

doi: 10.13745/j.esf.2016.03.024

吉尔吉斯南天山 Djanydjer 蛇绿混杂岩地质特征及辉长岩年代学研究

王 斌², 陈 博^{1,2,*}, 计文化^{1,2}, 洪 俊², 杨 博², 孟广路², 曹积飞²

1. 国土资源部 岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054

2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

WANG Bin², CHEN Bo^{1,2,*}, JI Wenhua^{1,2}, HONG Jun², YANG Bo², MENG Guanglu², CAO Jifei²

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710054, China

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

WANG Bin, CHEN Bo, JI Wenhua, et al. Geological features of Djanydjer ophiolitic mélange and chronology of gabbro in Kyrgyz, South Tianshan. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 198-209

Abstract: Djanydjer ophiolitic mélange in the Kyrgyzstan, South Tianshan suture are composed of serpentinized peridotite, gabbro, basalt and chert. Two groups U-Pb zircon ages of 422.0 ± 2.0 Ma (MSWD=1.2) and 397.3 ± 3.9 Ma (MSWD=0.6) have obtained for the gabbro. Considered with chronology studies of ophiolites in China-Kyrgyz, South Tianshan, the older age (422 Ma) represents the crystallization of gabbro, which implies the oceanic basin separated the Tarim craton and Kyrgyz Middle Tianshan terrane has existed in the early stage of the Late Silurian. The younger age might be related to metamorphism during the oceanic lithosphere obduction or the post-collisional magmatism. Muscovite-quartz schist in the same belt with Djanydjer ophiolitic mélange was considered as a part of Precambrian metamorphic terrane. It has similar petrology and deformation characteristics with the host rocks of Atbashi eclogite. Its detrital zircons vary widely in age from 406 Ma to 2856 Ma, which is similar to that reported from the Atbashi greywacke. Compared with the age spectrum of zircons from Tarim Craton and Atbashi greywacke, the protolith of the muscovite-quartz schist has a depositional age <406 Ma and the provenance was probably in the North and Middle Tianshan.

Key words: Kyrgyzstan; South Tianshan; phiolite; zircon U-Pb chronology

摘 要: 位于吉尔吉斯斯坦南天山缝合带附近的 Djanydjer 蛇绿混杂岩由蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩等组成。通过对辉长岩中锆石 U-Pb 年代学研究获得两组年龄: (422.0 ± 2.0) Ma (MSWD=1.2), (397.3 ± 3.9) Ma (MSWD=0.6)。结合境内外南天山蛇绿混杂岩的年代学特征, 认为前者代表辉长岩的形成时代, 表明分割吉尔吉斯斯坦中天山和塔里木克拉通的洋盆在晚志留世早期已经存在。由辉长岩中获得的中泥盆世年龄可能与洋壳闭合-蛇绿岩构造侵位或后期花岗质岩浆侵入作用相关。与 Djanydjer 蛇绿混杂岩产出同一构造带上的变质沉积岩组合, 一直以来被认为是前寒武纪的变质地体, 文中对其中的白云母石英片岩的研究发现, 其碎屑锆石记录了较宽的年龄范围(406~2 856 Ma)。通过与阿特巴什变质硬砂岩中的碎屑锆石和塔里木克拉通岩浆锆石的比较发现, 白云母石英片岩与包裹榴辉岩的变质杂岩相似, 原岩的沉积时

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-12-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“吉尔吉斯天山成矿带成矿地质背景研究及资源潜力评价”(12120115066901); 中-乌合作天山造山带成矿条件与找矿方法示范研究项目(12120115066701); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才项目(2015JQ4106)

作者简介: 王 斌(1982—), 男, 工程师, 主要从事中亚地区矿产地质研究工作。E-mail: 305590518@qq.com

* 通讯作者简介: 陈 博(1985—), 男, 博士, 主要从事岩浆岩岩石学及地球化学研究。E-mail: chenbo-geo@pku.edu.cn

代不早于早泥盆世,其部分物源可能来自吉尔吉斯中天山—北天山。

关键词: 吉尔吉斯斯坦;南天山;蛇绿岩;锆石 U-Pb 年代学

中图分类号: P542;P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2016)03-0198-12

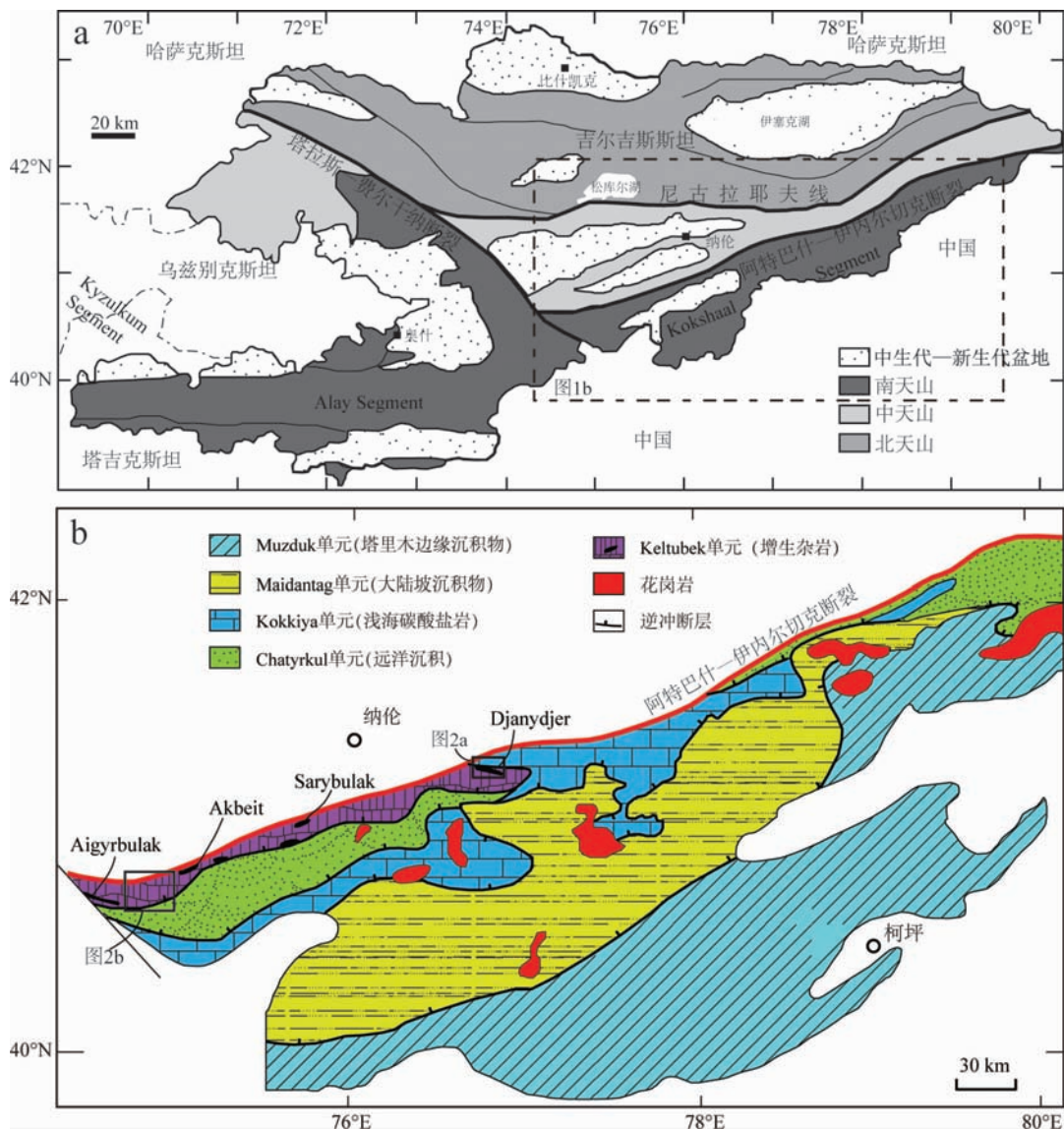
0 引言

天山造山带位于中亚造山带的南部边缘,自西向东延伸超过 2 500 km,它的演化记录了包括岛弧、增生杂岩、海山以及洋底高原的增生过程,也记录了岛弧与陆块之间的碰撞与缝合的历史^[1-5]。晚二叠世—早三叠世大规模陆内走滑断层对其产生强烈影响^[6-7],新生代以来印度与欧亚板块的碰撞导致天山造山带被重新活化,造就了现今天山的地貌形态^[8-10]。南天山是一个晚古生代增生碰撞系统,发育复杂的褶皱逆冲构造。有关南天山洋的演化过程是长期以来中外学者持续关注的热点问题。南天山缝合带从乌兹别克斯坦境内向东,沿着分割吉尔吉斯中天山和南天山的阿特巴什—伊内尔切克(Atbashi-Inylchek)断裂一直延伸至中国境内的南那拉提断裂。分布在缝合带附近的高压低温变质带限定了南天山洋闭合过程中洋壳深俯冲作用,与伴生的蛇绿混杂岩共同记录了南天山洋演化的历史。南天山造山带内广泛分布的蛇绿混杂岩多为构造岩片,组成蛇绿岩套的岩石单元被肢解成岩块,分布在蛇纹岩基质中。对蛇绿混杂岩中镁铁质单元的年代学研究显示,分布在中国境内(南天山缝合带东段)的巴雷公、库勒湖、黑英山、库米什蛇绿混杂岩形成于 450~392 Ma(晚奥陶世—中泥盆世)^[2,11-15]。在这些混杂岩中,与熔岩伴生的硅质岩中的牙形石和放射虫的时代为中泥盆世—早石炭世^[16-20]。在库米什地区,高度变形的片麻状花岗岩的时代为 446~407 Ma(晚奥陶世—早泥盆世)^[21]。在位于天山西段的乌兹别克斯坦库拉玛地区(中天山南缘)发现了早—中奥陶世的蛇绿岩,该蛇绿岩被中志留世的 I 型花岗岩侵入^[22-24],与其伴生的志留纪—早泥盆世弧火山岩,被认为与南天山洋向北俯冲有关^[25]。位于南天山中段吉尔吉斯斯坦境内的蛇绿混杂岩,除了已经报道的牙形石时代(早泥盆世—早石炭世)^[26],目前尚缺少较为精确的同位素年代学数据。本文选择位于吉尔吉斯斯坦阿特巴什山脉东段 Djanydjer 蛇绿混杂岩中的辉长岩进行年代学研究,以期探讨南天山洋的演化提供新的依据。

1 研究区区域地质

吉尔吉斯斯坦境内的天山依据尼古拉耶夫线和阿特巴什—伊内尔切克断裂,被划分为北、中、南 3 段(图 1a)。中国和吉尔吉斯斯坦境内的北天山不是同一概念,一些学者将中国北天山表述为“北东天山”以区别于吉尔吉斯北天山^[24,29]。Xiao 等使用“哈萨克斯坦—北天山”代表吉尔吉斯境内的北天山,与中国北天山区分^[30]。对境内外的中天山的认识也有不同观点,一些学者认为中国中天山微陆块向西延伸到吉尔吉斯斯坦的纳伦^[31-32];也有学者认为他们具有不同的演化历史^[24,33]:吉尔吉斯中天山(Middle Tianshan)被认为在中吉边界尖灭,而中国中天山(Central Tianshan)被认为对应于吉尔吉斯北天山南缘的延伸^[34],或者与中国南天山一起对应于吉尔吉斯南天山^[3]。只有南天山是一个境内外连续的构造单元,主要的蛇绿岩带从中国天山西部一直延伸到吉尔吉斯阿特巴什,再到乌兹别克斯坦境内^[2,4]。

在乌兹别克斯坦—吉尔吉斯斯坦境内的南天山从西向东分为 3 段:Kyzulkum 段、Alay 段和 Kokshaal 段(图 1a)。塔拉斯—费尔干纳断裂将 Kyzulkum 和 Alay 段与 Kokshaal 段分隔。Kyzulkum 的基底为新元古代—早古生代的岩浆岩系列,缺少更古老的岩石单元;Alay 段则含有前寒武纪的大陆基底;Kokshaal 段建立在塔里木被动边缘之上,它的前寒武纪基底向北发生逆冲,其上的沉积物质包括志留纪—早石炭世的深海沉积、大洋板内或大陆边缘裂谷型火山岩以及晚泥盆世—早石炭世厚层碳酸盐岩台地沉积。Kokshaal 段的北部,沿着南天山缝合带分布的主要岩石单元包括深海燧石岩、玄武岩、灰岩等,代表着弧前增生杂岩(图 1b 中的 Kokkiya, Chatyrkul 和 Keltubek 单元)。在这套杂岩中包含蛇绿混杂岩和高压变质岩片;南部是由塔里木陆缘沉积物组成,含少量火山岩(图 1b 中的 Muzduz 和 Maidantag 单元)^[24,28]。Kokkiya 单元主要由浅海相碳酸盐岩组成,含有早泥盆世—晚石炭世早期的有孔虫化石,中—晚泥盆世的灰岩中含有玄武岩和安山岩的夹层。位于 Kokkiya 单元之上的 Chatyrkul 单元主要由远洋沉积物构成,下部由黏土岩、硅质页岩以及复理石建造组成,含晚志



a—吉尔吉斯天山构造单元划分简图(据文献[27]修改);b—南天山缝合带附近构造单元划分简图。

图 1 研究区构造单元简图
(据文献[28]修改)

Fig. 1 Sketch tectonic map of study area

留世—早泥盆世的笔石化石,上部则由泥盆纪—石炭纪的含碳硅质岩组成。Keltubek 单元主要由大洋岩石圈物质组成,以构造岩片的形式产出。沿阿特巴什—伊内尔切克断裂自西向东依次分布着 Akbeit、Aksay、Sarybulak、Djanydjier 4 个蛇绿混杂岩。它们由糜棱岩化的蛇纹岩和呈松散状分布的辉长岩、角闪岩、基性火山岩及硅质岩岩块组成。在与基性火山岩伴生的灰岩中发现了早泥盆世的珊瑚。在 Keltubek 单元中分布的变质岩片和岩块包括片岩、片麻岩、石榴石角闪岩、大理岩、蓝片岩。在片岩和片麻岩中发育透镜状、布丁状的榴辉岩。在低级变质的片岩中的灰岩透镜体中发现了中志留世—早泥盆世床板珊瑚。

由榴辉岩中高压变质矿物(绿辉石、石榴石、蓝闪石)及全岩获得的 Sm-Nd 等时线年龄为 (319 ± 4) Ma,由多硅白云母获得的 Ar-Ar 坪年龄为 (316 ± 3) Ma^[35]。位于南部的 Muzduk 单元是由厚层的志留纪—泥盆纪陆源沉积和晚石炭世碳酸盐岩构成,Maidantag 单元代表了大陆坡沉积,是由一系列远洋沉积物构成的逆冲岩片组成。

2 Djanydjier 蛇绿混杂岩地质

Djanydjier 地区的蛇绿混杂岩整体呈 NE-SW 向展布,延伸约 10 km(图 2a)。混杂岩的主体由蛇

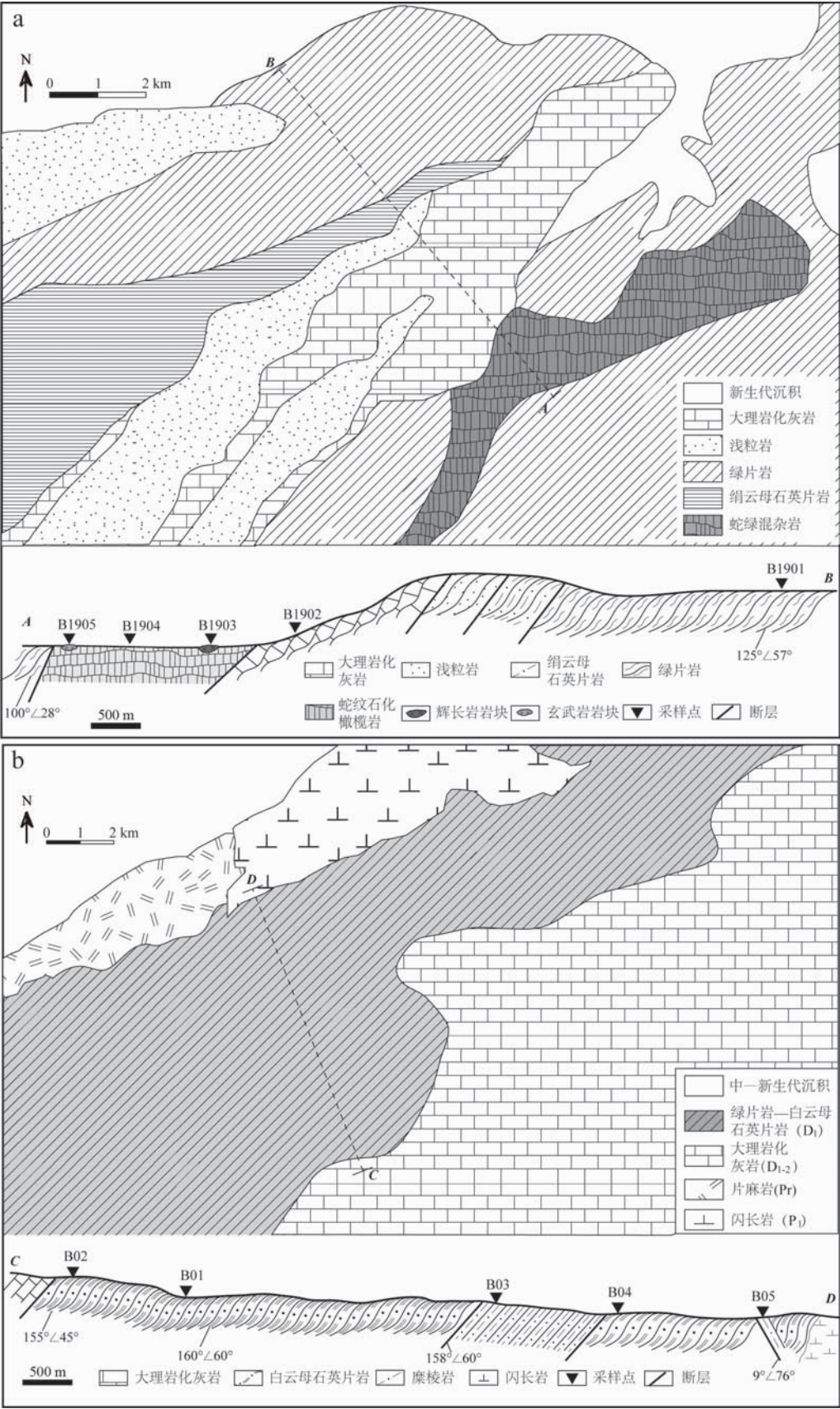


图 2 Djanydjer 地区(a)及阿特巴什山西段(b)地质简图及剖面图

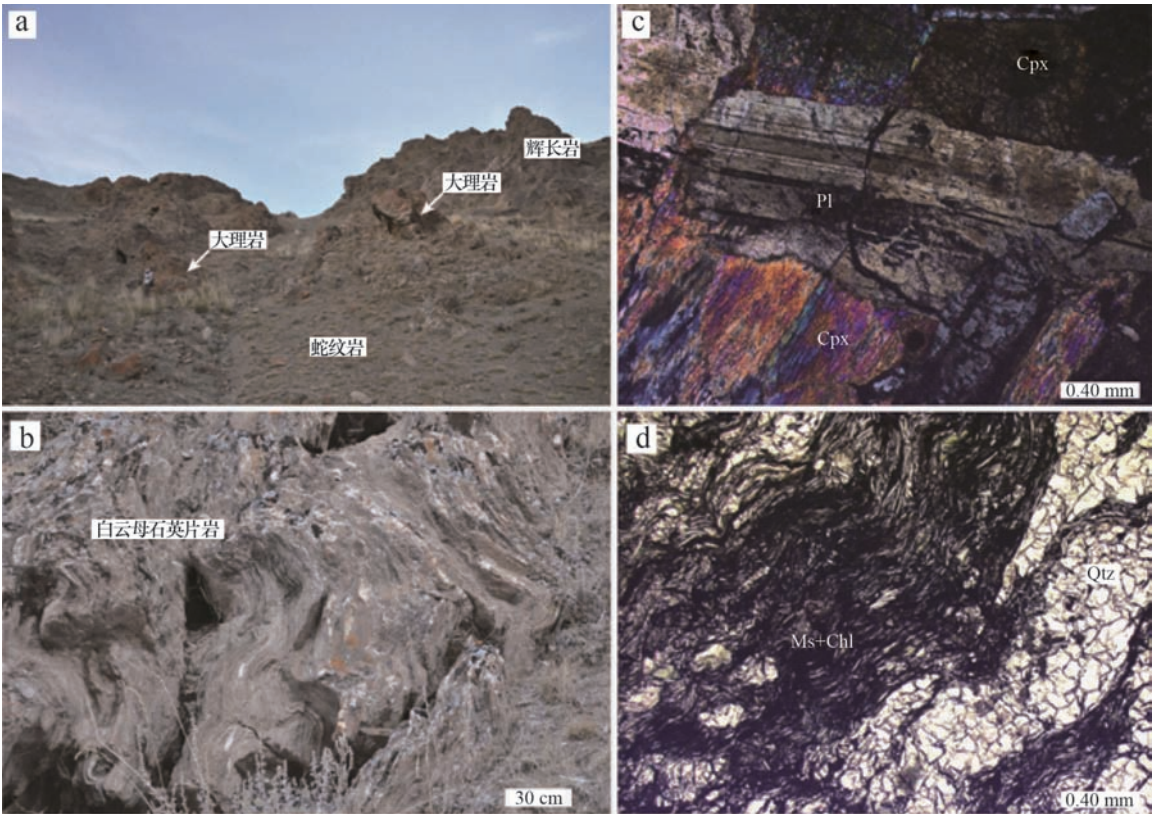
Fig. 2 Simplified geological map of Djanydjer(a) and the west part of Athashi range(b), showing a sketch cross-section and sample locations

纹石化的橄榄岩组成,辉石岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩呈不规则岩块分布在蛇纹石化的橄榄岩中(图 2a,图 3a)。这些岩块的直径大多不超过 10 m,一些辉长岩岩块呈透镜状,长轴可达数十米。蛇纹岩变形强烈,但分布其中的岩块变形较弱,一些玄武岩露头保留枕状构造。蛇绿混杂岩的围岩是一套变质沉积岩,它们与蛇绿混杂岩之间以断层接触。这套变质沉积岩中不同的岩性单元具有相似的产状,整体向 SE 方向倾伏,从南向北依次由绿片岩、大理岩化灰岩、浅粒岩组成,不同岩性之间也是以断层形式接触(图 2a 中的剖面 AB)。在吉尔吉斯斯坦区域地质资料中,蛇绿混杂岩附近的沉积组合被认为形成于中志留世,在剖面 NW 段分布的绢云母石英片岩与绿片岩则被认为属于元古宙变质基底^[36],但实测剖面显示该套地层与混杂岩周围的变质沉积岩岩性相近,具有相似的产状和变质、变形特征。这套“元古宙基底”沿着阿特巴什山脉连续分布,在距离 Djanydjer 蛇绿混杂岩 SW 方向约 90 km 处出露较为完整(在吉尔吉斯斯坦 1 : 50 万地质图中标为中元古界阿特巴什组)。笔者在该地区绘制的大比例

尺地质图和实测剖面显示(图 2b),这套地层由白云母石英片岩和糜棱岩化的绿片岩组成,局部出现大理岩化灰岩条带,与分布在其 SE 方向的大理岩化灰岩(早—中泥盆世)呈断层接触,与 Djanydjer 地区的“元古宙地层”相似。

3 样品描述及测试方法

蛇绿混杂岩中的辉长岩样品(B1903)(采样点坐标:41°11'11"N,76°24'54"E)呈块状构造,由半自形短柱状单斜辉石(约 40%)和自形一半自形板片状斜长石(约 60%)组成(图 3b)。Djanydjer 蛇绿混杂岩中的辉长岩普遍经历绿片岩相—低角闪岩相变质,单斜辉石边缘被绿泥石、透闪石取代,斜长石局部被钠长石、黝帘石取代。在阿特巴什山脉西段采集的白云母石英片岩(B01)(采样点坐标:40°55'09"N,75°28'50"E)与大理岩化灰岩呈互层状产出,发生强烈的塑性变形(图 3c)。由于变质分异作用,在显微结构中观察到由白云母、绿泥石构成的条带和与粒状石英构成的条带相间分布的特征(图 3d)。



a—Djanydjer 蛇绿混杂岩野外露头;b—强烈变形的白云母石英片岩;c—Djanydjer 辉长岩样品(B1903)显微照片;d—白云母石英片岩(B01)显微照片。Chl—绿泥石;Cpx—单斜辉石;Ms—白云母;Pl—斜长石;Qtz—石英。

图 3 Djanydjer 蛇绿混杂岩野外特征及辉长岩、石英白云母片岩显微结构

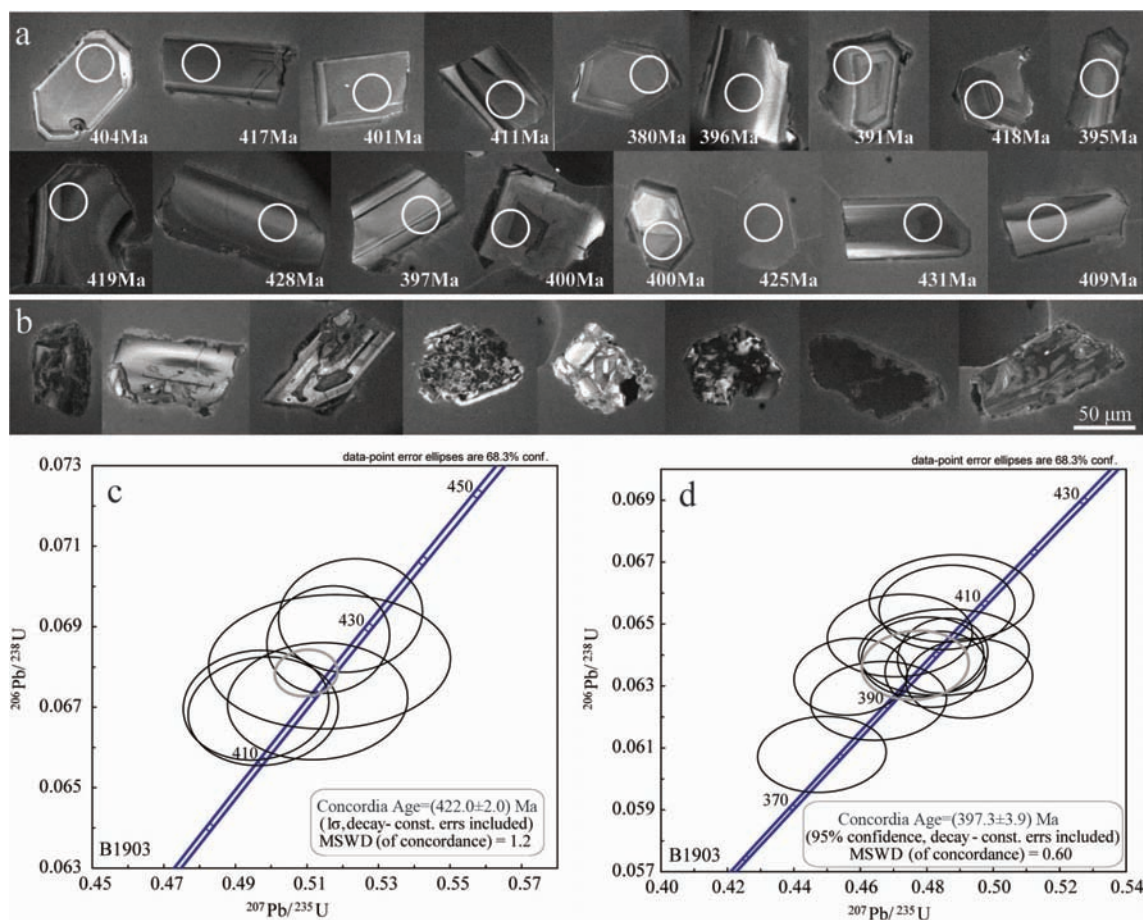
Fig. 3 Field photos of the Djanydjer ophiolitic mélange and microphotos of gabbro and muscovite-quartz schist

辉长岩和白云母石英片岩样品被粉碎至 150~200 μm ,采用常规浮选+电磁选重矿物分离后,在双目镜下人工挑选出锆石。将锆石样品粘于环氧树脂靶上,凝固后磨至锆石粒径的大约 1/2 抛光,使锆石内部充分暴露。通过对锆石透、反射及阴极发光图像(CL)的分析,选择无裂隙和包裹体的部位进行年龄测试。锆石的阴极发光图像利用西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电镜实验室 FEI PHILIPS XL30 型扫描电子显微镜获得(实验条件:15 kV/120 μA)。LA-ICP-MS 单颗粒锆石微区 U-Pb 定年也在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)以及 Micro Las 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质

NIST SRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个测点的样品测定,加标样一次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。测试结果使用 GLITTER(ver4.0, Mac-quarie University)软件计算。

4 测试结果

从辉长岩中分选出的锆石分为两类,一类呈柱状自形晶,在 CL 图像中结构清晰,裂隙较少,多数显示岩浆环带(图 4a);另一类锆石受到后期改造,发育裂隙并发生蜕晶化,部分锆石的边缘有被溶蚀的痕迹(图 4b)。针对第一类锆石的 17 个测点获得了两组谐和年龄,分别为(422.0 \pm 2.0)Ma (MSWD=1.2, N=6), (397.3 \pm 3.9) Ma (MSWD=0.6, N=11)(图 4c, d 表 1)。



a—选择测试的锆石阴极发光图像;b—受变质作用改造的锆石阴极发光图像;c,d—辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图,展示两组不同的年龄。

图 4 辉长岩锆石阴极发光照片及 U-Pb 年龄测试结果
Fig. 4 CL images and U-Pb analysis results of zircons from gabbro

表 1 Djanydjier 辉长岩(B1903)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 数据
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from Djanydjier gabbro (B1903)

序号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄 t/Ma				Disc. /%
	U	Th	^{206}Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	
1	258	251	67	0.97	0.052 87	0.22	0.471 9	1.4	0.064 63	0.09	404	5	323	90	-25
2	326	241	92	0.74	0.053 88	0.21	0.497 8	1.4	0.066 9	0.09	418	5	366	85	-14
3	273	274	72	1.00	0.054 83	0.24	0.485 2	1.7	0.064 09	0.09	401	6	405	96	1
4	226	253	60	1.12	0.053 63	0.23	0.487 4	1.6	0.065 83	0.09	411	6	355	94	-16
5	341	450	83	1.32	0.053 44	0.21	0.448 5	1.3	0.060 79	0.08	380	5	347	86	-10
6	387	524	97	1.35	0.052 32	0.19	0.457 1	1.1	0.063 30	0.08	396	5	299	81	-32
7	230	247	58	1.07	0.053 96	0.21	0.465 5	1.3	0.062 52	0.08	391	5	369	87	-6
8	233	320	63	1.38	0.053 61	0.20	0.495 8	1.3	0.067 05	0.09	418	5	355	84	-18
9	332	319	91	0.96	0.054 48	0.19	0.516 0	1.1	0.068 68	0.09	428	5	391	75	-10
10	450	324	115	0.72	0.055 08	0.19	0.482 6	1.0	0.063 54	0.08	397	5	416	73	4
11	626	838	161	1.34	0.054 96	0.18	0.484 8	0.9	0.063 98	0.08	400	5	410	70	3
12	134	126	36	0.94	0.055 42	0.23	0.513 0	1.7	0.067 15	0.10	419	6	429	91	2
13	515	624	134	1.21	0.054 69	0.20	0.522 2	1.3	0.069 28	0.09	432	6	400	79	-8
14	279	257	72	0.92	0.054 33	0.20	0.478 8	1.2	0.063 94	0.09	400	5	385	80	-4
15	241	233	64	0.97	0.055 02	0.28	0.516 3	2.2	0.068 13	0.11	425	7	413	110	-3
16	244	267	65	1.09	0.053 84	0.21	0.486 1	1.3	0.065 54	0.09	409	5	364	84	-12
17	234	264	59	1.13	0.056 57	0.21	0.492 8	1.3	0.063 25	0.09	395	5	474	80	17

从白云母石英片岩中分选出的锆石大多具有不规则的外形,一些锆石呈自形晶,一些锆石的边缘呈浑圆状,或锯齿状和港湾状,显示了较强的后期改造。这些锆石具有复杂的内部结构,有的是典型的岩浆锆石,自形一半自形,发育岩浆环带(图 5a,b),有的显示出变质锆石特征:它形,无分带—弱分带结构或呈现变质增生结构(图 5c,d)。大多数锆石都记录的多期次改造:岩浆锆石核被变质锆石包裹(图 5e);早期的变质锆石被后期的岩浆锆石或变质锆石包裹(图 5f,g);一些锆石经历了蜕晶化过程,阴极发光(CL)图像下极暗(图 5h)。几乎所有的锆石都发育较窄的亮边(图 5i,j),这可能与白云母石英片岩的变质过程相关。由锆石的多样性表明,白云母石英片岩原岩的物源组成十分复杂。本文主要选择结构清晰的锆石进行年代学测试,结果显示较宽的时代跨度:(406 ± 4) Ma($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)~($2\ 856\pm 36$) Ma($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)(图 6a,b,表 2)。

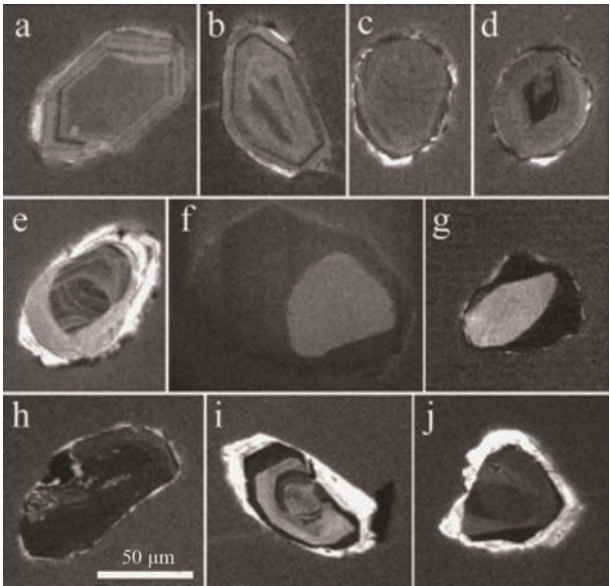
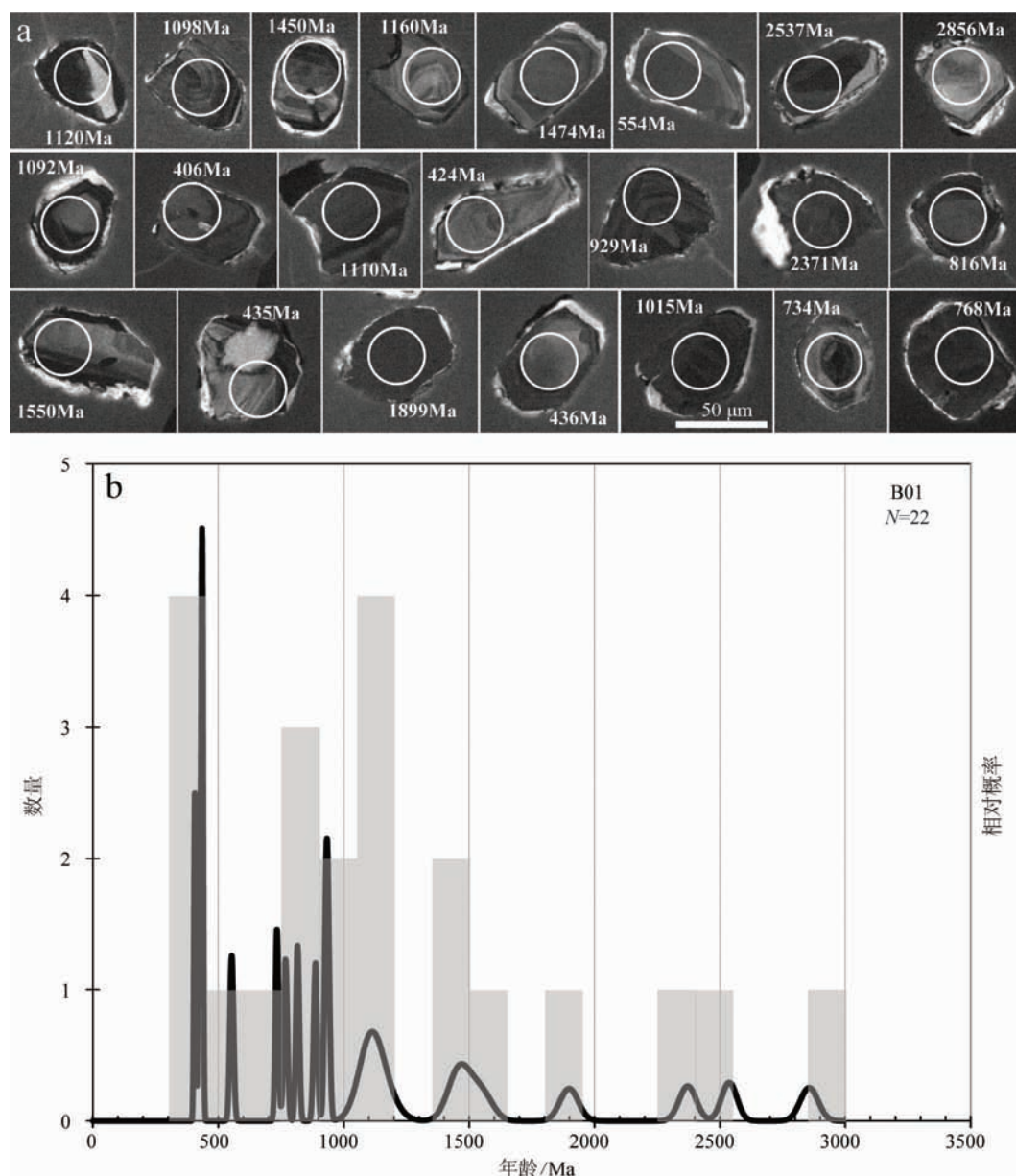


图 5 白云母石英片岩(B01)中的
锆石阴极发光照片,展示不同的结构
Fig. 5 CL images of zircons from muscovite-quartz
schist sample B01, showing different textures

5 讨论与结论

分布在吉尔吉斯斯坦境内阿特巴什—伊内尔切克断裂附近的多个蛇绿岩代表了南天山洋的残余,

蛇绿岩中辉长岩的年龄能够作为洋盆演化的时代下限。然而在同一件辉长岩样品中获得了两组年龄,出现这种现象的原因有以下两种可能:(1)辉长岩样品中混染了其他岩石单元,这些岩石单元可能是与



a—选择测试的锆石阴极发光图像;b—白云母石英片岩碎屑锆石年龄累积分布图。

图6 白云母石英片岩碎屑锆石 U-Pb 年龄测试结果

Fig. 6 CL images and U-Pb analysis results of zircons from gabbro and muscovite-quartz schist

辉长岩构成混杂带的组分,也可能是晚期侵入到辉长岩的岩脉、岩枝;(2)辉长岩中的锆石受变质作用改造。辉长岩的微观及宏观结构上都显示出均一的特征,未观察到其他组分,并且选择用于测试的锆石形态相似,不太可能是来自不同岩石中锆石的混合。Djanydjier 蛇绿岩中辉长岩经历了绿片岩相—低角闪岩相变质,从辉长岩中分选出的部分锆石经历了后期改造,这些锆石的岩浆结构大多被破坏,发育裂隙,或边缘被流体交代,或强烈蜕晶化(图 4b)。但是选择进行年龄测试的锆石在矿物学特征上显示为典型的岩浆锆石,几乎未观察到后期交代的痕迹(图

4a),两组年龄的锆石在形态和内部结构上没有明显差别。尽管如此,这些具有年轻年龄的锆石,在微观结构上可能已经受到变质作用影响,但这需要对锆石进行更为精细的矿物学研究来证实。在中国境内的黑英山蛇绿岩中的辉长岩具有两组年龄:425 和 392 Ma^[2,15];库米什蛇绿岩中麻粒岩锆石核部年龄为 452~640 Ma,变质边的时代为 390~392 Ma^[11]。这些信息与本次在吉尔吉斯斯坦境内获得的辉长岩年代学数据相似。南天山缝合带附近蛇绿岩中记录的两组年龄可能暗示了南天山洋演化过程中存在两个重要的阶段,但是在吉尔吉斯境内相关的报道较

表 2 白云母石英片岩(B01)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 数据
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from muscovite-quartz schist (B01)

序号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄 t/Ma				Disc. /%
	U	Th	^{206}Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$ /%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	
1	216	97	161	0.45	0.078 5	0.22	2.104 1	4.7	0.194 7	0.22	1 147	12	1 160	54	1
2	192	134	173	0.70	0.092 3	0.21	3.350 3	5.5	0.263 5	0.27	1 508	14	1 474	44	-2
3	164	258	58	1.58	0.056 5	0.25	0.698 0	2.8	0.089 7	0.12	554	7	473	95	-17
4	547	261	926	0.48	0.167 9	0.31	10.681 0	9.7	0.462 0	0.40	2 448	18	2 537	31	3
5	400	101	278	0.25	0.075 9	0.18	1.908 8	3.2	0.182 6	0.18	1 081	10	1 092	47	1
6	575	421	140	0.73	0.059 2	0.15	0.531 0	1.0	0.065 1	0.06	406	4	576	54	29
7	246	104	191	0.42	0.076 6	0.17	2.126 5	3.0	0.201 6	0.18	1 184	10	1 110	43	-7
8	330	234	88.6	0.71	0.063 7	0.17	0.597 2	1.2	0.068 0	0.06	424	4	732	55	42
9	573	206	343	0.36	0.070 3	0.14	1.502 5	1.7	0.155 1	0.13	929	7	937	42	1
10	286	254	500	0.89	0.152 3	0.31	9.496 1	10.6	0.452 6	0.42	2 407	19	2 371	34	-1
11	351	238	193	0.68	0.069 0	0.16	1.283 1	1.8	0.135 0	0.12	816	7	899	46	9
12	157	44	161	0.28	0.096 1	0.23	3.421 3	5.5	0.258 3	0.26	1 481	13	1 550	44	4
13	476	228	137	0.48	0.061 2	0.17	0.588 3	1.2	0.069 8	0.07	435	4	645	58	33
14	416	49	300	0.12	0.077 0	0.19	1.841 2	3.3	0.173 6	0.17	1 032	9	1 120	50	8
15	283	129	389	0.45	0.116 2	0.24	5.429 9	5.8	0.339 0	0.29	1 882	14	1 899	37	1
16	360	292	105	0.81	0.055 8	0.16	0.538 6	1.1	0.070 0	0.07	436	4	445	62	2
17	626	239	333	0.38	0.073 0	0.18	1.485 9	2.3	0.147 6	0.13	888	8	1 015	48	13
18	463	425	224	0.92	0.068 8	0.17	1.143 6	1.8	0.120 5	0.11	734	6	894	49	18
19	202	79	108	0.39	0.071 2	0.21	1.241 5	2.8	0.126 5	0.13	768	7	964	58	20
20	86	53	170	0.62	0.203 7	0.45	14.097 7	9.3	0.502 2	0.54	2 623	23	2 856	36	8
21	587	129	389	0.22	0.076 1	0.17	1.641 2	2.1	0.156 5	0.13	937	7	1 098	45	15
22	339	151	313	0.44	0.091 2	0.21	2.750 3	3.8	0.218 9	0.20	1 276	10	1 450	43	12

少。阿特巴什—伊内尔切克断裂附近的增生杂岩被划分出多期变形,与增生杂岩形成相关的变形作用发生在早石炭世晚期—晚石炭世,在这一过程中,蛇绿岩的组成部分逆冲到一套远洋沉积物之上^[28,35]。这一过程可能导致了辉长岩发生变质,并对其中的锆石进行了改造。此外,侵入到阿特巴什蛇绿岩中的早二叠世花岗岩中含有 428 Ma 的继承锆石,这类锆石被认为来源于蛇绿岩中的辉长岩,其年龄代表蛇绿岩的形成时代^[37],这说明二叠纪花岗岩的侵入也可能导致辉长岩发生变质。本文获得的 422 Ma 的锆石年龄应该代表辉长岩的岩浆结晶年龄,而 397 Ma 的锆石可能是原岩年龄与后期变质作用年龄的混合,该期变质作用可能与蛇绿岩构造侵位相关,也有可能与蛇绿岩侵位之后花岗岩岩浆活动相关,这还需要积累更多的证据。

包括白云母石英片岩在内的变质沉积岩组合在吉尔吉斯斯坦区域地质资料中被标识为元古宙地层(局部被标识为中元古界阿特巴什组)。这套地层从

Djanydjer 蛇绿混杂岩出露区向西南方向沿阿特巴什山脉延伸近 120 km。阿特巴什榴辉岩周围的片岩、片麻岩组合也被划分到该套地层中^[36]。然而一些俄文资料报道了该套地层中含有志留纪—早泥盆世的珊瑚化石,因此对于其时代已经存在不同认识^[38,35]。Hegner 将阿特巴什榴辉岩出露区的变质沉积岩划分为高级变质区和低级变质区,对高级变质区中的变质硬砂岩碎屑锆石的研究发现存在一组年轻的锆石(445~427 Ma)^[35]。本文所探讨的白云母石英片岩位于榴辉岩产地西南方向约 20 km 处,根据与其伴生的岩石组合和变质特征判断,属于 Hegner 划分的低级变质单元,与 Djanydjer 蛇绿混杂岩附近的绢云母石英片岩+绿片岩组合属于同一岩石构造单元。本文从白云母石英片岩中获得的年轻的碎屑锆石年龄(436~406 Ma)显示这套岩石系列并不是古老地块的残片,可能代表着晚古生代陆源碎屑沉积。尽管白云母石英片岩中的 22 个碎屑锆石年龄数据较少,不足以判断其物源区,但仍然能

为南天山洋的演化提供一些有价值的信息。在与阿特巴什变质硬砂岩中的锆石数据^[35]对比中发现以下特征:两类岩石的碎屑锆石年龄主体都分布在1.5 Ga~900 Ma,并且都含有太古宙的年龄记录(约2.5Ga)。此外,两者都存在一组较年轻的锆石,时代跨度为450~400 Ma(图7a,b)。吉尔吉斯南天山Kokshaal段的陆源碎屑沉积被认为形成于塔里木被动边缘^[24],图7c比较了来自塔里木克拉通

岩浆锆石^[39],1.0 Ga以及太古宙的锆石年龄数据与阿特巴什碎屑沉积物中的锆石年龄相对应,但塔里木克拉通缺少450~400 Ma的年龄数据。塔里木克拉通与南天山构造演化关系受到广泛关注^[40-42],针对中国境内南天山南缘泥盆系—石炭系沉积建造的研究,同样发现存在大量的年龄范围在460~390 Ma的碎屑锆石^[40],这与本文获得的碎屑锆石分布区间相似。吉尔吉斯中天山与北天山在晚奥陶世与南哈萨克斯坦拼合为统一大陆^[24,43-44],Hegner 等认为,根据吉尔吉斯南天山盆地的构造恢复,分布在南天山北缘的碎屑沉积物很可能来自吉尔吉斯北天山和中天山^[35]。天山造山带中的许多作为基底的古老陆块与塔里木克拉通具有亲缘性,1.3 Ga~900 Ma,850~750 Ma的锆石年龄在北天山和中天山也均有记录^[45],而450~400 Ma的碎屑锆石很可能来源于北天山广泛发育的花岗岩^[43]。伴随着南天山洋的俯冲消减,发育在北天山—中天山南缘的沉积物被卷入增生楔中发生变形与变质,并与经历过高压变质后折返的榴辉岩、蓝片岩构成混杂岩。本文报道的强烈变形的白云母石英片岩中最年轻的碎屑锆石年龄为406 Ma,这限定了其原岩沉积时代不早于早泥盆世,也说明增生杂岩中变质沉积岩的部分物源很可能来自缝合带以北的吉尔吉斯中天山—北天山。

审稿专家提出的宝贵意见对于完善本文发挥了重要作用。范堡程、罗彦军参与了野外工作。野外工作得到吉尔吉斯斯坦地质矿产署的协助,实验室工作得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室弓化栋老师的指导和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Xiao W J, Huang B C, Han C M, et al. A review of the western part of the Altai; A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 2010, 18: 253-273.
- [2] Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109: 74-93.
- [3] Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, et al. Palaeozoic tectonic evolutions of the Tianshan belt, NW China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2011, 54: 166-184.

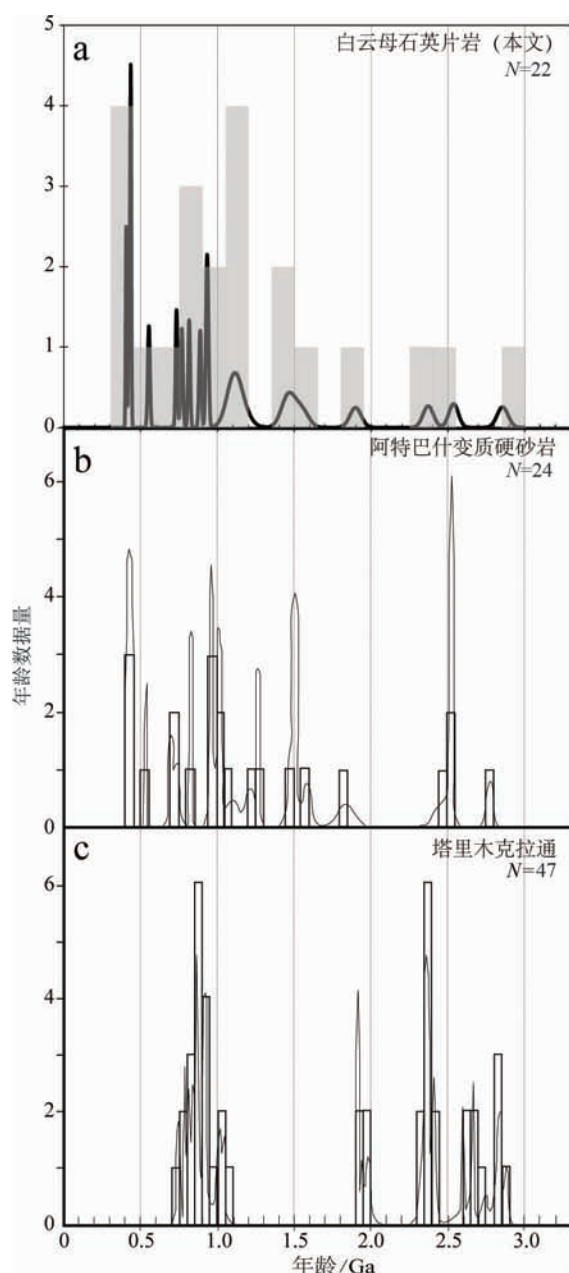


图7 白云母石英片岩碎屑锆石年龄分布(a)与阿特巴什变质硬砂岩^[35](b)以及塔里木克拉通^[38](c)比较
Fig. 7 Comparison of cumulative probability plots for detrital zircon ages for muscovite-quartz schist (a), Atbashi metagraywacke^[35](b) and Tarim Craton^[38](c)

- [4] Wilhem C, Windley B F, Stampfi G M. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113: 303-341.
- [5] Xiao W J, Santosh M. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 1429-1444.
- [6] Laurent-Charvet S, Charvet J, Monié P, et al. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern Central Asia (NW China): New structural and geochronological data [J]. *Tectonics*, 2003, 22: 1099-1101.
- [7] Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L S, et al. Palaeozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altay, eastern Xinjiang, NW China[J]. *Terra Nova*, 2002, 14: 249-256.
- [8] Charreau J, Chen Y, Gilder S, et al. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan mountains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 177-192.
- [9] Charreau J, Gilder S, Chen Y, et al. Magnetostratigraphy of the Yaha section, Tarim Basin (China): 11 Ma acceleration in erosion and uplift of the Tianshan Mountains[J]. *Geology*, 2006, 34: 181-184.
- [10] De Grave J, Buslov M M, Van den haute P, et al. Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29: 188-204.
- [11] 周鼎武, 苏犁, 简平, 等. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *科学通报*, 2004, 49: 1411-1415.
- [12] 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄[J]. *岩石学报*, 2004, 22: 65-73.
- [13] 王超, 刘良, 车自成, 等. 西南天山阔克萨彦岭巴雷公镁铁质岩石的地球化学特征、LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其大地构造意义[J]. *地质论评*, 2007, 55: 743-753.
- [14] 马中平, 夏林圻, 徐学义, 等. 南天山库鲁湖蛇绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *西北大学学报*, 2007, 37: 107-110.
- [15] Wang Q C, Shu L S, Charvet J, et al. Understanding and study perspectives on tectonic evolution and crustal structure of the Paleozoic Chinese Tianshan[J]. *Episodes*, 2010, 33: 242-266.
- [16] Wang B, Shu L S, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China)[J]. *Tectonophysics*, 2011, 497: 85-104.
- [17] 王作勋, 邬继易, 吕喜朝, 等. 天山多旋回构造演化及成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [18] Liu Y, Hao S G. Evolutionary significance of Pylentonemid radiolarians and their Late Devonian species from southwestern Tianshan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80: 647-655.
- [19] 舒良树, 王博, 朱文斌. 南天山蛇绿混杂岩放射虫化石的时代及其构造意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1161-1168.
- [20] 李玮, 胡健民, 高卫等. 新疆南天山库尔干一带泥盆纪—早石炭世放射虫组合的发现[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 584-591.
- [21] Chen B, Long X P, Yuan C, et al. Geochronology and geochemistry of Late Ordovician-Early Devonian gneissic granites in the Kumishi area, northern margin of the South Tianshan Belt: Constraints on subduction process of the South Tianshan Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 293-309.
- [22] Simonov V A, Sakiev K S, Volkova N I, et al. Conditions of formation of the Atbashi ridge eclogites (South Tien Shan) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, 49: 803-815.
- [23] Khristov Ye V, Ivanov K S, Mikolaichuk A V, et al. Structural position and age of ophiolites of Karaterrek massive[J]. *Izvestia Akademii Nauk Respubliki Kyrgyzstan*, 1999, 65-69 (in Russian).
- [24] Biske Yu S, Seltmann R. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans[J]. *Gondwana Research*, 2010, 17: 602-613.
- [25] Biske Yu S, Konopelko D L, Seltmann R. Geodynamics of late Paleozoic magmatism in the Tien Shan and its framework [J]. *Geotectonics*, 2013, 47: 291-309.
- [26] Alekseev D V, Aristov V A, Degtyarev K E. The age and tectonic setting of volcanic and cherty sequences in the ophiolite complex of the Atbashe Ridge (Southern Tien Shan)[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2007, 413A: 380-383.
- [27] De Grave J, Glorie S, Busiov M M, et al. Thermo-tectonic history of the Issyk-Kul basement (Kyrgyz Northern Tien Shan, Central Asia) [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 998-1020.
- [28] Burtman V S. Nappes of the southern Tien Shan[J]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2008, 10: ES1006. doi: 10.2205/2007ES000223.
- [29] Seltmann R, Konopelko D, Biske G, et al. Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tianshan orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 821-838.
- [30] Xiao W J, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1316-1341.
- [31] Gao J, Long L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the

- South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1221-1238.
- [32] Qian Q, Gao J, Klemd R, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 551-569.
- [33] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 2007, 164: 31-47.
- [34] Burtman V S. The Tien Shan Early Paleozoic tectonics and geodynamics[J]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2006, 8: ES3003. doi: 10.2205/2006ES000202.
- [35] Hegner E, Klemd R, Kröner A, et al. Mineralogy ages and *P-T* conditions of late Paleozoic high-pressure eclogite and provenance of mélangé sediments in the South Tianshan Orogen of Kyrgyzstan[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310: 916-950.
- [36] Жуков Ю В, Захаров И Л, Березанский А В. геологическая карта кыргызской республики, 1 : 500000[M]. 2008.
- [37] Glorie S, Grave J D, Buslov M M, et al. Tectonic history of the Kyrgyz South Tien Shan (Atbashi-Inylchek) suture zone: The role of inherited structures during deformation-propagation[J]. *Tectonics*, 2011, 30: TC6016. doi: 10.1029/2011TC002949.
- [38] Biske Y S, Zubtsov Y S, Porshnyakov G S. Hercynides of the Atbashi-Kokshaal Region of the Southern Tian-Shan [M]. Leningrad, Russia, Leningrad State University Publishing, 1985: 190(in Russian).
- [39] Lu S, Li H, Zhang C, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim craton and surrounding continental fragments[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 94-107.
- [40] 李忠, 高剑, 郭春涛, 等. 塔里木块体北部泥盆—石炭纪陆缘构造演化: 盆地充填序列与物源体系约束[J]. *地学前缘*, 2015, 22: 35-52.
- [41] 常健, 邱楠生, 李佳蔚. 塔里木盆地与南天山的耦合关系: 来自(U-Th)/He 年龄的新证据[J]. *地学前缘*, 2012, 19: 234-243.
- [42] 汤良杰, 邱海峻, 云露等. 塔里木盆地北缘—南天山造山带盆—山耦合和构造转换[J]. *地学前缘*, 2012, 19: 195-204.
- [43] Solomovich L I, Trifonov B A. Postcollisional granites in the South Tien Shan Variscan collisional belt, Kyrgyzstan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 7-21.
- [44] Konopelko D, Biske G, Seltmann M, et al. Deciphering Caledonian events: Timing and geochemistry of the Caledonian magmatic arc in the Kyrgyz Tien Shan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 131-141.
- [45] Agramonte Y R, Kroner A, Alexeiev D V, et al. Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeogeographic implications[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26: 957-974.