, 2223~1463 Ma in Pale-Meso Proterozoic Era, 985~781 Ma in Neoproterozoic Era, which implies that the existence of Precambrian crystalline basement in the sediment source region. The relatively newer zircon age was 421~429 Ma, which is similar to the time of the strong magmatic activities in Altai region. It may be related to the stratum suffering from later hydrothermal deterioration events. The geological structure evolution in northern Xinjiang can be divided into five stages: the formation stage of the Archean continental nucleus, the formation and evolution stage of the Columbia supercontinent, the assembly and breakup stage of the Rodinia

收稿日期:2019-12-12;修订日期:2020-11-10

资助项目:陕西省公益性地质调查项目《陕西省南秦岭成矿带佛坪隆起南缘茅坪地区基础地质调查》(编号:202102)、《陕西省潼关县幅 1:25 万区域地质调查(修测)》(编号:202001)和中国地质调查局项目《阿尔泰成矿带喀纳斯和东准地区地质矿产调查》(编号:DD20160006)

作者简介:王星(1988-),男,工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:star_cug@126.com

supercontinent, the deposition stage of Sinian-Cambrian flysch, the stage of severe magmatic activity in Caledonian.

Key words: detrital zircon U-Pb age; Kanas Group; tectonic evolution; Altay Orogenic Belt; geological survey engineering; Northern Xinjiang

中亚造山带作为显生宙最大的增生型造山带,其形成机制和动力学过程一直是地球科学研究的前沿和热点领域之一。中国阿尔泰造山带作为中亚造山带的重要组成部分,因其复杂的构造运动、岩浆演化,以及丰富的有色金属、稀有金属矿产,受到国内外学者的广泛关注^[1-20]。近年来,岩浆岩的地球化学、年代学及 Sr-Nd 同位素研究揭示,北疆阿尔泰存在明显的垂直增生和侧向增生^[21-22],但阿尔泰造山带是否存在前寒武纪结晶基底一直存在较大争议^[23-34]。新疆北部阿尔泰山西段广泛出露的沉积地层,研究程度较低,尤其是喀纳斯一带出露的浅变质碎屑沉积岩,其岩性简单,变质程度较低,是碎屑沉积物成因和地壳演化研究的较好对象,但现有资料的研究结果对喀纳斯群的时代归属及其形成环境仍有较大争议:一种观点认为,喀纳斯群的形成时代应为震旦纪—寒武纪,其构造背景属被动陆缘的沉积环境^[23, 35-36];另一种观点则认为,这套碎屑岩的沉积时代归属中奥陶世—早泥盆世,沉积环境属活动大陆边缘^[37-38]。

碎屑沉积岩包含了丰富的源区物质组成、构造环境及早期的地壳生长演化信息,其地球化学研究已被广泛地应用于制约物源区特征、恢复沉积盆地环境和揭示碎屑沉积岩成因及古风化条件。由于砂岩和泥岩中元素含量较均匀且微量元素含量较高,已经成为碎屑沉积岩地球化学研究的首要对象,而浅变质碎屑沉积岩基本保留了原岩信息,近年来也被广泛应用于碎屑沉积物成因和地壳演化研究。因此,新疆北部阿尔泰山西段出露的浅变质碎屑沉积岩,可作为阿尔泰造山带构造演化的重要载体。笔者在喀纳斯以北的友谊峰一带系统采集了碎屑沉积岩的同位素年龄样品进行了研究,获得了丰富的碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄信息,为研究区域构造演化提供了可靠的年代学资料。

1 区域地质概况

阿尔泰造山带沿北西—南东向横贯中国—蒙古—俄罗斯—哈萨克斯坦四国,全长约 2000 km,在中国境内的部分呈北西—南东向展布,长约 500 km,大

地构造位置属西伯利亚板块南缘^[23]。中国阿尔泰造山带以红山嘴—诺尔特断裂和阿巴宫—库尔特断裂为界,由北向南可划分为北阿尔泰地块、中阿尔泰地块和南阿尔泰地块(图 1-a)^[22, 39]。北阿尔泰块体主要由震旦系—寒武系、上泥盆统—下石炭统火山—沉积岩组成,并发育晚加里东期花岗岩;中阿尔泰块体主要由震旦系—下古生界深变质岩系和奥陶纪—侏罗纪侵入岩组成,其中白哈巴县至阿勒泰市以北出露大量的浅变质碎屑沉积岩,可能是在前寒武纪基底之上演化的产物,具有微陆块的特点^[21-22, 28, 39]。南阿尔泰块体主要由元古宇片麻岩和志留纪—石炭纪火山—沉积岩系组成。

中阿尔泰地块大面积出露的喀纳斯群,主要分布于阿尔泰地区喀纳斯湖—友谊峰一带。研究区位于阿尔泰山西段友谊峰西南部(图 1-b)。友谊峰地处中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、蒙古四国接壤地带,交通条件极差,地质研究程度低。笔者通过野外实地地质调查,对区内的喀纳斯群进行了研究。该地层整体为一套巨厚的浅变质陆源碎屑岩,主要岩性为灰绿色、绿灰色、灰色薄层—中薄—中层状细砂岩、粉砂岩,夹极薄层状泥岩。该地层在研究区分布广泛,由东向西均有出露,南北向延伸较远,向南延伸至喀纳斯湖以南,向北延伸至境外。根据岩石类型、岩性组合、结构构造等特征将喀纳斯群划分为 3 个亚群(图 2):第一亚群主要为一套成熟度较高的细砂、粉砂质碎屑沉积物,韵律层发育,以细砂岩与粉砂岩交互出现为特征,局部有砂岩透镜体产出(图版 I);第二亚群主要岩性组合为长石英砂岩、绢云母细砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、粉砂质灰岩等,地层整体呈由粗到细的韵律特征;第三亚群以细砂岩、粉砂岩及泥岩的反复出现为特征,发育韵律特征,各亚群之间呈整合接触关系。受后期应力作用,地层中可见断层、褶皱等构造变形,但整体变质程度较低,尤其是砂岩、粉砂岩等,是研究喀纳斯群形成与阿尔泰山构造演化的有利层位。

2 岩石学特征

喀纳斯群整体为一套厚度巨大、岩性单一的类

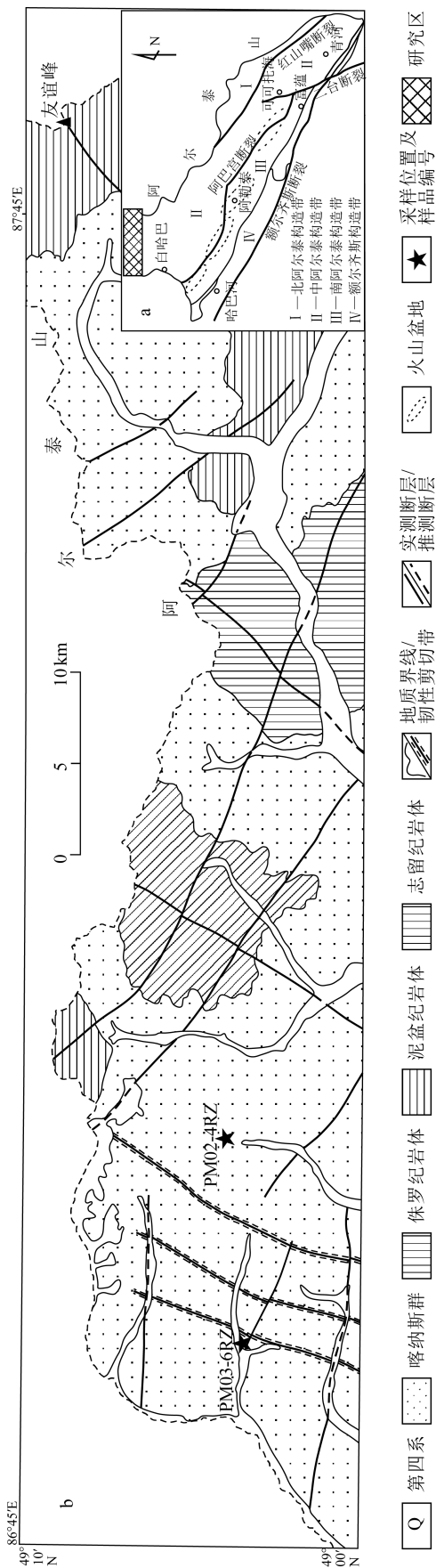


图1 研究区地质简图^①

Fig. 1 Generalized geologic map of study area

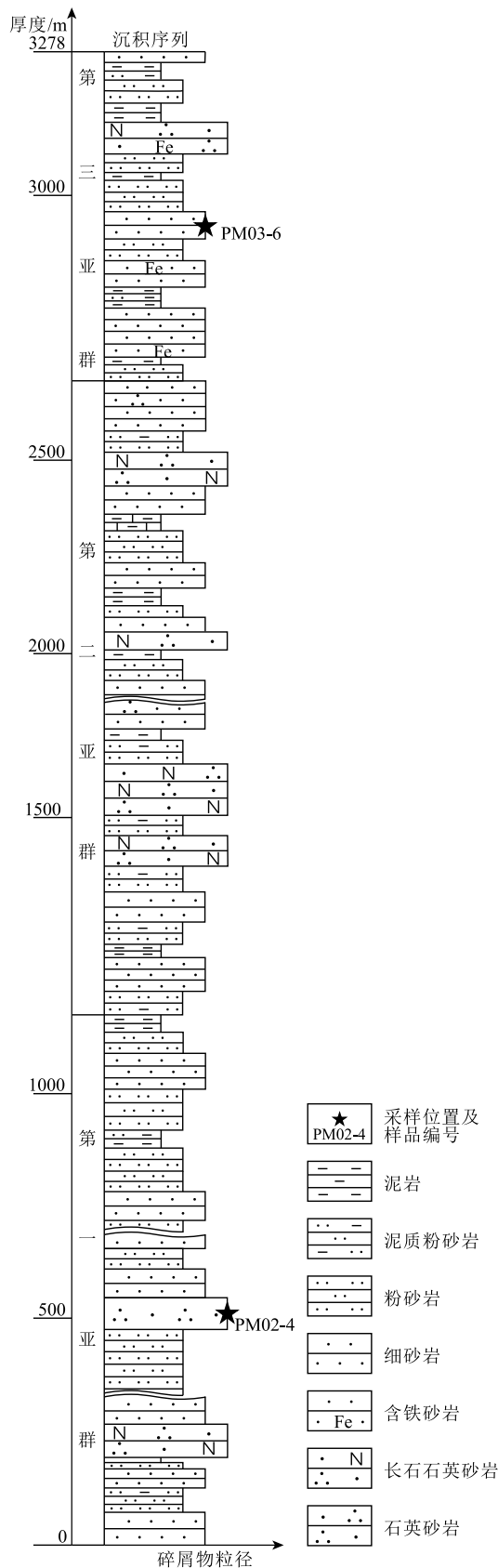


Fig. 2 Columnar section of Kanas Group

图版 I Plate I



a. 砂岩层中的透镜体; b. 砂岩与粉砂岩韵律层; c. 粉砂岩与泥岩野外特征; d. 石英砂岩镜下特征; e. 石英杂砂岩镜下特征; f. 粉砂质泥岩(板岩)镜下特征

复理石碎屑沉积岩,呈灰绿色、灰色,薄层—中厚层状,主要岩性为石英杂砂岩、石英砂岩(图版 I-a)、粉砂岩(图版 I-b)、泥质粉砂岩(图版 I-c)、千枚状泥质粉砂岩、泥岩夹层等(图版 I-c)。岩石变质程度较低,仅达到低绿片岩相。受区域变质作用影响,碎屑中的石英普遍发育变质重结晶(图版 I-d),形成变晶粒状,部分仍显示原次棱角状特点(图版 I-e)。本次在喀纳斯群中系统采集了各类样品,其中,薄片鉴定结果与野外定名基本一致。

变质石英砂岩:灰色,变余细粒砂状结构,块状构造。岩石中碎屑成分以石英为主,含量 75%~85%,斜长石、钾长石含量较少,1%~3%,含少量绿

帘石、电气石、锆石、褐铁矿等,粒径大小 0.02~0.03 mm、0.1~0.2 mm、0.25~0.3 mm 不等。填隙物主要为杂基成分,包括绢云母、绿泥石等,含量约 15%。岩石受变质作用影响,碎屑石英显示重结晶特征(图版 I-d),原生形态似显示次圆状特征,粒度大小混杂不等,磨圆度略好,分选性差,成熟度低。填隙物原为粘土矿物,经变质作用形成绢云母、绿泥石等细小鳞片杂基,另有少部分隐晶硅质石英胶结物,由于重结晶呈大小 0.006~0.008 mm 的颗粒与杂基混杂,形成基底式胶结类型、颗粒支撑结构。

变质硅质石英杂砂岩:灰褐色,变余中粒砂状

结构,层状构造。岩石中碎屑成分以石英为主,含量为 60%~65%,斜长石、硅质岩屑含量较少,为 2%~3%,以及少量白云母、电气石、锆石、褐铁矿等,粒径大小为 0.3~0.5 mm 及 0.1~0.15 mm。填隙物主要为杂基成分,包括绢云母、绿泥石及隐晶石英胶结物,含量为 30%~35%。岩石受变质作用影响,碎屑石英显示重结晶特征,原生次圆状和个别次棱角状形态似有残留(图版 I-e),磨圆度略好,分选性差,成熟度低。填隙物原为粘土矿物,经变质作用形成绢云母、绿泥石等细小鳞片杂基,另有少部分隐晶硅质石英胶结物,由于重结晶作用形成 0.006~0.008 mm 的颗粒与杂基混杂,呈基底式胶结类型、杂基支撑结构。

变质石英粉砂岩:深灰色,变余粉砂结构,层状构造。岩石主要成分为石英粉砂碎屑和绢云母杂基填隙物,石英含量约为 85%,绢云母含量约为 12%,另有少量炭质。岩石经区域变质作用,原生石英粉砂变质重结晶造成部分石英呈变晶粒状,大部分仍残余原生次棱角状特点,粒径大小为 0.03~0.05 mm。原粘土矿物变质重结晶形成绢云母细小鳞片,与石英定向分布,呈层状构造。

变质绢云石英粉砂岩:深灰色,显微鳞片变余粉砂结构,层状构造。岩石主要成分为石英粉砂碎屑和绢云母杂基填隙物,石英含量为 60%~70%,绢云母含量为 25%~35%,以及少量绿泥石等,微量矿物可见磁铁矿、电气石等。岩石经区域变质作用,原石英粉砂发生变质重结晶,造成大部分粉砂石英重结晶为变晶粒状,仅少数残余原次棱角状特点,粒径大小为 0.03~0.05 mm;粘土矿物填隙物经变质重结晶形成绢云母鳞片,与石英平行定向排列,呈层状构造。

粉砂绢云绿泥板岩:灰绿色,变余粉砂显微鳞片变晶结构,板状构造。岩石原岩为粉砂质粘土岩类,经区域变质作用,原生粘土矿物变质重结晶形成绿泥石、绢云母等鳞片,含量为 70%~75%;石英含量为 20%~25%,粒径大小以 0.03~0.06 mm 为主,个别为 0.1~0.15 mm,受变质应力作用,两者均匀混合,平行定向排列,形成板状构造(图版 I-f)。岩石中含褐铁矿微粒,呈褐色,原生可能为含铁碳酸盐矿物。此外,可见微量斜长石、钾长石、白云母、电气石等。

绢云绿泥板岩:灰绿色,显微鳞片变晶结构,板

状构造。岩石原岩为粘土岩类,经区域变质作用,粘土矿物发生变质重结晶形成绿泥石、绢云母等细小鳞片,含量为 85%~90%,变质应力作用造成鳞片矿物明显平行定向均匀排列,形成板状构造。另含少量石英粉砂,大小为 0.02~0.03 mm,个别可达 0.15~0.3 mm,在岩石中分布不均匀。

3 样品采集和数据处理

3.1 样品采集

本次在友谊峰一带的喀纳斯群中采集了 2 套碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄样品,岩性分别为石英砂岩(PM02-4)和细粉砂岩(PM03-6),对应的地理坐标分别为北纬 49°03′46″、东经 87°03′18″和北纬 49°03′24″、东经 86°54′09″。

3.2 数据处理

每个样品约采集 15 kg,按常规方法粉碎,用磁选、电磁选方法分选得到重砂矿物,再淘洗获得锆石精矿,最后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石晶体作为锆石 U-Th-Pb 同位素测定对象。首先将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露。锆石的阴极发光(CL)照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石微区原位 U-Th-Pb 同位素年龄分析在中国地质调查局西安地质调查中心微区分析实验室进行,分析仪器为 Agilent7500a 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 24 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用标准锆石 GJ 为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 为外标、 ^{29}Si 为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 Glitter (Version4.0, Mcquaire University),并采用 Anderson 软件对测试数据进行普通铅校正^[40],年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot (2.49 版) 软件完成^[41]。详细的实验原理和流程及仪器参数见参考文献[42]。

4 分析结果

喀纳斯群石英砂岩和细粉砂岩中的碎屑锆石外形呈浑圆状或双锥状,从阴极发光图像(图 3)看,

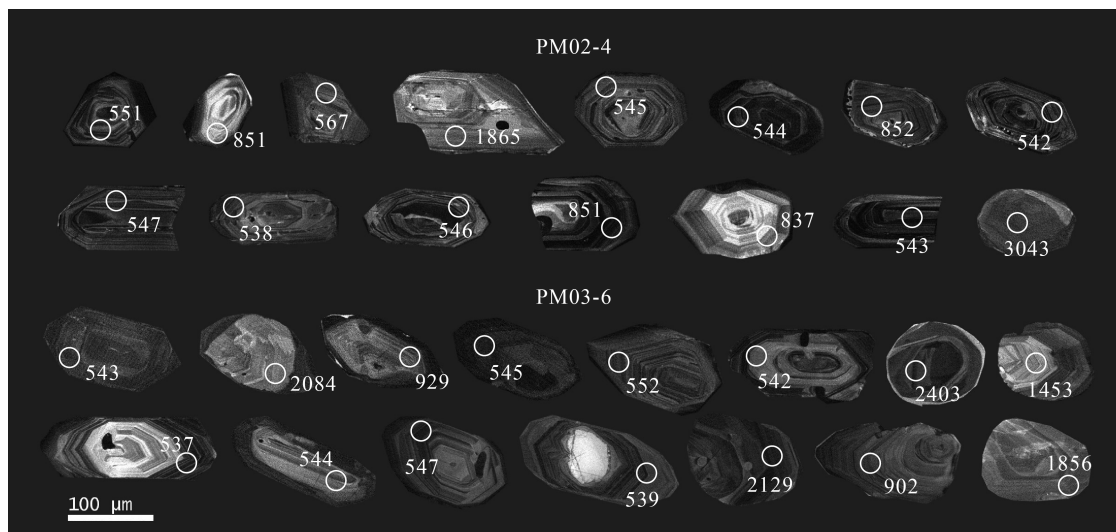


图 3 喀纳斯群浅变质碎屑岩典型锆石阴极发光 (CL) 图像及 U-Pb 同位素年龄 (Ma)

Fig. 3 CL images and U-Pb isotopic ages (Ma) of representative zircons from the epimetamorphic clastic rocks of the Kanas Group

锆石形态呈棱角状, 大多数振荡环带明显, 个别内部为均质或弱环带结构, 长 $80 \sim 150 \mu\text{m}$, 宽 $50 \sim 100 \mu\text{m}$, 个别可达 $150 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 整体长宽比值较小。少量锆石具有一定的磨圆度, 可能是长距离搬运或沉积再旋回的结果。大体可分为 3 类: ①核部与边缘都发育振荡环带或弱振荡环带, 为岩浆成因锆石; ②核部具有继承锆石的残留核, 但边部具有代表岩浆结晶年龄的振荡环带; ③少量锆石显示面状分带结构或均质无分带结构, 可能是经历了重结晶的变质成因锆石, 其 U-Pb 年龄可能记录的是变质热时间年龄。除均质无分带的锆石外, 测点都位于具有明显振荡环带的部位, Th、U 等微量元素含量不同, CL 图像强弱不等, 少量颜色较暗^[43-44]。

对 2 组碎屑锆石分别进行了 60 次有效分析, 测试结果见表 1 和表 2。根据碎屑锆石年龄范围, 对锆石年龄大于 1000 Ma 的样品, 因含大量的放射性成因铅, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄, 其年龄谐和度为 $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})$; 而对于年龄小于 1000 Ma 的数据, 由于可用于测试的放射性成因铅含量低和普通锆石校正的不确定性, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄, 谐和度使用 $(^{207}\text{Pb}/^{237}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})$ ^[45-46]。120 个测试点中, 118 个年龄数据的谐和度集中在 95%~108% 之间, 符合精度要求 (90%~110%); 不谐和的 2 个年龄数据, 1 个为老年数据 (谐和度 113%), 另 1 个为变质锆石 (谐和度

111%), 不谐和程度较低, 可作为参考数据。

样品 PM02-4 中碎屑锆石数据在谐和图上出现 3 段式聚集区 (图 4-a), 分别为: 第一组共 43 个测点, 该阶段锆石具典型的岩浆锆石特征, 晶形较完整, 呈自形—半自形短柱状, 说明物源区较近、搬运距离较短^[47], 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 536~567 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $546 \pm 4 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD = 0.40); 第二组共 9 个点, 锆石晶形保存较好, 遭受变质作用和机械破碎作用较弱, 部分有磨圆化, 说明物源区较近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 837~887 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $858 \pm 13 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD = 0.68); 第三组有 5 颗锆石, 给出了古元古代的年龄, 锆石磨圆度较高, 说明经历了一定距离的搬运, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在 1747~2223 Ma 之间。另获得 2 组分散的锆石年龄: 年龄值较新的锆石, 边部发育明显的退变质亮边, 且环带不清, 具有重结晶的特征, 时代为早志留世 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $424 \pm 12 \text{ Ma}$); 较老的 1 颗为较谐和的太古宙岩浆锆石 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $3043 \pm 53 \text{ Ma}$)。

样品 PM03-6 中碎屑锆石数据在谐和图上也可分为 3 段式 (图 4-b), 分别对应: 第一组共 38 个测点, 锆石具典型的岩浆锆石特征, 晶形较完整, 呈自形—半自形短柱状, 说明物源区较近、搬运距离较短^[47], 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 536~567 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $545 \pm 4 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD = 0.26);

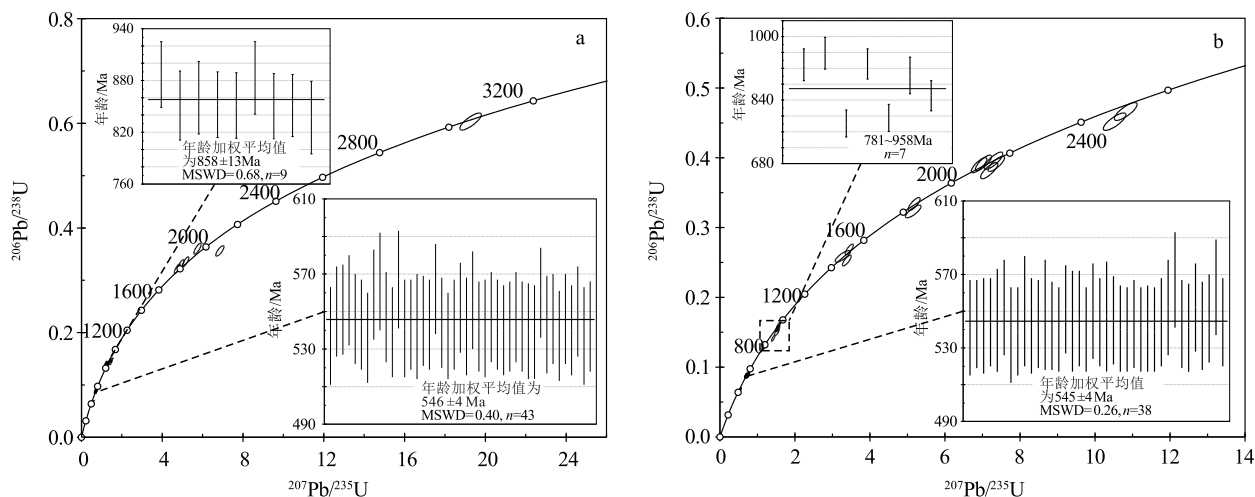


图4 PM02-4(a)和PM03-6(b)碎屑岩锆石U-Pb谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectra of detrital zircons from PM02-4(a) and PM03-6(b)

第二组共7个测点,锆石晶形保存较好,遭受变质作用和机械破碎作用较弱,部分有磨圆化,说明物源区较近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为781~985 Ma;第三组有10颗锆石,给出了古—中元古代的年龄,锆石磨圆度较高,说明经历了一定距离的搬运,较早的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 在2080~2184 Ma之间,中间的2颗锆石年龄分别为 1841 ± 20 Ma、 1891 ± 74 Ma,较晚的3颗锆石年龄为1463~1569 Ma。另外2组分散的锆石年龄分别为:较新的变质锆石,边部发育明显的退变质亮边,且环带不清,具有重结晶的特征,时代属早志留世($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 427 ± 10 Ma、 421 ± 9 Ma、 429 ± 10 Ma);较老的2颗为较谐和的太古宙岩浆锆石($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2541 ± 18 Ma和 2548 ± 18 Ma)。

5 讨论

本次在新疆阿尔泰友谊峰一带的喀纳斯群碎屑沉积岩中获得了丰富的碎屑锆石年龄信息。在同位素年龄分布图(图5)上,2个样品具有明显相似的年龄数据,暗示碎屑沉积岩的沉积物源相同。其年龄值总体可分为3类:最年轻的岩浆成因碎屑锆石年龄、较老的沉积物源锆石年龄和较新的锆石变质年龄。其中,年轻的岩浆成因碎屑锆石年龄十分集中,且在比例上具有绝对优势,暗示该期地质体为碎屑沉积物的主要来源;较老的沉积物源区锆石年龄分布范围广泛,包括太古宙的3100 Ma和

2500 Ma,古元古代的2100 Ma和1800 Ma,中元古代的1400 Ma左右,新元古代的700~1000 Ma,这些数据为研究区古基底的研究提供了依据。较新的变质锆石年龄数据有利于后期变质作用的研究。根据2套碎屑岩中的锆石年龄分布特征,结合研究区的构造演化史,将所得的年龄数据分为5个主要阶段:①太古宙阶段,最老的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 3063 ± 16 Ma,其次为 2541 ± 18 Ma和 2548 ± 18 Ma,共3个单锆石年龄。②古—中元古代阶段,锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值跨度较大,2223~1463 Ma共15个单锆石测点,又以2100 Ma、2180 Ma和1400 Ma集中分布。③新元古代阶段,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化范围为781~958 Ma,共计16个单锆石年龄值,其中PM02-4中9个测点的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值为 858 ± 13 Ma,PM03-6中7个测点的数据变化范围较大,但其年龄加权平均值相近。④震旦纪阶段,主要为岩浆锆石,其年龄值为碎屑岩中主要的分布阶段,其中PM02-4中43个年龄数据的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 546 ± 4 Ma,PM03-6中38个年龄数据的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 545 ± 4 Ma,具有相同的年龄特征。⑤志留纪阶段,碎屑锆石具有变质重结晶特征,其年龄值为421~429 Ma。

5.1 复理石沉积时代的限定

前人对新疆北部地区的碎屑沉积岩进行了大量的研究。喀纳斯群最早由王广耀等^[36]于阿勒泰

表 1 喀纳斯群石英砂岩 (PM02-4) 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS detrital zircon U-Th-Pb isotopic analyses results of quartz sandstone (PM02-4) from the Kanas Group

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma				谐和度/%			
	Pb*	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1 σ		
1	16	74	160	0.46	0.002	0.705	0.023	0.0869	0.0022	563	32	542	14	537	13	101
2	79	259	771	0.34	0.001	0.719	0.017	0.0890	0.0020	552	24	550	10	550	12	100
3	66	57	170	0.33	0.002	4.928	0.120	0.3304	0.0076	1770	20	1807	21	1840	37	96
4	42	69	80	0.86	0.003	6.857	0.168	0.3563	0.0083	2223	19	2093	22	1965	40	113
5	29	178	255	0.7	0.002	0.730	0.019	0.0892	0.0021	581	26	556	11	551	12	101
6	64	211	652	0.32	0.001	0.709	0.018	0.0900	0.0021	498	25	544	11	556	12	98
7	60	208	594	0.35	0.001	0.726	0.018	0.0884	0.0020	588	25	554	11	546	12	101
8	42	239	388	0.62	0.001	0.670	0.018	0.0879	0.0021	425	27	521	11	543	12	96
9	74	406	726	0.56	0.001	0.666	0.017	0.0868	0.0020	439	25	518	10	536	12	97
10	52	76	116	0.65	0.003	5.167	0.126	0.3356	0.0077	1827	20	1847	21	1865	37	98
11	41	152	379	0.4	0.001	0.721	0.018	0.0906	0.0021	522	25	552	11	559	12	99
12	32	180	261	0.69	0.002	0.773	0.023	0.0917	0.0022	644	28	581	13	566	13	103
13	93	214	567	0.38	0.002	1.507	0.037	0.1475	0.0034	1046	22	933	15	887	19	105
14	20	81	113	0.71	0.002	1.209	0.036	0.1412	0.0035	679	29	805	17	851	20	95
15	30	178	814	0.22	0.002	0.220	0.007	0.0314	0.0008	230	32	202	6	199	5	102
16	48	156	476	0.33	0.001	0.702	0.019	0.0885	0.0021	513	26	540	11	547	12	99
17	16	83	76	1.09	0.002	1.452	0.046	0.1426	0.0037	1037	29	911	19	860	21	106
18	95	446	834	0.54	0.001	0.712	0.018	0.0872	0.0020	578	24	546	11	539	12	101
19	29	41	61	0.67	0.003	5.747	0.144	0.3602	0.0085	1892	20	1938	22	1983	40	95
20	24	135	194	0.7	0.002	0.740	0.021	0.0920	0.0022	543	29	562	13	567	13	99
21	23	122	217	0.56	0.002	0.726	0.021	0.0876	0.0021	608	29	554	13	541	13	102
22	43	226	381	0.59	0.001	0.720	0.019	0.0879	0.0020	583	25	551	11	543	12	101
23	24	131	230	0.57	0.002	0.696	0.025	0.0877	0.0023	512	37	536	15	542	14	99
24	107	363	1146	0.32	0.002	0.678	0.019	0.0883	0.0021	442	28	526	11	545	12	97
25	25	126	219	0.58	0.002	0.748	0.020	0.0879	0.0021	666	26	567	12	543	12	104
26	88	214	804	0.27	0.001	0.732	0.019	0.0912	0.0021	541	25	558	11	562	12	99
27	45	161	431	0.37	0.001	0.699	0.018	0.0880	0.0020	515	25	538	11	544	12	99
28	35	122	193	0.63	0.002	1.263	0.033	0.1413	0.0033	770	24	829	15	852	19	97
29	45	218	433	0.5	0.001	0.696	0.018	0.0868	0.0020	537	26	536	11	536	12	100

续表 1

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma				谐和度/%		
	Pb*	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	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			
30	41	175	390	0.45	0.058	0.002	0.697	0.019	0.0878	0.0020	515	26	537	11	543	12	99
31	77	298	730	0.41	0.057	0.001	0.699	0.017	0.0895	0.0020	479	24	538	10	552	12	97
32	24	145	207	0.7	0.060	0.002	0.728	0.021	0.0878	0.0021	610	29	555	13	542	13	102
33	19	120	164	0.74	0.060	0.002	0.740	0.022	0.0902	0.0022	588	30	563	13	556	13	101
34	86	386	816	0.47	0.058	0.001	0.696	0.017	0.0877	0.0020	513	24	536	10	542	12	99
35	102	337	595	0.57	0.069	0.002	1.348	0.035	0.1411	0.0033	908	24	867	15	851	19	102
36	21	191	170	1.13	0.057	0.002	0.684	0.022	0.0876	0.0022	479	33	529	13	541	13	98
37	28	157	243	0.65	0.060	0.002	0.729	0.020	0.0885	0.0021	594	27	556	12	547	12	102
38	97	311	969	0.32	0.057	0.001	0.688	0.017	0.0879	0.0020	481	24	531	10	543	12	98
39	39	150	378	0.4	0.058	0.002	0.694	0.019	0.0874	0.0020	516	26	535	11	540	12	99
40	17	28	96	0.3	0.070	0.002	1.416	0.043	0.1468	0.0037	927	28	896	18	883	21	101
41	7	32	81	0.4	0.063	0.003	0.587	0.023	0.0679	0.0019	697	41	469	15	424	12	111
42	107	201	1116	0.18	0.058	0.001	0.702	0.017	0.0877	0.0020	534	24	540	10	542	12	100
43	76	173	713	0.24	0.059	0.001	0.718	0.017	0.0885	0.0020	560	24	549	10	547	12	100
44	70	330	659	0.5	0.057	0.001	0.694	0.018	0.0878	0.0020	505	25	535	11	542	12	99
45	27	79	277	0.29	0.055	0.002	0.665	0.022	0.0872	0.0022	424	34	518	13	539	13	96
46	31	149	308	0.48	0.058	0.002	0.691	0.022	0.0870	0.0022	515	31	533	13	538	13	99
47	56	369	470	0.79	0.058	0.002	0.728	0.019	0.0908	0.0021	535	26	555	11	560	12	99
48	32	209	295	0.71	0.058	0.002	0.708	0.022	0.0879	0.0022	547	30	544	13	543	13	100
49	73	143	421	0.34	0.067	0.002	1.309	0.035	0.1409	0.0033	849	25	850	15	850	19	100
50	104	328	1049	0.31	0.058	0.001	0.702	0.018	0.0884	0.0020	513	25	540	11	546	12	99
51	125	521	1243	0.42	0.056	0.001	0.676	0.017	0.0869	0.0020	471	24	525	10	537	12	98
52	31	169	256	0.66	0.061	0.002	0.746	0.020	0.0884	0.0021	646	26	566	12	546	12	104
53	64	237	359	0.66	0.067	0.002	1.308	0.034	0.1411	0.0033	845	24	849	15	851	18	100
54	16	64	79	0.81	0.062	0.002	1.190	0.042	0.1387	0.0037	682	35	796	19	837	21	95
55	29	48	64	0.75	0.107	0.003	4.747	0.120	0.3222	0.0075	1747	21	1776	21	1800	37	97
56	34	130	329	0.4	0.059	0.002	0.714	0.020	0.0873	0.0021	580	28	547	12	540	12	101
57	29	114	252	0.45	0.060	0.002	0.739	0.020	0.0891	0.0021	609	26	562	12	550	12	102
58	281	94	344	0.27	0.232	0.005	19.268	0.436	0.6034	0.0132	3063	16	3055	22	3043	53	101
59	20	84	190	0.44	0.060	0.002	0.720	0.025	0.0869	0.0023	608	35	551	15	537	13	103
60	21	89	189	0.47	0.060	0.002	0.727	0.020	0.0877	0.0021	608	27	555	12	542	12	102

注: $\text{Pb}^* = 0.241 \times ^{210}\text{Pb} + 0.221 \times ^{217}\text{Pb} + 0.524 \times ^{218}\text{Pb}$

表 2 喀纳斯群细粉砂岩 (PM03-6) 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS detrital zircon U-Th-Pb isotopic analysis results of fine sandstone (PM03-6) from the Kanas Group

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma				谐和度 /%			
	Pb *	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
1	23	224	182	1.23	0.002	0.717	0.022	0.0875	0.0022	583	31	549	13	541	13	101
2	48	149	463	0.32	0.001	0.700	0.018	0.0879	0.0020	523	25	539	11	543	12	99
3	30	131	291	0.45	0.002	0.704	0.021	0.0876	0.0022	539	30	541	13	542	13	100
4	64	41	183	0.22	0.003	7.180	0.188	0.3817	0.0095	2183	20	2134	23	2084	44	105
5	21	36	278	0.13	0.002	0.547	0.016	0.0685	0.0017	527	30	443	11	427	10	104
6	162	133	254	0.52	0.004	10.818	0.250	0.4664	0.0105	2541	18	2508	22	2468	46	103
7	28	49	148	0.33	0.002	1.550	0.041	0.1551	0.0037	1001	24	951	16	929	20	108
8	49	244	447	0.55	0.001	0.730	0.018	0.0880	0.0020	610	24	556	11	544	12	112
9	9	65	78	0.84	0.002	0.747	0.027	0.0882	0.0024	655	37	566	16	545	14	104
10	21	88	189	0.46	0.002	0.761	0.021	0.0895	0.0021	664	27	575	12	552	13	104
11	35	20	452	0.04	0.002	0.546	0.018	0.0675	0.0016	555	90	443	12	421	9	105
12	31	274	269	1.02	0.002	0.685	0.022	0.0869	0.0022	500	33	530	14	537	13	99
13	62	68	329	0.21	0.002	1.565	0.039	0.1602	0.0036	955	22	956	15	958	20	100
14	172	624	1729	0.36	0.001	0.690	0.017	0.0872	0.0020	508	24	533	10	539	12	99
15	7	25	62	0.4	0.003	0.711	0.030	0.0891	0.0026	526	46	545	18	550	15	99
16	30	145	279	0.52	0.002	0.689	0.021	0.0878	0.0022	492	31	532	13	542	13	98
17	126	27	223	0.12	0.004	10.523	0.249	0.4517	0.0103	2548	18	2482	22	2403	46	106
18	41	169	240	0.7	0.002	1.180	0.030	0.1287	0.0030	823	24	791	14	781	17	101
19	19	47	52	0.92	0.003	3.383	0.096	0.2528	0.0064	1569	24	1500	22	1453	33	108
20	27	117	253	0.46	0.002	0.731	0.020	0.0880	0.0021	614	27	557	12	543	12	103
21	13	66	123	0.54	0.002	0.725	0.028	0.0887	0.0025	579	41	554	17	548	15	101
22	119	53	691	0.08	0.002	1.526	0.036	0.1554	0.0035	965	22	941	15	931	19	101
23	164	676	1540	0.44	0.001	0.734	0.018	0.0877	0.0020	628	23	559	10	542	12	103
24	35	179	332	0.54	0.002	0.702	0.022	0.0868	0.0022	555	31	540	13	537	13	101
25	36	150	334	0.45	0.002	0.730	0.019	0.0893	0.0021	578	26	556	11	551	12	101
26	18	186	152	1.22	0.003	0.691	0.029	0.0878	0.0026	497	47	533	18	542	15	98
27	24	129	217	0.59	0.002	0.758	0.022	0.0884	0.0021	682	28	573	13	546	13	105
28	29	162	288	0.56	0.002	0.733	0.023	0.0869	0.0022	648	31	558	14	537	13	104
29	13	46	126	0.36	0.002	0.750	0.023	0.0891	0.0022	641	31	568	14	550	13	103

续表 2

点号	含量/ 10^{-6}				Th/U				同位素比值				表面年龄/Ma				谐和度	
	Pb *	Th	U		Pb	Th/U			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	/%	
30	43	148	410		0.36				0.739	0.021	0.0880	0.0021	562	12	544	12	103	
31	60	539	523		1.03				0.757	0.030	0.0886	0.0026	572	17	547	15	105	
32	71	259	694		0.37				0.721	0.019	0.0882	0.0020	551	11	545	12	101	
33	103	435	1014		0.43				0.707	0.018	0.0874	0.0020	543	10	540	12	101	
34	58	197	579		0.34				0.720	0.020	0.0872	0.0021	551	12	539	12	102	
35	25	38	77		0.49				3.275	0.167	0.2588	0.0067	1475	40	1483	35	99	
36	67	225	695		0.32				0.729	0.020	0.0878	0.0021	556	12	543	12	102	
37	30	171	277		0.62				0.739	0.022	0.0869	0.0021	562	13	537	13	105	
38	79	88	527		0.17				1.185	0.042	0.1312	0.0030	794	19	795	17	100	
39	19	34	253		0.13				0.545	0.021	0.0688	0.0017	442	14	429	10	103	
40	111	260	1171		0.22				0.713	0.018	0.0874	0.0020	547	11	540	12	101	
41	29	10	315		0.03				0.699	0.021	0.0872	0.0020	538	12	539	12	100	
42	74	156	128		1.22				7.027	0.176	0.3928	0.0092	2115	22	2136	42	98	
43	66	169	698		0.24				0.702	0.019	0.0880	0.0021	540	11	544	12	99	
44	17	99	143		0.7				0.756	0.024	0.0895	0.0023	572	14	552	13	104	
45	25	49	43		1.16				7.296	0.202	0.3959	0.0101	2148	25	2150	47	100	
46	31	55	308		0.18				0.765	0.021	0.0920	0.0022	577	12	567	13	102	
47	68	202	676		0.3				0.731	0.019	0.0880	0.0020	557	11	543	12	103	
48	150	121	379		0.32				5.154	0.171	0.3231	0.0075	1845	28	1805	36	105	
49	35	144	341		0.42				0.720	0.021	0.0876	0.0021	551	12	541	12	102	
50	222	251	433		0.58				7.368	0.180	0.3914	0.0089	2157	22	2129	41	103	
51	18	53	64		0.82				1.518	0.053	0.1501	0.0041	938	21	902	23	104	
52	51	82	503		0.16				0.709	0.027	0.0893	0.0021	544	16	552	12	99	
53	62	51	154		0.33				5.177	0.131	0.3337	0.0078	1849	22	1856	38	99	
54	132	42	294		0.14				6.908	0.172	0.3894	0.0090	2100	22	2120	42	98	
55	66	293	635		0.46				0.734	0.019	0.0877	0.0020	559	11	542	12	103	
56	34	144	320		0.45				0.749	0.021	0.0883	0.0021	567	12	546	12	104	
57	25	119	226		0.52				0.747	0.022	0.0913	0.0022	567	13	563	13	101	
58	43	137	240		0.57				1.419	0.038	0.1411	0.0033	897	16	851	19	105	
59	150	391	1536		0.25				0.724	0.019	0.0880	0.0020	553	11	544	12	102	
60	88	175	250		0.7				3.446	0.088	0.2687	0.0063	1515	20	1534	32	97	

注: $\text{Pb}^* = 0.241 \times ^{206}\text{Pb} + 0.221 \times ^{207}\text{Pb} + 0.524 \times ^{208}\text{Pb}$

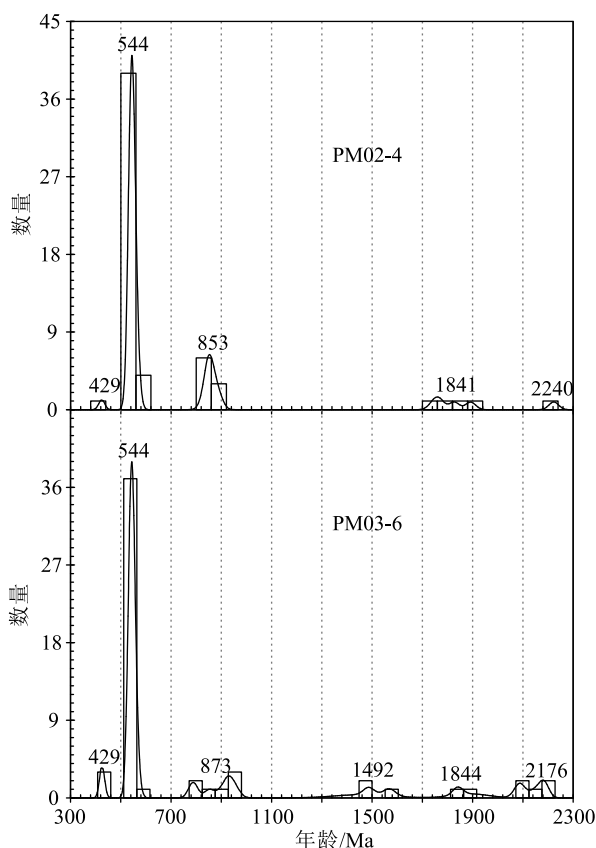


图 5 同位素年龄分布对比图

Fig. 5 Comparison diagram of U-Pb isotopic ages distribution

山北部的喀纳斯村创建,并将其厘定为早震旦世。此后,有关喀纳斯群形成时代及其沉积环境的探讨持续至今;何国琦等^[23]将这套巨厚的复理石沉积划归为被动陆缘的沉积环境;而袁超等^[38]根据碎屑锆石年代学特征,将其沉积时代划为早泥盆世—中奥陶世,并提出活动大陆边缘的观点;刘源等^[35]结合喀纳斯群碎屑锆石及侵入的变质花岗岩的岩浆锆石年龄,将其沉积时代厘定为晚震旦世—早寒武世,属形成于被动大陆边缘环境的复理石沉积。

喀纳斯群为一套巨厚的浅变质陆源碎屑沉积岩,单层厚度小,具典型的复理石沉积特征。地层中的微古植物群具有从前寒武纪向寒武纪及其以后的生物群过渡的性质,也即具有寒武纪微古植物群的先驱分子,如 *Michystridium* 及 *Polyedryxium* 属,特别是 *Michystridium* 属被视为从早寒武世才开始大量出现的分子,在湖北三峡、川西、新疆阿克苏—乌什地区的上震旦统中有少量出现。此外,目前仅发现于中国上震旦统和俄罗斯贝加尔西南及西伯利

亚陆台南部的晚前寒武纪的 *Turuchania temata*, *Turuchania alara* 分子在喀纳斯群中也有发现。据此,李会军等^[28]认为,将喀纳斯群的时代归属震旦纪为宜。

胡霁琴等^[26]在喀纳斯群中获得的 Pb-Pb 等时线年龄为 541 ± 126 Ma,李会军等^[28]认为若该年龄值可靠,已非常接近寒武纪下限,加之喀纳斯群没有见底,因此喀纳斯群底界应定为震旦纪。本次在这套浅变质碎屑岩中采集了 2 套锆石 U-Pb 同位素年龄样品,年龄数据具有较高的一致性,暗示碎屑沉积岩的沉积物源相似。最新的岩浆锆石年龄值分别为 546 ± 4 Ma 和 545 ± 4 Ma,相当于国际地层表中的新元古代埃迪卡拉纪晚期(晚震旦世晚期),锆石晶形较完整,呈自形—半自形短柱状,说明物源区较近、搬运距离较短,属快速堆积的产物。且样品位于喀纳斯群中、上段,据此可将喀纳斯群的底界定为震旦系。刘源等^[35]根据侵入喀纳斯群中的变质花岗岩的岩浆锆石年龄($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 523 ± 19 Ma),将喀纳斯群的沉积时代上限定为早寒武世。

综上所述,笔者认为,喀纳斯群的形成时代应为震旦纪—早寒武世。王星等^[10]结合碎屑岩的地球化学特征,认为其沉积环境应该为被动陆缘环境。

5.2 是否存在古老基底的佐证

关于阿尔泰地区是否存在前寒武纪结晶基底,一直存在争议^[23-34],但随着同位素年代学的发展,越来越多的资料显示阿尔泰地区曾存在前寒武纪结晶基底。胡霁琴等^[25]根据富蕴县的片麻岩和混合岩化花岗岩 Sm-Nd 同位素分析结果(大致在 1400 Ma)判断,阿尔泰地区可能存在中元古代基底;胡霁琴等^[27]在富蕴县西的石榴子石片麻岩中获得的锆石 U-Pb 上交点年龄为 2349 ± 226 Ma,初步证实了古元古代大陆地壳岩石的存在;宋国学等^[32]在研究阿舍勒铜铅矿区出露的泥盆纪火山岩时,获得的一组火山岩锆石 U-Pb 谐和年龄为 1985 ± 9 Ma,年龄加权平均值为 2005 ± 30 Ma,代表了阿尔泰地区前寒武纪结晶基底的形成时代;赵同阳等^[48]运用锆石 U-Pb 法,获得了禾木一带变质砂岩碎屑锆石的谐和年龄,并认为喀纳斯一带存在前寒武纪地层;于根旺等^[34]对阿勒泰组变质带中石英岩夹层中的碎屑锆石进行了 U-Pb 年代学分析,获得了新元古代年龄和少量古—中元古代甚至太古宙年龄,认

为其可能源于区内隐伏的古老基底岩石或邻区古老地块。本次在新疆阿尔泰友谊峰一带的喀纳斯群中采集了 2 个层位的碎屑锆石样品, 锆石晶形保存较好, 遭受变质作用和机械破碎作用较弱, 部分有圆化, 其年龄值相似程度较高, 暗示了碎屑沉积物近源、快速堆积的特征, 这与其复理石沉积的性质吻合。获得的古太古代—新元古代锆石年龄, 年龄数据谐和度较高, 具有确切的年龄意义, 暗示物源区存在古老基底。

5.3 区域构造演化的启示

新疆北部地区的地质演化历史, 最早可以追溯至太古宙^[25]。塔里木地块北缘库鲁克塔格地区的一套古—中太古代杂岩, 构成了中国西北地区早中太古代的原始大陆地核; 之后, 经过构造、变质、岩浆活动, 逐渐扩大和成熟, 形成了塔里木地块的太古宙基底。早古生代, 塔里木北缘地区普遍发生了一次区域变质作用, 形成大量的混合岩化花岗岩, 使大陆地壳进一步扩大。进入中元古代以后, 全球范围内为一个稳定的盖层纪, 阿尔泰地区在该时期形成的沉积盖层可能为苏普特岩群; 李天德等^[31]将阿尔泰地区的地壳演化分为太古宙—元古宙古陆壳形成阶段、早古生代被动陆缘陆壳增生等阶段; 胡霁琴等^[27]指出, 阿尔泰地区在 2400~2600 Ma、约 1400 Ma 和 700~900 Ma 前发生过壳幔分异和大陆地壳增生事件; 宋国学等^[32]研究认为, 阿尔泰前寒武纪结晶基底可能形成于 Columbia 超大陆拼合汇聚背景; 于根旺等^[34]认为, 阿勒泰组变质带石英岩样品中寒武纪及更年轻的碎屑锆石年龄与区域内同时期的岩浆活动有关, 而古老的前寒武纪碎屑锆石可能来源于隐伏的古老基底岩石或区外的古老陆块。

喀纳斯群碎屑沉积岩中丰富的碎屑锆石年龄信息, 与区域地质构造演化阶段具有较好的耦合关系, 对区域构造演化具有一定的意义。最早的 3100~2500 Ma 阶段, 与塔里木地块太古宙基底的形成时代一致, 属太古宙陆核形成阶段。之后的 Columbia 超大陆, 在 2000~1850 Ma, 将太古宙所有克拉通汇聚在一起形成古元古代造山带, 2223~1463 Ma 阶段的碎屑锆石年龄值与该时期吻合, 其物源应来自 Columbia 超大陆拼合、汇聚背景。阿尔泰地区在这一阶段发生过广泛的区域变质作用和古陆壳增生^[28, 31], 阿尔泰地区古—中元古界克木齐

群形成于该时期^[49]。随着 Rodinia 超大陆汇聚、裂解, 格林威尔造山事件形成全球性超大陆, 最终汇聚时限约在 900 Ma, 并在 830 Ma 迅速解体。985~781 Ma 阶段的碎屑锆石应该是 Rodinia 超大陆在这一造山阶段的产物, 富蕴群变质岩原岩应该形成于该阶段^[24]。震旦纪, 随着西伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶尔板块的分裂与扩张, 产生了古亚洲洋, 并在震旦纪—寒武纪形成喀纳斯群复理石碎屑沉积物^[10]。古亚洲洋大致从晚寒武世开始向北俯冲于阿尔泰微大陆之下, 随着大洋持续的向北俯冲作用, 洋壳板块变质脱水, 消减洋壳及地幔楔发生部分熔融形成基性岩浆, 上涌的基性岩浆携带高热底侵于下地壳, 使地壳部分熔融, 并发生壳幔混合作用, 形成大规模 415~380 Ma 的弧岩浆岩, 并以 400 Ma 左右的岩浆活动尤为剧烈^[19, 50]。喀纳斯群中的变质碎屑锆石年龄与剧烈的岩浆活动时间相近, 因此推断, 碎屑岩中 421~429 Ma 变质锆石的形成可能与大规模的岩浆热液作用有关。

6 结 论

(1) 新疆北部地区的喀纳斯群中存在大量岩浆成因的碎屑锆石, 其最新的岩浆锆石年龄值限定了喀纳斯群的沉积时限, 结合区域研究资料表明, 其形成时代为震旦纪—寒武纪。

(2) 在喀纳斯群中获得的古太古代—新元古代锆石年龄谐和度较高, 其年龄值与邻区太古宙陆核、元古宙大陆地壳等前寒武系基底的形成时代一致, 可作为物源区存在古老基底的佐证。

(3) 本次划分的 5 个阶段的年龄数据与区域地质构造演化阶段具有较好的耦合关系, 其中, 3100~2500 Ma 对应太古宙陆核形成阶段, 2223~1463 Ma 指示 Columbia 超大陆拼合、汇聚阶段, 985~781 Ma 对应 Rodinia 超大陆汇聚、裂解阶段, 546±4 Ma 和 545±4 Ma 限定了喀纳斯群形成时代的下限, 429~421 Ma 对应后期剧烈的岩浆活动阶段。

致谢: 审稿专家提出了宝贵的修改意见, 中国地质调查局西安地质调查中心微区分析实验室李艳广高级工程师在锆石 U-Pb 年龄测试和数据分析处理中提供热心帮助, 陕西省矿产地质调查中心姚征博士对英文内容进行悉心指导, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 丁建刚, 杨成栋, 杨富全, 等. 新疆阿尔泰别也萨麻斯稀有金属矿床含矿伟晶岩与花岗岩围岩成因关系[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 42(1): 71-85.
- [2] 蔺新望, 王星, 陈光庭, 等. 新疆北部阿尔泰山东段泥盆纪岩浆活动及侵位方式的探讨[J]. 现代地质, 2020, 34(3): 514-531.
- [3] 蔺新望, 王星, 赵江林, 等. 新疆富蕴县北部金格岩体斜长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2019, 38(11): 1813-1824.
- [4] 蔺新望, 张亚峰, 陈国超, 等. 阿尔泰造山带南缘岩浆混合作用: 阿克布拉克岩体岩石学、地球化学和年代学证据[J]. 地球科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211214.1625.006.html>.
- [5] 仲正, 全来喜, 刘兆, 等. 中国阿尔泰造山带的变形-变质历史研究: 以富蕴县乌恰沟地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(4): 651-666.
- [6] 谭晓森, 高锐, 王海燕, 等. 中亚造山带东段深地震反射剖面大炮揭露下地壳与 Moho 结构: 数据处理与初步解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 898-908.
- [7] 王登红, 陈毓川, 江彪, 等. 中国三叠纪大陆成矿体系[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 45-59.
- [8] Wang T, Hong D W, Jahn B M, et al. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary Orogen[J]. Journal of Geology, 2006, 114: 735-751.
- [9] 王涛, 童英, 李勉, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 595-618.
- [10] 王星, 蔺新望, 赵端昌, 等. 阿尔泰北部喀纳斯群碎屑岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其意义[J]. 西北地质, 2016, 49(3): 13-27.
- [11] 王星, 蔺新望, 张亚峰, 等. 新疆北部阿尔泰山西段乞格拉塔乌岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2019, 65(2): 370-385.
- [12] 谢樊, 王海燕, 侯贺晟, 等. 中亚造山带东段浅表构造速度结构: 深地震反射剖面初至波层析成像的揭露[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 584-596.
- [13] 徐扛, 舒坦, 孔令竹, 等. 中国阿尔泰造山带南缘晚古生代花岗岩脉年代学特征及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(3): 444-462.
- [14] 徐芹芹, 李建清, 孙东霞, 等. 新疆阿尔泰青河—富蕴地区晚新生代隆升-剥露过程——来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地质通报, 2015, 34(5): 834-844.
- [15] 杨富全, 张志欣, 刘国仁, 等. 新疆中亚造山带三叠纪矿床地质特征、时空分布及找矿方向[J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 197-214.
- [16] 杨富全, 张忠利, 王蕊, 等. 新疆阿尔泰稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(6): 1010-1026.
- [17] 杨硕, 刘阁, 靳刘圆, 等. 新疆东准噶尔地区老君庙岩群时代厘定、原岩恢复及对基底的指示意义[J]. 地质通报, 2020, 39(1): 7-17.
- [18] 章享云, 王根厚, 赵军, 等. 阿尔泰乌希里克地区满克依顶萨依岩体地球化学特征、形成时代及其构造环境[J]. 地质通报, 2016, 35(8): 1376-1387.
- [19] 张亚峰, 蔺新望, 赵玉梅, 等. 新疆北部青河县阿斯喀尔特铍矿区花岗岩质岩石年代学及地球化学特征[J]. 矿床地质, 2017, 36(3): 643-658.
- [20] 张振龙, 杨富全, 李强, 等. 新疆阿尔泰阿舍勒铜锌矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(5): 905-925.
- [21] Windley B F, Krner A, Guo J H, et al. Neoproterozoic to paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 719-737.
- [22] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161: 339-342.
- [23] 何国琦, 韩宝岳, 岳永君, 等. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化[C]//新疆地质科学(第 2 辑), 北京: 地质出版社, 1990: 14-25.
- [24] 胡霁琴, 韦刚健. 关于准噶尔盆地基底时代问题的讨论——据同位素年代学研究结果[J]. 新疆地质, 2003, 21(4): 398-406.
- [25] 胡霁琴, 张国新, 李启新, 等. 新疆北部地质演化及其与成矿的关系[J]. 新疆地质, 1994, 12(1): 32-39.
- [26] 胡霁琴, 张国新, 李启新, 等. 新疆北部主要地质事件同位素年[J]. 地球化学, 1995, 24(1): 20-31.
- [27] 胡霁琴, 张国新, 张前锋, 等. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论[J]. 地质科学, 2002, 37(2): 129-142.
- [28] 李会军, 何国琦, 吴泰然, 等. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1369-1379.
- [29] 李锦铁, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 405-419.
- [30] 李锦铁, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.
- [31] 李天德, B.H. 波里扬斯基. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰大地构造及地壳演化[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 27-32.
- [32] 宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 等. 阿尔泰南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2946-2958.
- [33] 肖序常, 汤耀达, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-171.
- [34] 于根旺, 王伟, 赵越, 等. 阿尔泰递变变质带中夹层石英的 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄: 对沉积时限及物源的限定[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 500-510.
- [35] 刘源, 杨家喜, 胡健民, 等. 阿尔泰构造带喀纳斯群时代的厘定及其意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 887-898.
- [36] 王广耀, 张玉婷. 新疆阿尔泰震旦系的发现及其意义[J]. 中国区域地质, 1993, 7: 117-119.
- [37] 龙晓平, 袁超, 孙敏, 等. 北疆阿尔泰南缘泥盆系浅变质碎屑沉积岩地球化学特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 718-732.
- [38] 袁超, 孙敏, 龙晓平, 等. 阿尔泰哈巴河群的沉积时代及其构造背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1635-1644.
- [39] Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, et al. Neoproterozoic - Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, N W China[C]//Mao J W, Goldfarb S, Wang X, et

- al. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. IACOD Guidebook Series, 2003, 10: 31-74.
- [40] Anderson T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [41] Ludwig K R. Users Manual for Isoplot/Ex rex. 2.49, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 1a, 2001: 1-51.
- [42] 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. 地质学报, 2015, 89(12): 2400-2418.
- [43] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 161-174.
- [44] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [45] Cawood P A, Nemehin. A. A. Provenance record of a rift basin: U-Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, western Australia [J]. Sedimentary Geology, 2000, 134(3/4): 209-234.
- [46] Sireombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, Eastern Australia [J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1/4): 47-67.
- [47] 王少轶, 许虹, 杨晓平, 等. 大兴安岭北部中侏罗统漠河组砂岩 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄: 对漠河盆地源区的制约[J]. 中国地质, 2015, 45(2): 1293-1302.
- [48] 赵同阳, 朱志新, 韩琼, 等. 新疆阿尔泰山西段喀纳斯群碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及地质意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(1): 25-29.
- [49] 方同辉, 王京彬, 张进红, 等. 新疆阿尔泰山古代基性岩浆侵入事件[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 48-54.
- [50] 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-82.
- ① 陕西省地质调查院. 新疆阿尔泰山 1:5 万 M45E018012 等五幅区域地质矿产调查项目成果报告及附图. 2017.