



引文格式: 刘江, 罗彦军, 范堡程, 等. 塔吉克斯坦南帕米尔阿里秋 (Alichur) 穹隆花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 290–299. DOI: 10.12401/j.nwg.2024027

Citation: LIU Jiang, LUO Yanjun, FAN Baocheng, et al. U-Pb Dating, Hf-isotopic Characteristics and Tectonic Implications of Granite, Alichur Dome, Southern Pamir, Tajikistan[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 290–299. DOI: 10.12401/j.nwg.2024027

塔吉克斯坦南帕米尔阿里秋 (Alichur) 穹隆花岗岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素特征及地质意义

刘江¹, 罗彦军¹, 范堡程¹, Mustaf Gadoev²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 塔吉克斯坦国家科学院, 地质、地震工程与地震学研究所, 塔吉克斯坦 杜尚别 734063)

摘要: 南帕米尔地区分布一系列受拆离断层控制, 于印度-欧亚大陆碰撞过程中形成的穹隆构造, 穹隆核部以晚中生代花岗岩和高级变质岩为主, 并有少量新生代花岗质侵入岩。为阐明穹隆有关花岗岩的侵位背景和构造意义, 笔者通过 LA-MC-ICP 锆石 U-Pb 定年测试获得侵位到穹隆拆离断层韧性剪切带中的花岗岩和占穹隆体积主体的核部白垩纪花岗岩年龄, 分别为 (19.3 ± 0.4) Ma 和 (111.7 ± 0.8) Ma。结合帕米尔地区和南帕米尔穹隆构造已有研究成果, 笔者认为锆石 Hf 同位素特征反映南帕米尔地区晚中生代花岗岩是含有亏损地壳熔融作用的结果。新生代花岗岩形成于构造减压导致的中下地壳部分熔融作用, 宏观上可能形成于印度板块碰撞俯冲过程中的减速调整阶段。

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0290-10

U-Pb Dating, Hf-isotopic Characteristics and Tectonic Implications of Granite, Alichur Dome, Southern Pamir, Tajikistan

LIU Jiang¹, LUO Yanjun¹, FAN Baocheng¹, Mustaf Gadoev²

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe 734063, Tajikistan)

Abstract: Cenozoic domes separated by detachments and formed during the India-Eurasian collision, are commonly distributed in the southern Pamir. The core complex of these domes are made up of high-grade metamorphic rocks and granite. The granite mainly formed during the Late Mesozoic and minor of them formed during the Cenozoic. The granite samples gathered along the detachments and from the granite comprising the bulk Alichur dome are measured by on the LA-MC-ICP U-Pb zircon dating. The formation times of the granite are (19.30 ± 0.36) Ma and (111.7 ± 0.8) Ma. Hf-isotopic characteristics of zircon demonstrate the granite formed by partial melting of crust. The Cenozoic granite is probably closely associated with the structural decompression caused by the extensional decollement of the domes.

收稿日期: 2022-09-14; 修回日期: 2023-12-14; 责任编辑: 吕鹏瑞

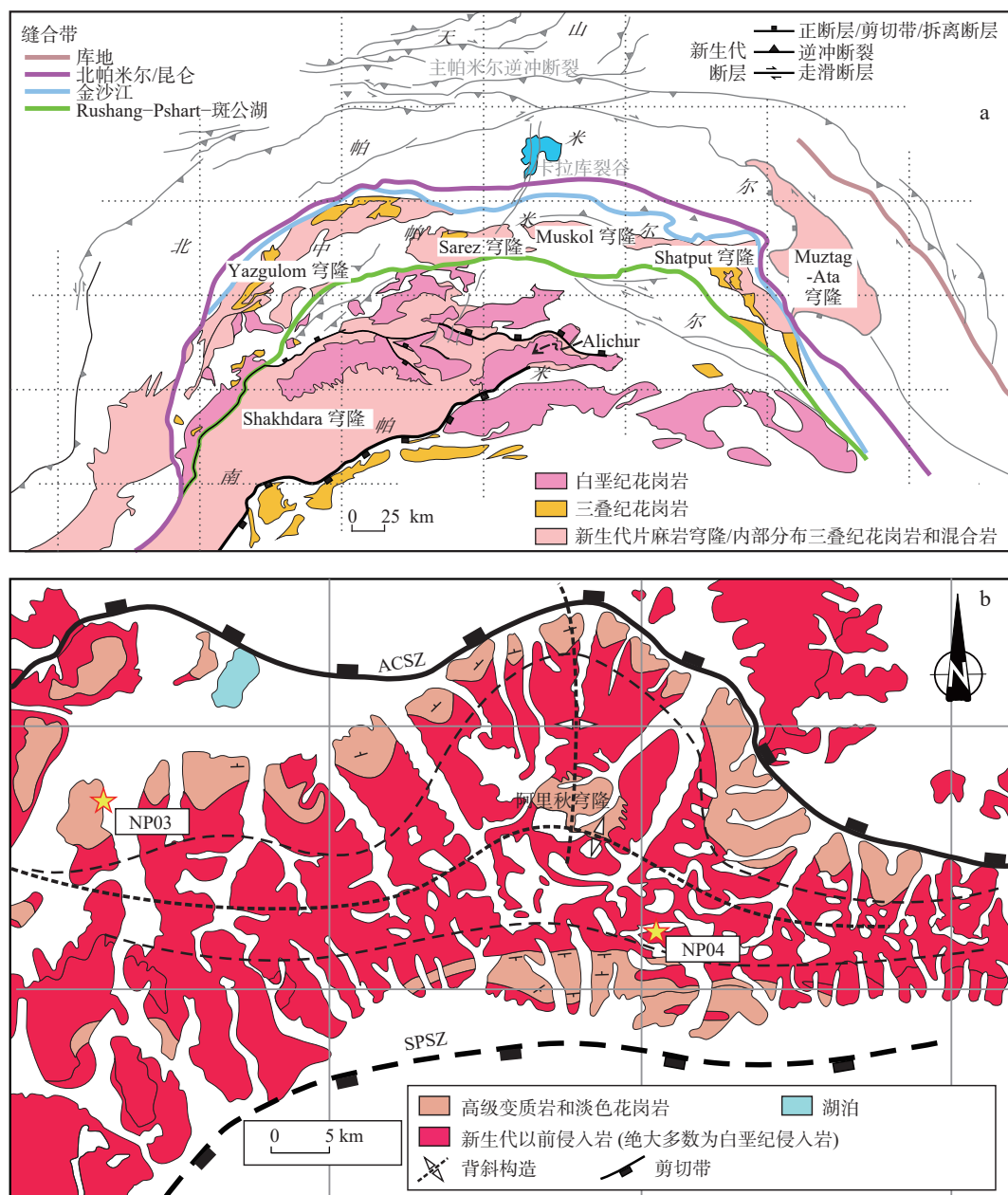
基金项目: 中国地质调查局项目“丝绸之路境内段(新疆)资源环境承载能力监测评价项目”(DD20221731), 第三次新疆综合科学考察项目“塔里木河流域关键区生态适宜性评估及绿色发展建议”(2022xjkk0305), 国家重点研发计划项目课题“中亚成矿域战略性矿产信息及成矿规律”(2021YFC2901802)联合资助。

作者简介: 刘江(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事构造地质研究。E-mail: liujiang689@163.com。

喜马拉雅山以西的帕米尔地区,即通常称为西构造结的地区,分布有一系列新生代同挤压穹隆构造,包括北帕米尔木孜塔格(Muztag-Ata)穹隆,中帕米尔雅兹古鲁姆(Yazgulom)、色雷兹(Serez)、慕斯库尔(Muskol)、沙巴(Shatput)穹隆,南帕米尔沙赫达拉(Shakh dara)和阿里秋(Alichur)穹隆(图1)。其中,木孜塔格、沙赫达拉和阿里秋等3个穹隆受拆离断层控制特征明显。但是,这些穹隆与北喜马拉雅片麻岩穹隆构造相同,但不同于美国西部盆岭省和中国东部发

育的变质核杂岩,后者也被称为科迪勒拉型穹隆构造,是在伸展的大地构造背景下出现的。

20世纪中期,前苏联对帕米尔地区进行了1:20万地质填图,对帕米尔南部穹隆构造的岩性、构造特征进行了清晰的表达,但由于地质学认识程度和年代学测试方法的限值,并没有填出注入到韧性剪切带中的花岗岩,而且仅将穹隆核部花岗岩统一定为白垩纪。始于上世纪90年代,在德国科学家组织实施的“塔吉克斯坦帕米尔地区 and 天山地区实施的天山-帕米尔



ACSZ. 阿里秋拆离断层; SPSZ. 南帕米尔剪切带

图1 帕米尔地区构造地质简图(a)和 Alichur 穹隆构造地质图(b)(据 Stübner et al., 2013b 修改)

Fig. 1 (a) Geological sketch of Pamir and (b) the geological map of Alichur dome

地球动力学计划”(Tien Shan-PAmir GEodynamic Program, TIPAGE)资助下,德国和美国科学家为主的科研团队在帕米尔地区开展了系列研究工作,对南帕米尔沙赫达拉-阿里秋片麻岩穹隆的进行了系统的构造地质和剥露过程研究,并初步探讨了穹隆核部和侵位到韧性剪切带中的花岗岩的岩浆演化和出露过程(Stübner et al., 2013a, 2013b)。

2012 年以来,中国地质调查局西安地质调查中心与塔吉克斯坦地质总局塔吉克斯坦帕米尔地区联合开展了系列地质调查及相关研究工作(吕鹏瑞等, 2017; 洪俊等, 2017; 范堡程等, 2017, 2020, 2022; 张海迪等, 2019), 笔者对穹隆构造进行了考察, 并采集了白垩纪花岗岩和侵位到韧性剪切带内的新生代花岗岩的典型样品。结合帕米尔地区已有研究成果, 基于花岗岩锆石 U-Pb 年龄和原位 Hf 同位素分析的工作手段, 阐述穹隆有关的两期花岗岩物质来源, 并讨论其对应的大地构造背景。

1 地质背景

1.1 帕米尔总体构造地质背景

帕米尔在地貌和地质上分别是喜马拉雅山系和喜马拉雅造山带的西延部分, 也被称作西构造结, 现今地貌特征则是新生代印度板块向欧亚板块挤压、隆升的结果(Tapponnier et al., 1981), 与西藏的地壳厚度相当。帕米尔北缘主帕米尔逆冲断层向北推覆, 覆盖在塔吉克东北和塔里木盆地沉积之上, 东部和西部的分别以喀喇昆仑断裂和达儿瓦兹断裂为界, 两条断裂分别以右旋和左旋走滑剪切为主。以古生代至中生代的缝合带、岩浆带和微陆块认识为基础, 帕米尔从南往北可又可划分为不同的构造单元(图 1a)。中帕米尔和南帕米尔以多个穹隆为中心, 周围环绕古生代—新生代火山—沉积岩石和中生代岛弧相关岩体。穹隆构造以断层为边界, 核部岩石类型主要为花岗闪长岩、正片麻岩和负片麻岩、片岩、大理岩和角闪岩。其中, 阿里秋穹隆即位于南帕米尔中部(图 1b)。

1.2 阿里秋穹隆

南帕米尔结晶岩为太古代—元古代混合岩化的负片麻岩和正片麻岩。结晶岩构造上发育两个新生代穹隆区, 分别是 $\sim 250 \times 90$ km 的沙赫达拉穹隆(Shakh-dara)和 $\sim 125 \times 25$ km 的阿里秋穹隆(Alichur)穹隆(图 1b)。沿沙赫达拉穹隆和阿里秋南缘发育的南

帕米尔剪切带(South Pamir Shear Zone), 上盘向 SSE 运动, 伸展断层, 大致沿塔吉克斯坦—阿富汗边界的瓦罕走廊展布, 其剪切带下盘受剥蚀自深度 30~40 km 层位出露(Schmidt et al., 2011)。

阿里秋穹隆主体为白垩纪长英质正片麻岩/花岗闪长岩, 曾遭受低温变质的重结晶作用, 并发育伟晶岩岩床和岩脉。上盘向北的阿里秋剪切带定义了阿里秋穹隆的北界。白垩纪花岗石岩石及其母岩未变形或弱变形。

以往的石榴子石 Lu-Hf(Smit et al., 2012), 锆石、独居石和榍石 U/Th-Pb(Schmidt et al., 2011; Stübner et al., 2013b)、云母 Rb-Sr 和 Ar-Ar, 锆石和磷灰石裂变径迹以及锆石(U-Th)/He(Hubbard et al., 1999; Stübner et al., 2013a)等地质热年代学地质年代学数据给出了沙赫达拉-阿里秋结晶岩石的大致出露过程: 印度-欧亚大陆碰撞开始之后, 从始新世至渐新世, 地壳缩短, 并发生区域混合岩化作用, 以及随后(21~20 Ma)的近 SN 向伸展和剥蚀, 伴随穹隆隆升。整个中新世得以维持, 伸展流动持续从超固态(hypersolidus)向韧性(ductile)和脆-韧性条件发展, 冷却年龄向穹隆中央向边界逐渐变年轻。穹隆事件最终在 ~ 2 Ma 结束。在此期间, 穹隆剥蚀幅度达 ~ 2 km, 局部甚至达到 4 km。 ~ 2 Ma 之后, 地震震源机制解(Sippl et al., 2013)和构造现象(Stübner et al., 2013a)显示变形机制急剧转变为与 SN 向有关的走滑剪切和伴有活动裂谷作用的 EW 向伸展。

2 实验方法及样品描述

笔者对阿里秋穹隆核部花岗岩和侵位到韧性剪切带内的花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测定。样品的破碎和锆石挑选在河北廊坊地质服务有限公司完成。挑出锆石完成制靶后, 进行投射光、反射光和阴极发光观察和照相, 确定锆石成因分析和测年点位。阴极发光图像拍摄、锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 Glitter 4.4 (Van Achterbergh et al., 2001)完成, 详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015, 2023)。其中, 测试

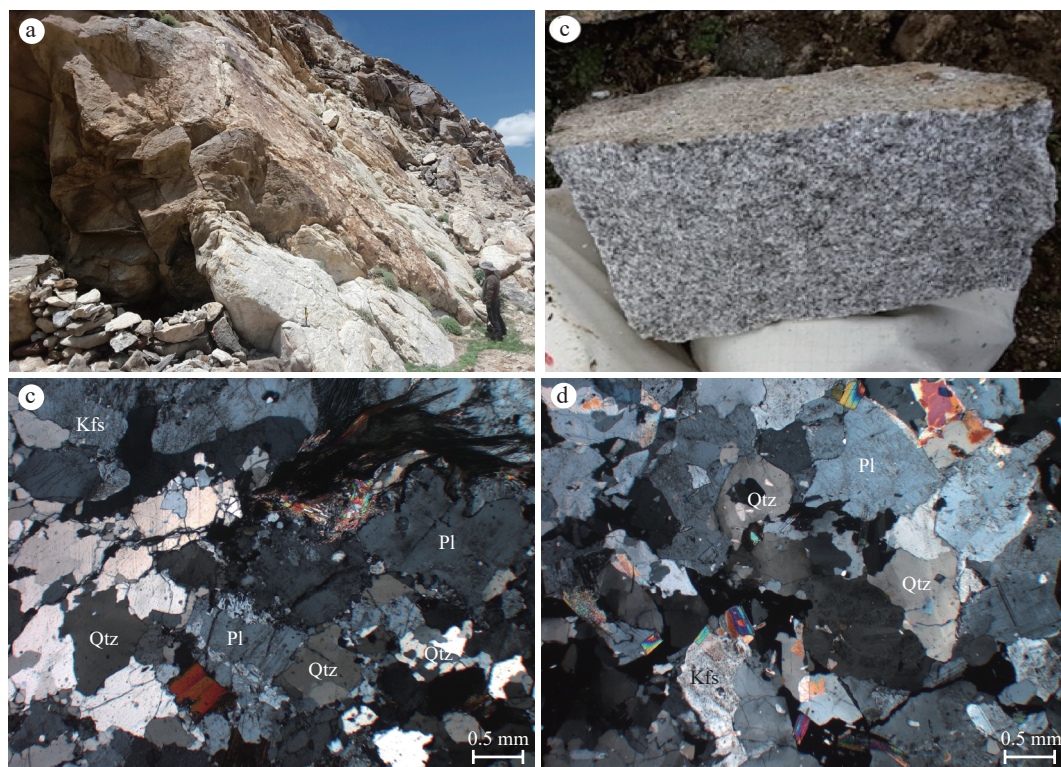
竖斑直径为 24 μm 。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2003) 完成。锆石微量元素含量利用参考标样 NIST610 玻璃作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算。NIST610 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。

锆石原位微区 Hf 同位素测试是在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室利用 Neptune 型多接收等离子体质谱仪和 Geolas Pro 型激光剥蚀系统联用的方法完成的, 详细测试流程可参照 Meng 等(2014)和侯可军等(2007)。测试竖斑直径为 32 μm , 激光剥蚀的样品气溶胶由氦气作为载气输送到质谱仪中进行测试, 为了调节和提高仪器灵敏度, 气路中间引入了氩气和少量氮气。所有测试位置与 U-Pb 定年点位相同或靠近。每分析

10 个样品测点分析一组锆石标准样品作为监控, 包括 GJ-1、91500、Plesovice、MUN-1。实验中, GJ-1 的测试精度为 $0.282\,030 \pm 30(2\text{SE})$, 91500 的测试精度为 $0.282\,286 \pm 30(2\text{SE})$, Plesovice 的测试精度为 $0.282\,482 \pm 30(2\text{SE})$, MUN-1 的测试精度为 $0.282\,135 \pm 30(2\text{SE})$, 每分析 10 个样品测点分析一次锆石标准 GJ-1 作为监控; 实验 GJ-1 的实际标样 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.281\,990 \sim 0.282\,070$, 应用测试过程中的所有标样值计算加权平均值, 取 1σ 计算。

样品 NP03 采自侵位到韧性剪切带中的花岗岩, 野外观察仅发生微弱变形或未变形。该处围岩在苏联 1:20 万地质图(1962)标记为高级变质岩(混合岩), 花岗岩未标识。样品 NP04 为于阿里秋穹隆核部岩体, 未发生变性, 中粒花岗岩, 苏联 1:20 万地质图将该岩体标记为白垩纪。

阿里秋穹隆构造韧性剪切带样品(NP03)和穹隆核部样品(NP04)矿物组成相似, 以长石(斜长石和钾长石, 含量达 60%~65%)和石英(20%~25%)为主, 仅有少量的云母类矿物和副矿物(图 2)。



A、C. 样品 NP03 野外露头 and 正交偏光显微照片; B、D. 样品 NP04 手标本(样品长度为 13 cm)和正交偏光显微照片;
Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 碱性长石

图2 阿里秋穹隆花岗岩野外、手标本和显微照片

Fig. 2 Photographs of granitic rocks from the Alichur dome in the views of outcrop, hand specimen and rock section

3 研究结果

3.1 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

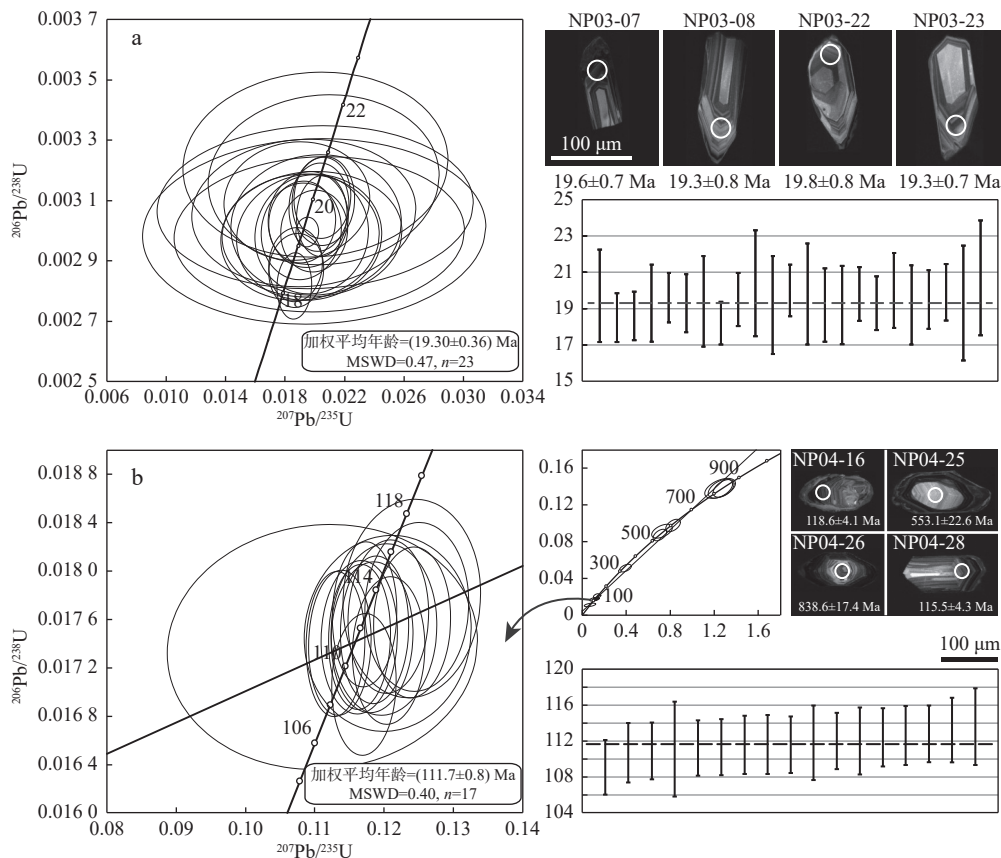
侵位到阿里秋韧性剪切带花岗岩样品 NP03 的锆石阴极发光图像显示, 锆石颗粒自形, 长柱状, 棱角清晰, 颗粒长度为 $100\sim 300\ \mu\text{m}$, 长宽比为 $2:1\sim 3:1$ (图 3a)。共选取 23 个点进行 U-Pb 同位素测试, 全部分析点均位于锆石边部的暗色韵律环带上。23 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $18.8\sim 20.7\ \text{Ma}$ (表 1), 其年龄加权平均值为 $(9.3\pm 0.3)\ \text{Ma}$ (MSWD=0.47), 代表阿里秋韧性剪切带内部花岗岩的最终结晶年龄。

样品 NP04 共选取 26 个点进行 U-Pb 同位素测试, 大多数锆石发育核-幔-边结构, 核部和幔部为继承锆石, 核部色调较暗, 幔部形状不规则, 色调灰白; 边部宽度为 $20\sim 50\ \mu\text{m}$, 色调黑暗并显示密集的韵律生长环带, 表明为岩浆成因。少数锆石仅发育核-边结构, 核部色调较亮, 围绕核部发育具有韵律环带的暗

色生长边 (图 3b)。17 个分析点均位于锆石边部的暗色韵律环带上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $109.1\sim 113.5\ \text{Ma}$ (表 1), 年龄加权平均值为 $(111.7\pm 0.8)\ \text{Ma}$ (MSWD=0.40), 代表阿里秋穹隆核部花岗岩的最终结晶年龄。另外 3 个位于环带上的测试点年龄分别为 $71.3\ \text{Ma}$ 、 $132.2\ \text{Ma}$ 和 $134.2\ \text{Ma}$, 与上述年龄值存在显著差别, 未采用于计算加权平均值。样品 NP004 核部 6 个测试点获得的年龄分别为 $321.8\ \text{Ma}$ 、 $541.7\ \text{Ma}$ 、 $553.1\ \text{Ma}$ 、 $610.8\ \text{Ma}$ 、 $826.6\ \text{Ma}$ 和 $838.6\ \text{Ma}$, 显著早于锆石边缘、环带测试结果。

3.2 Hf 同位素特征

样品 NP03 中 23 个点全部位于岩浆锆石环带中。Hf 同位素初始比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\ 585\sim 0.282\ 753$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.000\ 336\sim 0.001\ 179$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为, 加权平均值为 $-6.2\sim -0.2$; Hf 的亏损地幔两阶段模式年龄 T_{DM1} 值为 $698\sim 933\ \text{Ma}$, 平均值为 $825\ \text{Ma}$; T_{DM2} 值为 $1\ 114\sim 1\ 493\ \text{Ma}$, 加权平均年龄为 $1\ 315\ \text{Ma}$ (表 2)。



a. 样品 NP03 锆石年龄与 CL 图像; b. NP04 锆石年龄与 CL 图像; CL 图像束斑直径为 $24\ \mu\text{m}$

图3 阿里秋穹隆花岗岩代表性锆石 CL 图像、U-Pb 年龄谐和图和年龄分布

Fig. 3 CL images of representative zircons and zircon U-Pb concordia diagram of granitic rocks from the Alichur dome

表 1 南帕米尔阿里秋穹隆花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石原位 U-Pb 测试数据统计表

Tab. 1 LA-MC-ICPMS in-situ analysis of zircon U-Pb isotopic data of the granitic rocks from the Alichur dome

分析 点号	含量(10^{-6})		Th/U	同位素比值						表观年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$
NP0301	143.8	218.79	0.66	0.019 24	0.006 17	0.003 06	0.000 20	0.001 75	0.000 35	19.3	6.15	19.7	1.27	35.4	7.09
NP0303	74.3	1 073.54	0.07	0.018 75	0.001 51	0.002 87	0.000 10	0.000 76	0.000 80	18.9	1.50	18.5	0.67	15.3	16.17
NP0305	242.0	1 273.30	0.19	0.018 68	0.001 47	0.002 89	0.000 10	0.001 10	0.000 23	18.8	1.47	18.6	0.67	22.2	4.71
NP0306	105.8	399.03	0.27	0.019 82	0.004 94	0.002 99	0.000 17	0.000 66	0.000 62	19.9	4.92	19.3	1.06	13.3	12.54
NP0307	474.1	1 537.50	0.31	0.020 46	0.001 38	0.003 05	0.000 11	0.001 13	0.000 17	20.6	1.37	19.6	0.68	22.9	3.37
NP0308	416.4	814.53	0.51	0.019 09	0.002 19	0.003 00	0.000 13	0.001 25	0.000 16	19.2	2.18	19.3	0.80	25.3	3.13
NP0309	160.3	373.64	0.43	0.020 08	0.004 68	0.003 02	0.000 19	0.000 94	0.000 50	20.2	4.66	19.4	1.25	19.0	10.00
NP0311	93.1	5 043.10	0.02	0.018 62	0.000 96	0.002 82	0.000 09	0.004 46	0.001 16	18.7	0.96	18.2	0.59	90.0	23.32
NP0312	273.3	1 000.64	0.27	0.019 15	0.001 85	0.003 03	0.000 11	0.001 80	0.000 23	19.3	1.84	19.5	0.73	36.4	4.74
NP0314	125.3	214.46	0.58	0.020 58	0.006 35	0.003 17	0.000 23	0.000 33	0.000 48	20.7	6.32	20.4	1.46	6.6	9.63
NP0315	118.0	188.78	0.62	0.020 32	0.007 98	0.002 99	0.000 21	0.000 95	0.000 48	20.4	7.95	19.2	1.35	19.2	9.66
NP0316	143.2	1 130.85	0.13	0.020 51	0.001 57	0.003 11	0.000 11	0.000 77	0.000 34	20.6	1.56	20.0	0.71	15.5	6.82
NP0317	153.1	211.37	0.72	0.020 03	0.008 69	0.003 08	0.000 22	0.000 61	0.000 47	20.1	8.65	19.8	1.39	12.4	9.44
NP0319	114.2	620.13	0.18	0.019 79	0.003 14	0.002 99	0.000 16	0.001 07	0.000 59	19.9	3.12	19.2	1.01	21.5	11.96
NP0321	122.4	342.71	0.36	0.019 00	0.004 38	0.002 98	0.000 17	0.001 22	0.000 47	19.1	4.36	19.2	1.08	24.6	9.57
NP0322	312.4	1 203.89	0.26	0.020 29	0.001 66	0.003 08	0.000 12	0.001 63	0.000 20	20.4	1.66	19.8	0.74	32.8	4.08
NP0323	353.8	884.27	0.40	0.019 95	0.001 85	0.003 00	0.000 11	0.001 08	0.000 16	20.1	1.84	19.3	0.74	21.9	3.18
NP0324	247.9	438.90	0.56	0.018 79	0.004 01	0.003 10	0.000 16	0.001 06	0.000 23	18.9	3.99	20.0	1.03	21.3	4.61
NP0325	104.3	395.11	0.26	0.019 62	0.004 01	0.002 98	0.000 17	0.001 53	0.000 51	19.7	4.00	19.2	1.09	31.0	10.30
NP0326	513.0	879.07	0.58	0.019 56	0.002 20	0.003 04	0.000 13	0.001 21	0.000 13	19.7	2.19	19.5	0.81	24.3	2.60
NP0327	213.9	1 486.34	0.14	0.020 58	0.001 72	0.003 10	0.000 12	0.001 30	0.000 30	20.7	1.71	19.9	0.78	26.3	5.97
NP0328	111.5	246.43	0.45	0.019 94	0.009 45	0.003 00	0.000 25	0.001 93	0.000 70	20.0	9.41	19.3	1.58	39.0	14.14
NP0330	113.6	390.17	0.29	0.020 05	0.007 29	0.003 22	0.000 25	0.000 30	0.000 97	20.2	7.26	20.7	1.58	6.1	19.55
NP0402	57.9	2 654.42	0.02	0.126 43	0.005 10	0.017 3	0.000 5	0.000 58	0.001 66	120.9	4.6	110.7	3.3	11.7	33.5
NP0403	171.0	269.53	0.63	0.391 55	0.021 98	0.051 2	0.001 7	0.024 86	0.001 31	335.5	16.0	321.8	10.3	496.4	25.9
NP0405	412.3	724.18	0.57	0.825 03	0.026 86	0.097 7	0.002 8	0.029 09	0.001 11	610.8	14.9	600.8	16.3	579.5	21.8
NP0406	101.7	1 267.19	0.08	0.151 05	0.007 07	0.020 7	0.000 7	0.012 85	0.001 62	142.8	6.2	132.2	4.2	258.1	32.3
NP0407	37.6	1 524.64	0.02	0.118 13	0.004 78	0.017 5	0.000 5	0.002 06	0.002 74	113.4	4.3	111.6	3.3	41.5	55.3
NP0408	77.4	2 529.12	0.03	0.120 49	0.004 30	0.017 4	0.000 5	0.008 00	0.001 35	115.5	3.9	110.9	3.2	161.1	27.1
NP0409	52.9	3 352.01	0.02	0.117 00	0.003 79	0.017 1	0.000 5	0.005 61	0.002 00	112.4	3.5	109.1	3.0	113.2	40.2
NP0410	104.3	4 012.15	0.03	0.118 50	0.004 00	0.017 5	0.000 5	0.006 58	0.001 20	113.7	3.6	112.0	3.1	132.6	24.1
NP0411	59.7	3 293.66	0.02	0.117 06	0.003 75	0.017 7	0.000 5	0.006 76	0.001 32	112.4	3.4	112.8	3.1	136.1	26.5
NP0413	162.2	436.98	0.37	0.704 84	0.025 12	0.087 2	0.002 6	0.028 72	0.001 43	541.7	15.0	539.2	15.2	572.3	28.1
NP0414	67.5	1 492.78	0.05	0.120 44	0.004 74	0.017 6	0.000 5	0.007 13	0.001 60	115.5	4.3	112.6	3.3	143.7	32.1
NP0415	70.0	1 037.48	0.07	0.124 57	0.006 07	0.017 7	0.000 6	0.004 95	0.001 48	119.2	5.5	113.2	3.6	99.8	29.8
NP0416	81.5	1 462.34	0.06	0.123 92	0.004 55	0.017 6	0.000 5	0.006 31	0.001 13	118.6	4.1	112.4	3.2	127.1	22.7
NP0417	51.1	1 906.82	0.03	0.116 29	0.004 49	0.017 5	0.000 5	0.004 41	0.001 70	111.7	4.1	111.6	3.3	89.0	34.2
NP0418	85.2	3 397.08	0.03	0.113 52	0.003 66	0.017 4	0.000 5	0.004 35	0.001 19	109.2	3.3	111.3	3.1	87.7	24.0
NP0419	78.5	251.13	0.31	0.112 88	0.003 46	0.017 4	0.000 5	0.007 66	0.001 13	108.6	3.2	111.2	3.1	154.1	22.7
NP0420	251.1	255.73	0.98	1.257 02	0.045 23	0.137 7	0.004 2	0.042 14	0.001 62	826.6	20.4	831.7	23.6	834.2	31.5
NP0421	93.1	4 868.35	0.02	0.116 38	0.003 65	0.017 5	0.000 5	0.007 25	0.001 11	111.8	3.3	111.6	3.1	145.9	22.3
NP0422	38.1	1 223.48	0.03	0.119 91	0.006 22	0.017 5	0.000 6	0.001 17	0.002 10	115.0	5.6	112.0	3.7	23.7	42.4
NP0424	70.9	852.63	0.08	0.123 80	0.008 08	0.017 8	0.000 7	0.004 04	0.001 51	118.5	7.3	113.6	4.3	81.4	30.4
NP0425	116.7	135.35	0.86	0.724 11	0.038 42	0.091 3	0.003 1	0.025 36	0.001 58	553.1	22.6	563.0	18.1	506.2	31.1
NP0426	223.5	495.14	0.45	1.283 93	0.039 13	0.138 0	0.004 0	0.039 92	0.001 52	838.6	17.4	833.5	22.5	791.1	29.5
NP0427	42.5	1 101.99	0.04	0.129 08	0.010 95	0.021 0	0.000 9	0.006 72	0.004 84	123.3	9.9	134.2	5.5	135.4	97.2
NP0428	36.1	2 083.96	0.02	0.120 43	0.009 83	0.017 5	0.000 7	0.028 13	0.013 35	115.5	8.9	111.8	4.2	560.8	262.4
NP0429	72.7	4 401.50	0.02	0.069 97	0.021 32	0.011 1	0.000 8	0.040 31	0.032 20	68.7	20.2	71.3	4.9	798.8	625.7
NP0430	29.2	2 307.17	0.01	0.111 04	0.018 23	0.017 4	0.000 8	-0.055 40	0.042 97	106.9	16.7	111.1	5.3	*****	919.5

表 2 南帕米尔阿里秋穹隆花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试数据统计表

Tab. 2 LA-MC -ICPMS in-situ analysis of zircon Lu-Hf isotopic compositions of the granitic rocks from the Alichur dome

样点	<i>t</i> (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	<i>ε</i> Hf(<i>t</i>)	±1σ	TM1(Ga)	±1σ	TM2(Ga)	±1σ
Hf-NP0301	19.7	0.013 835	0.000 476	0.282 585	0.000 026	−6.2	0.9	0.933	0.037	1.493	0.037
Hf-NP0303	18.9	0.013 484	0.000 423	0.282 658	0.000 044	−3.6	1.5	0.830	0.061	1.329	0.061
Hf-NP0305	18.8	0.018 061	0.000 593	0.282 655	0.000 031	−3.7	1.1	0.837	0.044	1.335	0.044
Hf-NP0306	19.3	0.014 554	0.000 500	0.282 677	0.000 029	−2.9	1.0	0.805	0.040	1.286	0.040
Hf-NP0307	19.6	0.022 387	0.000 757	0.282 745	0.000 033	−0.5	1.2	0.714	0.047	1.132	0.047
Hf-NP0308	19.3	0.016 693	0.000 539	0.282 641	0.000 031	−4.2	1.1	0.855	0.043	1.365	0.043
Hf-NP0309	19.4	0.021 724	0.000 784	0.282 696	0.000 028	−2.3	1.0	0.785	0.039	1.244	0.039
Hf-NP0311	18.2	0.026 357	0.000 993	0.282 687	0.000 011	−2.6	0.4	0.801	0.016	1.264	0.016
Hf-NP0312	19.5	0.028 432	0.001 018	0.282 701	0.000 029	−2.1	1.0	0.782	0.042	1.232	0.042
Hf-NP0314	20.4	0.019 871	0.000 711	0.282 657	0.000 014	−3.6	0.5	0.837	0.019	1.330	0.019
Hf-NP0315	19.2	0.009 878	0.000 339	0.282 643	0.000 028	−4.1	1.0	0.848	0.038	1.361	0.038
Hf-NP0316	20.0	0.005 533	0.000 200	0.282 630	0.000 024	−4.6	0.8	0.863	0.033	1.391	0.033
Hf-NP0317	19.8	0.020 546	0.000 749	0.282 664	0.000 030	−3.4	1.0	0.828	0.042	1.315	0.042
Hf-NP0319	19.2	0.011 475	0.000 420	0.282 679	0.000 026	−2.9	0.9	0.801	0.036	1.282	0.036
Hf-NP0321	19.2	0.010 760	0.000 401	0.282 630	0.000 028	−4.6	1.0	0.867	0.039	1.390	0.039
Hf-NP0322	19.8	0.009 521	0.000 336	0.282 591	0.000 026	−6.0	0.9	0.920	0.036	1.478	0.036
Hf-NP0323	19.3	0.030 648	0.001 102	0.282 693	0.000 026	−2.4	0.9	0.795	0.036	1.251	0.036
Hf-NP0324	20.0	0.016 524	0.000 586	0.282 647	0.000 031	−4.0	1.1	0.848	0.043	1.352	0.043
Hf-NP0325	19.2	0.011 486	0.000 436	0.282 671	0.000 024	−3.2	0.8	0.811	0.033	1.299	0.033
Hf-NP0326	19.5	0.025 873	0.000 898	0.282 644	0.000 029	−4.1	1.0	0.860	0.041	1.360	0.041
Hf-NP0327	19.9	0.032 599	0.001 179	0.282 693	0.000 026	−2.4	0.9	0.796	0.036	1.249	0.036
Hf-NP0328	19.3	0.014 380	0.000 508	0.282 753	0.000 026	−0.2	0.9	0.698	0.036	1.114	0.036
Hf-NP0330	20.7	0.010 649	0.000 385	0.282 629	0.000 025	−4.6	0.9	0.869	0.034	1.393	0.034
Hf-NP0402	110.7	0.009 428	0.000 422	0.281 634	0.000 040	−37.8	1.4	2.234	0.054	3.541	0.054
Hf-NP0403	321.8	0.033 497	0.001 303	0.282 266	0.000 028	−11.1	1.0	1.404	0.040	2.030	0.040
Hf-NP0405	600.8	0.019 334	0.000 761	0.282 540	0.000 024	4.7	0.8	1.002	0.033	1.243	0.033
Hf-NP0406	132.2	0.012 261	0.000 446	0.282 382	0.000 027	−10.9	0.9	1.212	0.037	1.876	0.037
Hf-NP0407	111.6	0.016 362	0.000 665	0.282 352	0.000 025	−12.4	0.9	1.261	0.035	1.956	0.035
Hf-NP0408	110.9	0.010 549	0.000 445	0.282 450	0.000 022	−9.0	0.8	1.118	0.030	1.738	0.030
Hf-NP0409	109.1	0.011 997	0.000 513	0.281 952	0.000 043	−26.7	1.5	1.806	0.058	2.845	0.058
Hf-NP0410	112.0	0.052 777	0.002 021	0.282 493	0.000 023	−7.6	0.8	1.105	0.033	1.649	0.033
Hf-NP0411	112.8	0.012 904	0.000 532	0.282 024	0.000 028	−24.0	1.0	1.709	0.039	2.685	0.039
Hf-NP0413	541.7	0.008 217	0.000 373	0.282 127	0.000 025	−11.0	0.9	1.561	0.035	2.191	0.035
Hf-NP0414	112.6	0.012 957	0.000 487	0.282 341	0.000 023	−12.8	0.8	1.271	0.032	1.981	0.032
Hf-NP0415	113.2	0.018 810	0.000 726	0.282 372	0.000 024	−11.7	0.9	1.235	0.034	1.912	0.034
Hf-NP0416	112.4	0.036 871	0.001 403	0.282 448	0.000 024	−9.1	0.9	1.150	0.035	1.746	0.035
Hf-NP0417	111.6	0.024 663	0.000 937	0.282 196	0.000 042	−18.0	1.5	1.488	0.059	2.305	0.059
Hf-NP0418	111.3	0.029 875	0.001 134	0.282 364	0.000 024	−12.1	0.8	1.260	0.033	1.932	0.033
Hf-NP0419	111.2	0.034 272	0.001 311	0.282 408	0.000 021	−10.5	0.8	1.204	0.030	1.836	0.030
Hf-NP0420	831.7	0.020 417	0.000 968	0.281 814	0.000 028	−16.1	1.0	2.018	0.038	2.721	0.038
Hf-NP0421	111.6	0.026 561	0.001 049	0.282 380	0.000 023	−11.5	0.8	1.235	0.032	1.897	0.032
Hf-NP0422	112.0	0.027 846	0.001 096	0.282 494	0.000 025	−7.5	0.9	1.076	0.035	1.643	0.035
Hf-NP0424	113.6	0.020 349	0.000 780	0.282 405	0.000 024	−10.5	0.8	1.191	0.033	1.838	0.033
Hf-NP0425	553.1	0.018 401	0.000 755	0.282 477	0.000 024	1.5	0.8	1.090	0.033	1.414	0.033
Hf-NP0426	833.5	0.013 424	0.000 569	0.282 360	0.000 021	3.5	0.7	1.247	0.029	1.500	0.029
Hf-NP0427	134.2	0.019 654	0.000 760	0.282 362	0.000 024	−11.6	0.8	1.251	0.034	1.922	0.034
Hf-NP0428	111.8	0.019 300	0.000 752	0.282 281	0.000 034	−15.0	1.2	1.363	0.047	2.116	0.047
Hf-NP0429	71.3	0.038 764	0.001 422	0.282 434	0.000 029	−10.5	1.0	1.171	0.041	1.801	0.041
Hf-NP0430	111.1	0.025 280	0.000 969	0.282 389	0.000 031	−11.2	1.1	1.220	0.044	1.876	0.044

注：本次实验采用91500作标样，所测样品锆石的Hf同位素成分用标样进行校正；表中锆石Hf同位素成分的计算参数为： $\lambda(^{176}\text{Lu})=1.867\times10^{-11}\text{a}^{-1}$ ，球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.033\ 2$ ， $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\ 772$ (Blichert-Toft et al., 1997)；亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.038\ 4$ ， $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.283\ 25$ (Griffin et al., 2000)。

样品 NP04 中 17 个点位于锆石震荡环带内的有效测试点和 6 个位于核部继承锆石的测试点总共 23 个点。样品 NP04 边缘锆石 17 个测试点 Hf 同位素初始比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 634~0.282 494, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 422~0.002 021。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -37.8~-7.5, 平均值为 -14.0。 Hf 同位素 T_{DM2} 为 1 643~3 541 Ma。

样品 NP04 核部锆石 6 个测试点 Hf 同位素初始比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 814~0.282 477, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.000 373~0.002 021。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -16.1~4.7, 范围较大。 Hf 同位素 T_{DM2} 值为 1 243~2 721 Ma。

4 讨论

4.1 阿里秋穹隆两期花岗岩侵位年龄

Schwab 等(2004)曾对帕米尔和西藏地区的岩浆作用进行过全面的年代学和物质来源研究,白垩纪中、晚期岩浆作用反映的是沿科西斯坦-拉达克岛弧以北什约克(Shyok)缝合带卡拉库姆板块增生和平缓板块俯冲在亚洲板块导致的岩浆活动。实际上,蒂里奇米尔(Tirich Mir)-喀喇昆仑-冈底斯(拉萨地体部分)一带白垩纪花岗岩锆石核也分别反映出~1624 Ma、902 Ma、417 Ma、355 Ma、196 Ma、158 Ma 等年龄;锆石边部和多边形、自形锆石年龄值为 126~102 Ma,加权平均年龄为 $(118.6 \pm 3.6)\text{Ma}$ 。

结合 Alichur 穹隆隆升过程, NP03 样品 19.3 Ma 年龄指示为帕米尔从始新世至渐新世,地壳缩短,并发生的减压熔融过程;而 NP04 得出的 $(111.7 \pm 0.8)\text{Ma}$ 年龄,则是早白垩世地壳熔融作用的结果。

4.2 阿里秋穹隆两期花岗岩的物源特征

中新世浅色花岗岩样品 NP03 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-6.2~-0.2), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较年轻的模式年龄暗示该期花岗岩的源区可能为核部片麻岩的重熔(图 4)。而早期的白垩世侵位的花岗岩样品 NP04 具有更低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-37.8~-7.5),指示早白垩世花岗岩来源于古老地壳物质的熔融(图 4)。

4.3 对构造背景的指示意义

吴福元等(2015)根据目前已发表的年龄数据,勾画了喜马拉雅新生代淡色花岗岩的年代格架,大致划分为始喜马拉雅阶段(Eo-Himalayan: 44~26 Ma)、新喜马拉雅阶段(Neo-Himalayan: 26~13 Ma)和后喜马拉雅阶段(Post-Himalayan: 13~7 Ma)。以上 3 个时期的花岗岩最显著的区别在于受造山带内不同构造的

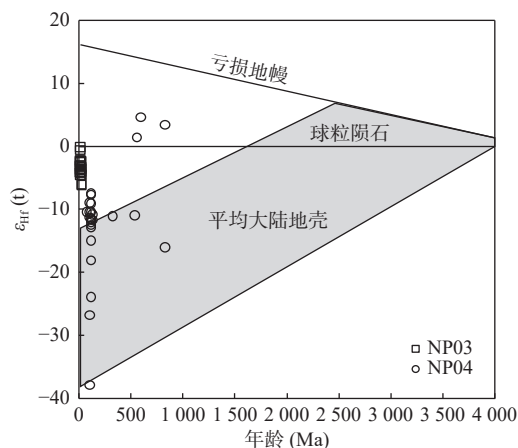


图4 阿里秋穹隆花岗岩样品锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}-t$ 图解

Fig. 4 $\varepsilon_{\text{Hf}}-t$ diagram of granitic rocks from the Alichur dome

控制:始喜马拉雅阶段的花岗岩多分布于特提斯喜马拉雅带(THS)中部的北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)核部,新喜马拉雅阶段的淡色花岗岩主要沿藏南拆离系(STDS)分布,而后喜马拉雅阶段的花岗岩受控于南北向裂谷(NSTR)。阿里秋弱变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(19.3 \pm 0.3)\text{Ma}$ (MSWD=0.47),且岩体沿阿里秋北部韧性剪切带分布,时代与上述划分方案中的新喜马拉雅阶段相当,暗示帕米尔在这一时期处于与藏南拆离系相似的构造地质特征。就中帕米尔和南帕米尔地区而言,~20 Ma 是由进变质作用向退变质作用演化的转折点(Smit et al., 2014)。此外,包括帕米尔和北喜马拉雅同时变质作用的观点也有助于解释南帕米尔与藏南拆离系在~20 Ma 或 26~13 Ma 之间经历相似的构造、变质事件。喜马拉雅淡色花岗岩第一阶段对应印度-亚洲汇聚而导致的大陆碰撞造山作用,后两个阶段同加厚的喜马拉雅-青藏高原碰撞造山带拆沉作用有关,对应青藏高原的全面隆升(吴福元等, 2015)。同时,需要注意二者之间的显著差别。自印度板块与欧亚大陆碰撞以来,帕米尔所处的构造结与喜马拉雅地区为代表的碰撞俯冲带主体在地貌、地壳变形和剥露层位之间差别显著。西藏为高海拔平原而帕米尔山区为高起伏;垂直俯冲碰撞带方向,青藏高原缩短量南北向缩短量为 19%~28%,而帕米尔缩短量达 55%~64%(Schmidt et al., 2011);二者出露不同层位的地壳,西藏出露中生代—新生代地壳沉积岩,而帕米尔则为遭受新生代变质作用的中下地壳结晶岩(Yin et al., 2000; Schmidt et al., 2011)。

5 结论

(1)南帕米尔阿里秋穹隆主体花岗岩由早白垩世侵位,并在始新世至渐新世期间受 SN 向伸展构造控制进一步抬升至地表,并有地壳熔融作用产生的花岗岩侵位到剪切带内。

(2)结合印度-欧亚大陆碰撞相关岩浆作用分析,阿里秋弱变形花岗岩时带上与 13~26 Ma 之间的喜马拉雅阶段相当,对应碰撞造山带的伸展阶段。

致谢:塔吉克斯坦地质总局和霍罗格大学同事在野外工作期间的协助,感谢长安大学王盟教授和中国地质调查局西安地质调查中心陈博副研究员在数据处理方面提供的帮助。

参考文献(References):

- 范堡程,孟广路,刘明义,等.塔吉克斯坦成矿单元划分及其特征[J].地质科技情报,2017,36(2):168-175.
- FAN Baocheng, MENG Guanglu, LIU Mingyi, et al. Division and Features of the Metallogenic Units in Tajikistan[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(2): 168-175.
- 范堡程,张晶,孟广路,等.帕米尔构造结锂矿资源潜力评价——基于 1:100 万地球化学调查[J].西北地质,2022,55(1):156-166.
- FAN Baocheng, ZHANG Jing, MENG Guanglu, et al. An Assessment of Lithium Resource Potentiality in Pamir Syntax: Based on 1:1 million Scale of Geochemical Survey[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 156-166.
- 范堡程,张晶,孟广路,等.地球化学块体理论在塔吉克斯坦金资源潜力预测中的应用[J].西北地质,2020,53(1):138-145.
- FAN Baocheng, ZHANG Jing, MENG Guanglu, et al. Application of Geochemical Blocks Theory in the Prediction of Gold Resource Potential in Tajikistan[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 138-145.
- 洪俊,计文化,张海迪,等.帕米尔地区穆尔杂布辉长岩-闪长岩的成因:锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及岩石地球化学证据[J].中国地质,2017,44(4):722-736.
- HONG Jun, JI Wenhua, ZHANG Haidi, et al. Petrogenesis of Murgab gabbro-diorite from Pamir: Evidence from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and lithogeochemistry[J]. Geology in China, 2017, 44(4): 722-736.
- 侯可军,李延河,邹天人,等.LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J].岩石学报,2007,23(10):2595-2604.
- HOU Kejun, LI Yanhe, ZOU Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604.
- 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.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(12): 2400-2418.
- 李艳广,靳梦琪,汪双双,等.LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J].西北地质,2023,56(4):274-282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 274-282.
- 吕鹏瑞,姚文光,张辉善,等.巴基斯坦及中国邻区构造单元划分及其演化[J].西北地质,2017,50(3):126-139.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Tectonic Unit Division and Geological Evolution of Pakistan and Its Adjacent Regions[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(3): 126-139.
- 吴福元,刘志超,刘小驰,等.喜马拉雅淡色花岗岩[J].岩石学报,2015,31(1):1-36.
- WU Fuyuan, LIU Zhichao, LIU Xiaochi, et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 1-36.
- 张海迪,吕鹏瑞,罗彦军,等.塔吉克斯坦帕米尔地区构造单元划分及其特征[J].地质与勘探,2019,55(01):135-144.
- ZHANG Haidi, LÜ Pengrui, LUO Yanjun, et al. Tectonic Unit Division of the Pamir Area in Tajikistan and its Geological Characteristics[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(01): 135-144.
- Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(1-2): 243-258.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E A, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64, 133-147.
- Hubbard M S, Grew E S, Hodges K V, et al. Neogene cooling and exhumation of upper-amphibolite facies “whiteschists” in the southwest Pamir Mountains, Tajikistan[J]. Tectonophysics, 1999, 305: 325-337.
- Meng E, Liu F L, Liu P H, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochem-

- istry[J]. *Precambrian Research*, 2014, 247: 92–109.
- Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003.
- Schmidt J, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. Cenozoic deep crust in the Pamir [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312, 411–421. doi: [10.1016/j.epsl.2011.10.034](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.034).
- Schwab M, et al. (2004), Assembly of the Pamirs: Age and origin of magmatic belts from the southern Tien Shan to the southern Pamirs and their relation to Tibet. [J] *Tectonics*, 23, TC4002. doi:[10.1029/2003TC001583](https://doi.org/10.1029/2003TC001583).
- Sippl C, Schurr B, Tynpel J, et al. Geometry of the Pamir–Hindu Kush intermediate-depth earthquakes zone from local seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, 118, 1438–1457.
- Smit M A, Hacker B R, Ratschbacher L. Lu–Hf geochronology constrains slow burial of crust in active orogens: The Pamir gneiss domes[A]. *European Mineral Conference*, 2012, 1, EMC2012-706.
- Smit M A, Ratschbacher L, Kooijman E, et al. Early evolution of the Pamir deep crust from Lu–Hf and U–Pb geochronology and garnet thermometry[J]. *Geology*, 2014, 42(12): 1047–1050.
- Stübner K, Ratschbacher L, Rutte D, et al. The giant Shakhdamigmatitic gneiss dome, Pamir, India–Asia collision zone: 1. Geometry and kinematics[J]. *Tectonics*, 2013a, 32: 948–979.
- Stübner K, Ratschbacher L, Weise C, et al. The giant Shakhdamigmatitic gneiss dome, Pamir, India–Asia collision zone: 2 Timing of dome formation[J]. *Tectonics*, 2013b, 32: 1401–1431.
- Tapponnier P, Mattauer M, Proust F, et al. Mesozoic ophiolites, sutures, and large-scale tectonic movements in Afghanistan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 52: 355–371.
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibet orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28, 211–280.
- Van Achtebergh E, Ryan C G, Jackson S E, et al. Data reduction software for LA-ICP-MS[A]. In: Sylvester P J (Ed.). *Laser-Ablation-ICP MS in the Earth Sciences: Principles and Applications*[M]. Mineralogical Society of Canada Short Course Series 29, 2001: 239–243.