

文章编号:1672-6561(2017)03-0344-13

西昆仑慕士塔格岩体锆石 U-Pb 和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义

柳政甫¹, 李秋根¹, 王宗起², 汤好书³, 陈衍景¹, 朱杰¹, 肖兵¹

(1. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要:西昆仑造山带作为古特提斯洋消减、洋盆闭合的重要构造域,对古特提斯洋的演化研究有着重要意义,并且其与青藏高原、塔里木盆地的构造演化和气候变化有着密切的联系。以西昆仑西北段慕士塔格岩体为研究对象,对其中的暗色包体进行锆石 U-Pb 同位素分析和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析,探讨岩体的演化历史。锆石 U-Pb 同位素分析给出 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $(218.8 \pm 1.9)\text{Ma}$,为晚三叠世,解释为岩体的结晶年龄,结合区域资料可推断岩体形成于古特提斯洋闭合后的后碰撞阶段;黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析得到坪年龄为 $(6.018 \pm 0.072)\text{Ma}$ 和 $(5.675 \pm 0.059)\text{Ma}$,解释为岩体的隆升冷却年龄,表明西昆仑地区中新世晚期经历了冷却隆升事件,该隆升事件使西昆仑地区中新世晚期以来地形地貌及区域构造强烈改变,造成了区域内的干旱气候,并加速了在塔里木盆地形成塔克拉玛干沙漠。

关键词:地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄; 晚三叠世; 晚中新世; 隆升; 西昆仑造山带
中图分类号:P597 **文献标志码:**A

Zircon U-Pb and Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar Ages of Muztag Pluton in West Kunlun and Their Geological Significance

LIU Zheng-fu¹, LI Qiu-gen¹, WANG Zong-qi², TANG Hao-shu³,
CHEN Yan-jing¹, ZHU Jie¹, XIAO Bing¹

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract: As a key tectonic regime of the subduction and closure of Paleo-Tethys Ocean, the West Kunlun orogenic belt has great significance in the study on the tectonic-thermal history of Paleo-Tethys Ocean. Moreover, it has close connection with the tectonic and climatic evolution of Tibetan Plateau and Tarim Basin. In order to reveal the evolution history of Muztag pluton in the northwest section of West Kunlun orogenic belt, several isotopic characteristics of zircon U-Pb ages and biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of melanocratic enclaves hosted in it were discussed. The zircon U-Pb isotopic analysis returns a weighted average U-Pb age of $(218.8 \pm 1.9)\text{Ma}$, which is interpreted as the crystallization age of the pluton. Combined with regional geological data, it is

收稿日期:2017-02-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2014CB440801);国家自然科学基金项目(41672086);
中国地质调查局地质调查项目(1212011140056,12120113041000)

作者简介:柳政甫(1994-),男,陕西商洛人,理学硕士研究生,E-mail:1224704239@qq.com.

通讯作者:李秋根(1973-),男,江西吉安人,副教授,理学博士,E-mail:qgli@pku.edu.cn.

inferred that Muztag pluton emplaces in an extensional regime related to the post-collisional setting following the closure of Paleo-Tethys Ocean. Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic analysis yields the plateau ages of (6.018±0.072)Ma and (5.675±0.059)Ma, respectively, which are considered as uplifting and cooling ages of the pluton, indicating that West Kunlun area undergoes a cooling-uplift event in Late Miocene. The event vehemently changes the tectonics, topography and geomorphology of West Kunlun and its adjacent area, gives rise to a regional arid climate, and impels the formation of Taklimakan Desert in Tarim Basin.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb age; ⁴⁰Ar-³⁹Ar age; Late Triassic; Late Miocene; uplift; West Kunlun orogenic belt

0 引言

西昆仑造山带位于青藏高原西北边缘,是古亚洲构造域和特提斯构造域的结合部位,代表了早古生代到早中生代原特提斯洋和古特提斯洋的形成、俯冲、削减及碰撞造山过程^[1-4],也是作为研究青藏高原新生代强烈变形、隆升历史和环境效应等重大问题的关键地区之一^[5-7]。因此,西昆仑造山带也成为国际地质学界研究的热点地区。然而,青藏高原西北边缘的西昆仑山脉地区由于地处偏远,气候严寒干旱,交通条件恶劣,研究资料相对匮乏,一直是青藏高原研究程度较低的区域。此外,研究区构造演化历史复杂,诸多问题仍然缺乏统一的认识,如古特提斯洋最终缝合的时限和青藏高原远程效应所导致的强烈隆升开始年限还存在争议。基于此,本文选取位于西昆仑造山带西北部的慕士塔格岩体作为研究对象,对其中发育的暗色包体进行锆石 U-Pb 年代学与黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究,确定慕士塔格岩体的形成时代与冷却年龄,旨在为限定古特提斯洋碰撞闭合的具体年限及西昆仑地区强烈隆升的开始年限提供更多的研究资料。

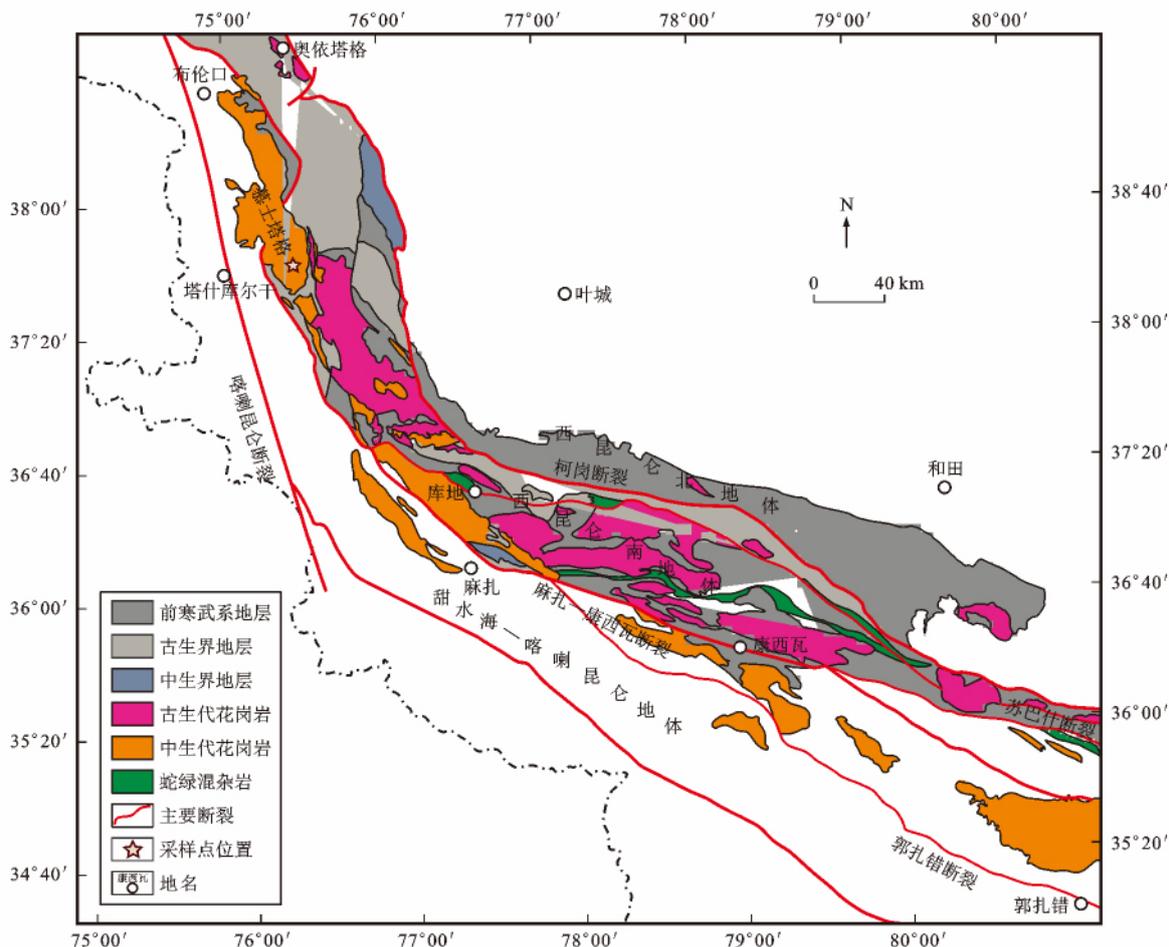
1 区域地质背景

西昆仑造山带是青藏高原的重要组成部分,位于塔里木板块和冈底斯板块的衔接部位,西临帕米尔高原,东邻东昆仑—秦岭造山带,北接塔里木盆地,南连青藏高原,隶属中央造山带的一部分^[8-12]。构造线总体沿 NNW—NWW 向,呈现西北部收敛、东南部分散的喇叭状(图 1)。该地区从北到南发育了 4 条与昆仑山走向近平行的主要断裂,依次为昆仑山北(柯岗)断裂、昆仑山中(苏巴什)断裂、昆仑山南(麻扎—康西瓦)断裂和喀喇昆仑断裂。以这 4 条断裂为界,可将西昆仑造山带由北至南分为西昆仑北地体、西昆仑南地体和甜水海—喀喇昆仑地体 3

个构造单元。

西昆仑造山带岩浆活动强烈,火成岩记录也非常丰富,以侵入岩为主,被认为是特提斯洋不同演化阶段的产物。这些岩浆岩呈 NW—SE 向分布于昆仑山南、北断裂之间(图 1),构成两条与构造线近一致的巨型中酸性深成岩带,通常分别称之为“南岩带”和“北岩带”。“北岩带”以早古生代岩浆作用为主,主要分布于昆仑山北断裂南侧,代表岩体有大同岩体;“南岩带”以早中生代岩浆作用为主,主要位于昆仑山南断裂北侧,代表岩体有慕士塔格岩体。分布于“南岩带”的侵入岩体还有阿卡阿孜岩体、麻扎岩体、大红柳滩岩体、泉水沟北岩体等,为 I 型花岗岩,与古特提斯洋的闭合及碰撞造山有着密切的联系^[13-15]。新生代岩浆活动较弱,出露的主要侵入岩体有苏巴什西岩体(年龄为 62.4 Ma)^[16]、苦子干岩体(11~54 Ma)^[16-18]、卡日巴生岩体(9.8~17.2 Ma)^[16,18]和赞坎岩体(10.59 Ma)^[16]等。区域内出露的火山岩有通天桥玄武岩(年龄为 60 Ma)^[19]、泉水沟玄武岩(3.30~5.84 Ma)^[19-20]、黑龙山黑色熔岩(0.67 Ma)^[21]和阿塔木帕下钾玄岩(0.56 Ma)^[22]等。这些岩浆活动主要集中在始新世—中新世以及中更新世这两个时期。

西昆仑局部地区的隆升活动早在二叠世时期已经开始^[23],但剧烈隆升活动自晚中生代至新生代才开始,隆升在新生代则占据着主导地位^[23-26]。受新生代以来剧烈隆升剥蚀作用的影响,西昆仑构造区内的新生界地层发育较少,主要分布于特克里克断裂以北区域,沿西昆仑山前凹陷分布,总厚度大于 10 km,总体上南部地层较北部地层厚。古近系地层统称为喀什群,包含阿尔塔什组、齐姆根组、卡拉塔尔组、乌拉根组和巴什布拉克组,岩性稳定,厚度数千米,主要岩性为生物灰岩、砾岩、砂岩、泥岩等,含有丰富的双壳类和孔虫等生物化石。新近系地层包括中新统由克孜洛依组、安居安组与帕卡布拉



图件引自文献[1],有所修改

图1 西昆仑造山带地质简图

Fig. 1 Simplified Geological Map of West Kunlun Orogenic Belt

克组构成的乌恰群以及上新统阿图什组,主要岩性为灰绿色、褐色的砾岩,砂岩,粉砂岩,含有植物孢粉化石。更新统包含西域组、乌苏群和新疆群。西域组主要岩性为砾岩、砂砾岩夹砂岩、泥岩,其磨拉石沉积特征反映了西昆仑地区的快速隆升;乌苏群主要岩性为砾岩,属冲积、洪积成因;新疆群为典型的山前沉积,由山前至平原矿物粒度逐渐变细。全新统地层为风成砂、冲洪积层和湖积层,特征沉积为灰色砾石层。

2 样品采集与岩石学特征

慕士塔格岩体为西昆仑地区出露面积最大的岩体,呈不规则长条状分布于麻扎—康西瓦构造带西北段两侧,岩体长轴方向与构造线一致,长轴约为170 km,短轴为1~35 km,出露面积达3 300 km²。岩体东南部分侵入到奥陶系—志留系地层中,西北部分侵入到下元古界布伦阔勒群中,局部以断层与古生代地层接触。该岩体主要岩性为黑云母花岗闪

长岩,局部地区发育片状、片麻状构造。岩体中发育有大量暗色包体与同深成岩墙[图2(a)、(b)],两者岩性相同,都为闪长岩,因含有较多的铁镁质矿物,其颜色较寄主花岗岩要深,而且矿物粒度也更细。暗色包体多呈次浑圆状或不规则状,半径从几厘米到数十米不等。包体与寄主花岗岩接触边界呈截然状或弥散状,具岩浆结构[图2(a)]。

本次研究样品均采集于西昆仑慕士塔格岩体中的暗色包体。包体的矿物粒度要明显小于寄主花岗岩。显微镜下矿物呈现微弱的定向、中—粗粒似斑状结构[图2(c)],主要矿物组成有石英(体积分数约为5%)、斜长石(30%~35%)、碱性长石(20%~25%)、黑云母(15%~20%)、角闪石(30%~40%),副矿物有榍石、锆石、磷灰石(多呈针状)等,其铁镁质矿物体积分数要明显高于寄主花岗岩。几乎所有矿物都存在两个世代:第一世代矿物粒径较小(0.02~0.30 mm);第二世代矿物(粒径为0.3~2.0 mm)常常包裹第一世代矿物,形成嵌晶结构[图2(c)、

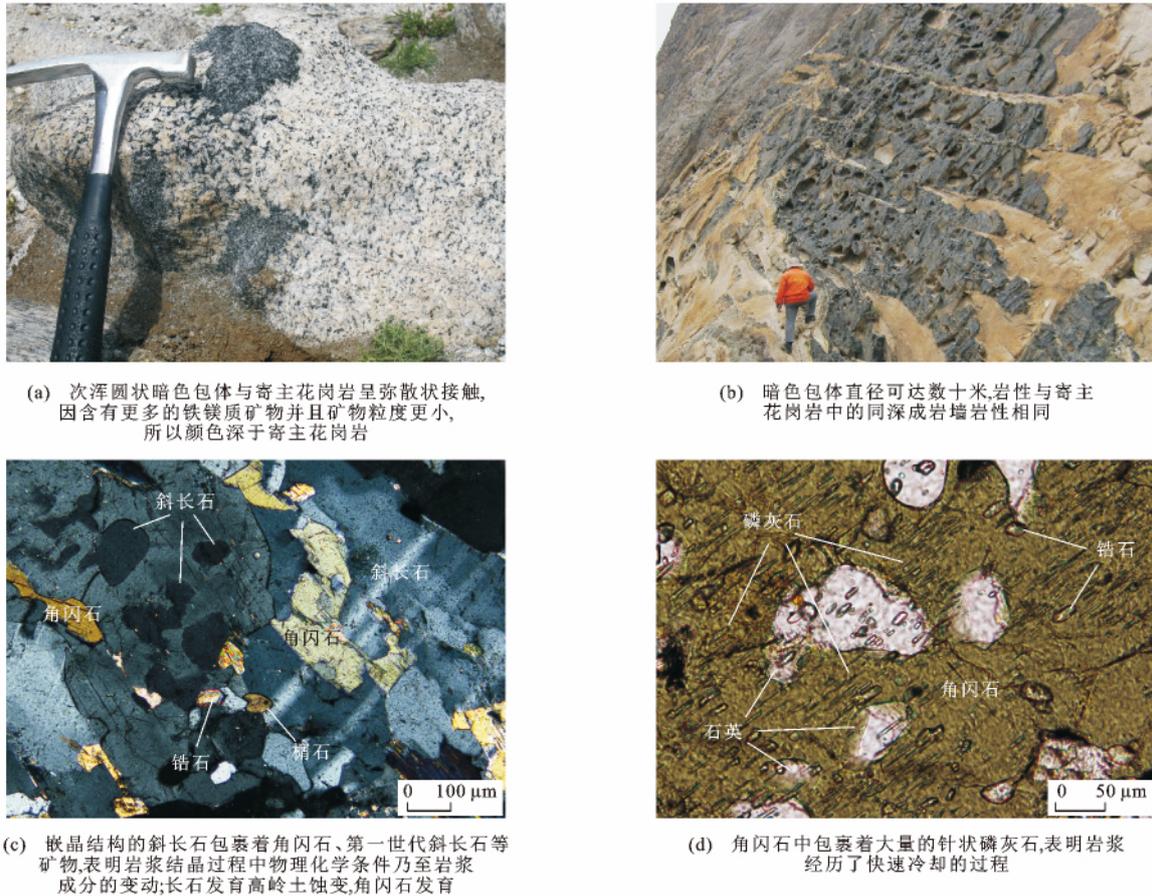


图 2 暗色包体的野外照片及显微照片

Fig. 2 Field and Microscopical Photographs of Melanocratic Enclaves

(d)],这是由于结晶环境遭到扰动。角闪石中可见大量针状磷灰石[图 2(d)],是岩浆快速冷却事件的产物,暗示可能存在岩浆注入现象。部分矿物发育微弱蚀变,如长石发育高岭土蚀变,黑云母与角闪石发育绿泥石化蚀变[图 2(c)]。

3 分析方法及结果

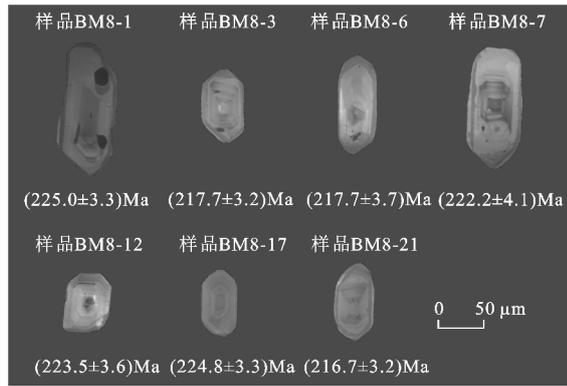
本次研究共选取 3 件样品进行分析,其中对样品 12TS7-1、BM2 进行了黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析,对样品 BM8 进行了锆石 U-Pb 同位素分析。

3.1 锆石 U-Pb 同位素分析

将岩石样品破碎后使用重液与磁选法初步分选出锆石晶体,并在双目镜下人工挑纯;其后由北京凯德正科技有限公司将锆石固定在环氧树脂上,并抛光打磨至露出锆石核心,完成制靶过程;锆石反射光、透射光与阴极发光(CL)图像在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,并依据这些图像确定分析点位置;锆石 U-Pb 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,ICP-MS 仪为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统

为 New Wave Research 213 nm 激光烧蚀系统,校正外标为 GEMOC/GJ-1(年龄为 608 Ma),标准参考锆石为 Mud Tank(年龄为 735 Ma),采用 GLITTER 4.0 软件离线处理原始输出 ASCII 数据,采用 Isoplot 3.00 软件^[27]完成锆石 U-Pb 年龄谐和曲线的绘制及年龄加权平均值的计算。

样品 BM8 的锆石均为透明、自形到半自形短柱状或近等轴状,长轴为 60~300 μm,短轴与长轴比为 1:1~1:3。大多数锆石晶体洁净透明,在阴极发光图像中呈现清晰的震荡环带结构(图 3)。w(Th)/w(U) 值大于 0.4,显示锆石为岩浆成因^[28-29]。锆石阴极发光图像见图 3,锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 1,锆石 U-Pb 年龄谐和曲线及年龄分布见图 4。本次研究有 22 个分析点,其中分析点 BM8-9 的年龄明显小于其余分析点,且离谐和曲线较远,可能是 Pb 丢失造成的,故应舍弃。剩余 21 个分析点年龄谐和度较高,并且集中分布在谐和曲线上或附近, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 (218.8 ± 1.9) Ma,平均标准权重偏差(MSWD)为 1.5,解释为结晶年龄。



锆石来自样品 BM8

图 3 代表性锆石阴极发光图像及年龄

Fig. 3 CL Images and Ages of Representative Zircons

3.2 黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素分析

首先将样品通过破碎磁选、重液等步骤初步分选出黑云母颗粒，并在双目镜下挑纯；然后将黑云母

用稀硝酸浸泡、去离子水冲洗之后，用纯铝箔纸将样品封装，在中国原子能科学研究院 49-2 反应堆 B4 孔道进行中子照射 24 h，快中子通量为 2.2464×10^{18} ，用于中子通量监测的样品为 ZBH-25(年龄为 132.7 Ma)、Bern 4M(18.6 Ma)、FCs(28.2 Ma)；同时对纯物质 CaF_2 和 K_2SO_4 进行同步照射，得出校正因子 $(N(^{36}\text{Ar})/N(^{37}\text{Ar}))_{\text{CaF}_2}$ 、 $(N(^{39}\text{Ar})/N(^{37}\text{Ar}))_{\text{CaF}_2}$ 、 $(N(^{40}\text{Ar})/N(^{39}\text{Ar}))_{\text{K}_2\text{SO}_4}$ 值分别为 0.000 271、0.000 652、0.007 030；样品经 72 h 以上的密封去气之后，采用北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室常规⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年系统进行同位素分析，以钨熔样炉对样品进行阶步升温熔样，对样品 BM2 与 12TS7-1 分别分 6 步与 10 步加热释气，温阶范围为 900 °C~1 400 °C，每个加热点在恒温状态下保持 20 min；定年系统分别用活性炭冷阱及钆钒铁吸气剂炉对气体进行纯化，使用 RGA10

表 1 样品 BM8 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Zircon U-Pb Ages of Sample BM8

分析点	$w(^{206}\text{Pb})/10^{-6}$	$w(^{207}\text{Pb})/10^{-6}$	$w(^{208}\text{Pb})/10^{-6}$	$w(^{232}\text{Th})/10^{-6}$	$w(^{238}\text{U})/10^{-6}$	$N(^{207}\text{Pb})/ N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{206}\text{Pb})/ n(^{238}\text{U})$	$n(^{207}\text{Pb})/ n(^{235}\text{U})$	$n(^{208}\text{Pb})/ n(^{232}\text{Th})$	$N(^{207}\text{Pb})/ N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/ n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/ n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{208}\text{Pb})/ n(^{232}\text{Th})$ 年龄/Ma
BM8-1	2 012	218	316	31 272	74 484	0.053 2±0.001 4	0.035 5±0.000 5	0.260±0.007	0.009 9±0.000 7	336.0±59.6	225.0±3.3	235.0±5.5	199.3±13.7
BM8-2	4 370	450	781	83 671	166 773	0.050 5±0.001 0	0.034 5±0.000 5	0.240±0.005	0.009 2±0.000 6	218.4±44.0	218.4±3.1	218.4±3.7	184.7±12.9
BM8-3	2 318	260	387	39 337	88 753	0.055 1±0.001 5	0.034 3±0.000 5	0.261±0.007	0.009 7±0.000 7	416.6±57.0	217.7±3.2	235.4±5.4	195.7±14.5
BM8-4	856	84	103	9 355	32 708	0.048 5±0.003 1	0.034 4±0.000 7	0.230±0.014	0.011 0±0.001 0	122.2±142.3	218.1±4.1	210.2±11.7	220.5±19.2
BM8-5	1 034	115	127	10 614	40 155	0.054 5±0.002 9	0.033 9±0.000 6	0.254±0.013	0.011 9±0.001 1	391.4±113.0	214.7±4.0	230.2±10.5	239.8±21.5
BM8-6	1 170	132	120	12 384	44 803	0.055 6±0.002 4	0.034 3±0.000 6	0.263±0.011	0.009 7±0.000 9	435.2±93.0	217.7±3.7	237.2±8.8	194.6±18.0
BM8-7	882	100	114	8 083	33 079	0.055 6±0.003 0	0.035 1±0.000 7	0.269±0.014	0.014 2±0.001 4	437.8±114.6	222.2±4.1	241.9±11.2	285.5±27.8
BM8-8	2 582	284	464	46 179	98 281	0.054 0±0.001 2	0.034 5±0.000 5	0.257±0.006	0.010 1±0.001 0	369.5±50.7	218.8±3.1	232.2±4.7	203.0±19.6
BM8-9	1 937	213	209	22 534	86 097	0.053 9±0.001 8	0.029 6±0.000 5	0.220±0.007	0.009 4±0.001 0	364.6±73.5	187.9±3.0	201.5±5.9	188.8±19.8
BM8-10	1 302	136	156	15 200	48 639	0.051 3±0.001 8	0.035 2±0.000 6	0.249±0.009	0.010 4±0.001 2	255.5±78.5	222.9±3.4	225.7±6.9	210.0±23.0
BM8-11	1 238	143	139	13 245	48 040	0.056 5±0.002 0	0.034 4±0.000 6	0.268±0.009	0.010 6±0.000 8	472.0±76.9	218.0±3.5	241.1±7.4	212.1±16.0
BM8-12	1 505	149	183	17 488	56 922	0.048 4±0.001 9	0.035 3±0.000 6	0.236±0.009	0.010 4±0.000 8	120.8±91.0	223.5±3.6	214.8±7.5	208.2±15.9
BM8-13	2 827	307	560	58 364	109 819	0.052 9±0.001 3	0.034 4±0.000 5	0.251±0.006	0.009 3±0.000 7	325.0±52.5	217.8±3.2	227.1±4.7	187.1±13.7
BM8-14	1 078	148	137	16 313	41 964	0.067 0±0.002 4	0.034 3±0.000 6	0.317±0.011	0.008 0±0.000 6	837.3±73.6	217.3±3.6	279.3±8.6	161.3±12.8
BM8-15	1 117	138	169	15 806	43 974	0.060 4±0.002 4	0.033 9±0.000 6	0.282±0.011	0.010 1±0.000 8	617.2±83.6	215.1±3.6	252.6±8.6	202.2±16.2
BM8-16	934	97	105	9 617	35 296	0.050 5±0.002 2	0.035 3±0.000 6	0.246±0.011	0.010 1±0.000 8	218.3±97.6	223.9±3.6	223.4±8.6	203.2±16.9
BM8-17	2 406	258	481	50 105	90 534	0.052 1±0.001 3	0.035 5±0.000 5	0.255±0.006	0.008 7±0.000 7	287.4±56.3	224.8±3.3	230.3±5.1	175.8±14.2
BM8-18	908	98	102	9 434	35 802	0.052 4±0.002 6	0.033 9±0.000 6	0.244±0.012	0.009 8±0.000 9	301.4±108.3	214.7±3.8	222.1±9.6	196.5±17.6
BM8-19	1 103	130	129	12 449	42 163	0.057 2±0.002 2	0.034 9±0.000 6	0.275±0.010	0.009 2±0.000 8	497.7±81.4	221.3±3.6	246.9±8.0	185.5±16.5
BM8-20	1 842	203	388	39 496	71 987	0.053 2±0.001 7	0.034 2±0.000 6	0.250±0.008	0.008 6±0.000 8	335.2±71.7	216.6±3.4	226.9±6.4	172.3±13.3
BM8-21	3 317	342	781	84 611	129 619	0.049 7±0.001 2	0.034 2±0.000 5	0.234±0.006	0.007 9±0.000 7	178.8±55.0	216.7±3.2	213.5±4.5	159.4±14.4
BM8-22	5 769	605	1 341	141 407	233 724	0.050 4±0.001 1	0.033 0±0.000 5	0.229±0.005	0.008 0±0.000 8	213.3±47.8	209.1±3.0	209.4±3.9	161.5±15.0

注：误差类型为 1σ；w(·) 为元素含量；N(·)/N(·) 为同一元素同位素比值；N(·) 为该元素的原子丰度；n(·)/n(·) 为不同元素同位素比值；n(·) 为元素的物质的量。

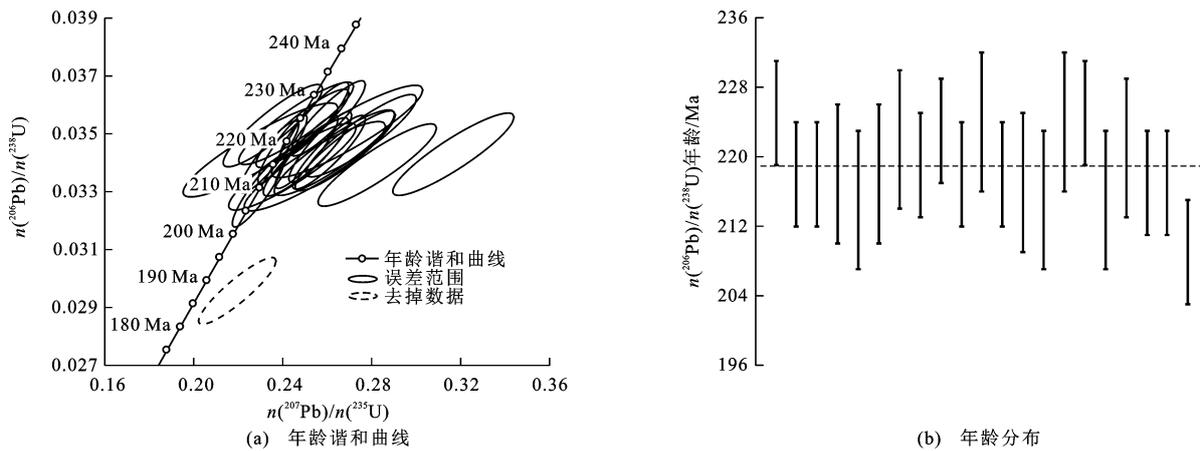


图 4 锆石 U-Pb 年龄谱和曲线及年龄分布

Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia Diagram and Distribution of Ages

型质谱仪记录 5 组 Ar 同位素 (³⁶Ar、³⁷Ar、³⁸Ar、³⁹Ar、⁴⁰Ar)信号;采用该实验室编写的⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating 1.2 数据处理程序对各组 Ar 同位素分析数据进行校正计算,再采用 Isoplot 3.00 软件计算坪年龄及等时线年龄^[27]。

测试样品的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄分析结果见表 2,年龄谱和等时线图见图 5。其中样品 BM2 在阶段加热过程中得到了较理想的坪年龄,其由 1~3 这 3 个连续加温阶段(900 °C~1 100 °C)构成[图 5(a)],该阶段内³⁹Ar 释放量占总量的 85.4%,表观年龄介于 5.06~6.06 Ma,坪年龄为(6.018±0.072)Ma,MSWD 值为 0.53;由该 3 组数据拟合的正等时线年龄为(6.14±0.42)Ma,MSWD 值为 0.05,初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值为 272±120[图 5(b)];反等时线年龄为(6.20±0.20)Ma,MSWD 值为 0.32,初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值为 255±56[图 5(c)]。正、反等时线年龄与坪年龄相当一致。样品 12TS7-1 在年龄谱上 4~7 这 4 个连续加温阶段(1 050 °C~1 200 °C)构成其坪年龄[图 5(d)],该阶段内³⁹Ar 释放量占总量的 82.9%,表观年龄介于 5.63~5.77 Ma,坪年龄为(5.675±0.059)Ma,MSWD 值为 0.092;由该 4 组数据拟合得到的正等时线年龄为(5.63±0.36)Ma (MSWD 值为 0.006),对应的初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值为 296.9±7.2,反等时线年龄为(5.64±0.20)Ma (MSWD 值为 0.016),对应的初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值为 296.6±5.0。

本次分析测试的样品 BM2、12TS7-1 的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄谱中低、高加温阶段的表观年龄与坪年龄有明显差别(表 2)。造成这种年龄波动的原因主要有两点:一是从岩浆中结晶出来的黑云母往往存在着晶格缺陷,在这些位置 Ar 同位素与黑云母

结合的化学键较弱,在矿物形成后稍受扰动便会造成这些位置上 Ar 同位素的丢失,但各同位素的丢失并非按照黑云母整个晶体中 Ar 同位素比例进行的,因此,会造成黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄偏大或偏小;二是在进行黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测试过程中,除构成坪年龄以外的加温阶段,Ar 同位素释放量极小,细微测试偏差便会对结果造成巨大影响,因此,会造成年龄谱较大的波动(内部资料)。尽管样品 BM2 的初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值误差较大,而这很可能是样品中³⁶Ar 含量低而造成的测试误差,但两个测试样品的初始 N(⁴⁰Ar)/N(³⁶Ar)值与尼尔值相接近,这表明样品中并未含有显著的过剩 Ar^[30],并且各自的坪年龄与正、反等时线年龄都相当一致,两个样品的年龄也很相近,因而测试结果是真实可信的,其代表着黑云母的冷却年龄。

4 讨论

4.1 锆石 U-Pb 年龄地质意义

样品 BM8 取自西昆仑慕士塔格岩体中的暗色包体,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为(218.8±1.9)Ma(图 4),与刘铮等获得的慕士塔格岩体中出露的暗色包体锆石 U-Pb 年龄((225.9±2.2)Ma)^[13,31]相当,也与慕士塔格岩体中的寄主花岗岩锆石 U-Pb 年龄(208~(241.5±3.3)Ma)^[13,15,31-33]在误差范围内相一致,意味着暗色包体和寄主花岗岩为同期岩浆作用的产物。慕士塔格岩体中的寄主花岗岩富集大离子亲石元素,亏损高强度场元素,ε_{Nd}(t)值小于 0,初始 N(⁸⁷Sr)/N(⁸⁶Sr)值介于 0.706~0.719,说明其是壳源岩石熔融的产物;而暗色包体的主量、微量元素与寄主花岗岩呈现岩浆混合的趋势,并且暗色包体比寄主花岗岩有着

表2 样品 BM2 和 12TS7-1 的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄分析结果Tab. 2 Analysis Results of Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar Ages of Samples BM2 and 12TS7-1

分析点	加温阶段	温度/°C	年龄/Ma	⁴⁰ Ar 释放量/%	<i>n</i> (³⁹ Ar)/10 ⁻¹⁴ mol	⁴⁰ Ar 信号强度/mV	³⁹ Ar 信号强度/mV	³⁸ Ar 信号强度/mV	³⁷ Ar 信号强度/mV	³⁶ Ar 信号强度/mV
BM2-1	1	900	5.06±3.51	21.6	2.910	4.263±0.008	1.819 64±0.002 70	0.060±0.002	0.119 3±0.001 5	0.011 3±0.002 2
BM2-2	2	1 000	5.89±0.14	74.6	53.500	26.347±0.043	33.511 30±0.040 60	0.707±0.009	0.152 4±0.000 1	0.022 1±0.001 4
BM2-3	3	1 100	6.06±0.08	84.9	14.900	6.625±0.015	9.328 66±0.016 80	0.192±0.001	0.001 5±0.001 8	0.003 2±0.000 0
BM2-4	4	1 200	5.20±0.16	66.0	7.020	3.444±0.010	4.395 85±0.004 90	0.097±0.003	0.300 1±0.001 9	0.003 9±0.000 2
BM2-5	5	1 300	4.76±0.83	66.1	3.920	1.754±0.002	2.451 67±0.012 90	0.051±0.005	0.002 6±0.000 8	0.002 0±0.000 7
BM2-6	6	1 400	5.55±5.59	74.3	1.250	0.584±0.006	0.784 90±0.003 70	0.013±0.002	0.019 6±0.002 3	0.000 5±0.001 5
12TS7-1-1	1	900	5.52±11.88	0.2	0.909	142.089±0.063	0.568 83±0.002 60	0.174±0.004	1.193 8±0.003 4	0.479 8±0.001 0
12TS7-1-2	2	950	17.08±1.08	1.4	2.720	203.105±0.144	1.699 82±0.000 90	0.263±0.004	1.124 1±0.001 2	0.677 4±0.001 0
12TS7-1-3	3	1 000	2.47±0.58	1.3	7.990	95.020±0.096	5.001 74±0.004 80	0.239±0.003	0.551 4±0.001 5	0.317 4±0.001 3
12TS7-1-4	4	1 050	5.77±0.20	16.1	33.300	74.980±0.111	20.833 80±0.015 30	0.654±0.004	0.732 7±0.002 7	0.212 8±0.001 6
12TS7-1-5	5	1 100	5.68±0.08	32.9	18.400	19.955±0.020	11.544 40±0.010 60	0.310±0.001	0.189 5±0.002 0	0.045 2±0.000 3
12TS7-1-6	6	1 150	5.63±0.33	37.4	15.600	14.691±0.016	9.743 09±0.011 00	0.249±0.000	0.021 3±0.002 5	0.031 1±0.001 1
12TS7-1-7	7	1 200	5.66±0.10	67.6	4.270	2.229±0.012	2.670 92±0.007 50	0.062±0.000	0.035 4±0.001 4	0.002 4±0.000 1
12TS7-1-8	8	1 250	8.98±0.56	98.5	2.030	1.158±0.003	1.270 75±0.003 80	0.028±0.003	0.001 3±0.003 0	0.000 0±0.000 2
12TS7-1-9	9	1 300	5.70±9.83	54.0	0.674	0.445±0.000	0.421 99±0.000 00	0.009±0.005	0.000 5±0.001 6	0.000 7±0.001 4
12TS7-1-10	10	1 400	8.19±0.24	86.4	0.431	0.256±0.001	0.269 80±0.001 10	0.004±0.003	0.008 5±0.002 6	0.000 1±0.000 0

注:编号以 BM2 开头的分析点为样品 BM2,中子活化参数为 0.005 530;编号以 12TS7-1 开头的分析点为样品 12TS7-1,中子活化参数为 0.005 522;误差类型为 1 σ 。

更低的初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值和更高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明其为壳-幔岩浆混合的结果^[13,15,32]。该暗色包体的壳-幔混合成因也在岩相学上得到证实,如暗色包体与寄主花岗岩的矿物组成相同,所有矿物都存在着两个世代,并且长石、角闪石等矿物常发育嵌晶结构[图 2(c)],意味着岩浆结晶过程中物理化学条件乃至岩浆成分曾经发生过改变;此外,暗色包体中矿物粒度明显小于寄主花岗岩,且具有大量的针状磷灰石[图 2(d)],表明暗色包体在结晶过程中经历了快速冷却。慕士塔格岩体中的寄主花岗岩经历了幔源基性岩浆的注入及磷灰石、角闪石、斜长石等矿物的分离结晶,酸性岩浆与基性岩浆不完全混合形成了暗色包体与同深成岩墙^[13,15,32]。其中, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为年龄 t 对应的 ϵ_{Nd} 值。

目前,关于西昆仑地体与甜水海地体的碰撞拼合时间仍未确定。西昆仑地区于三叠纪早中期发生了大量的变质事件:位于康西瓦韧性走滑剪切带中的孔兹岩遭受了 210~250 Ma 的剪切变质作用^[34];侵入于该孔兹岩中的英云闪长岩的变质年龄为 240 Ma^[35];塔什库尔干河附近的片麻岩变质年龄为 (242.7±2.3)Ma^[36]。这些变质事件表明,三叠纪早中期西昆仑地体与甜水海地体处于碰撞期。该时

期形成的相关岩体有玉其卡帕岩体(锆石 U-Pb 年龄为 (242.9±2.6)Ma^[13,31])、布伦口岩体((240.5±1.8)Ma^[37])、胜利桥岩体(242 Ma^[38])、贝勒克其 S 型二长花岗岩((235.7±3.9)Ma^[39])等。西昆仑地区整体缺失晚二叠世到中三叠世的沉积记录,这应和甜水海地体与西昆仑地体的碰撞造山密切相关,并且中三叠世之后,区内全部转变为陆相沉积,这可能标志着两地体主碰撞作用的结束^[36]。慕士塔格岩体及其暗色包体为晚三叠世花岗岩浆作用的产物,形成时间晚于上述碰撞发生的时间。在西昆仑地区出露的与慕士塔格岩体同期的岩浆活动还有西昆仑北部含角闪石花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 (228.2±1.5)Ma^[37])、上其木干岩体((225.4±1.9)Ma^[40])、泉水沟北花岗闪长岩((210±1)Ma^[15])和阿卡阿孜岩体(黑云母 $N(^{40}\text{Ar})/N(^{39}\text{Ar})$ 年龄为 213.4 Ma^[41])等。对这些岩体的岩石成因研究表明它们均形成于后碰撞环境。此外,该时期形成的这些晚三叠世花岗岩体在时代上与杨文强等在塔什库尔干地区矽线石榴石黑云母片麻岩和石榴石角闪片麻岩中获得的麻粒岩相退变质年龄(约 220 Ma)^[42]大致同期或稍晚,意味着岩体很可能形成于碰撞后的某个阶段。慕士塔格岩体横跨在被公认为古特提斯洋俯冲削减

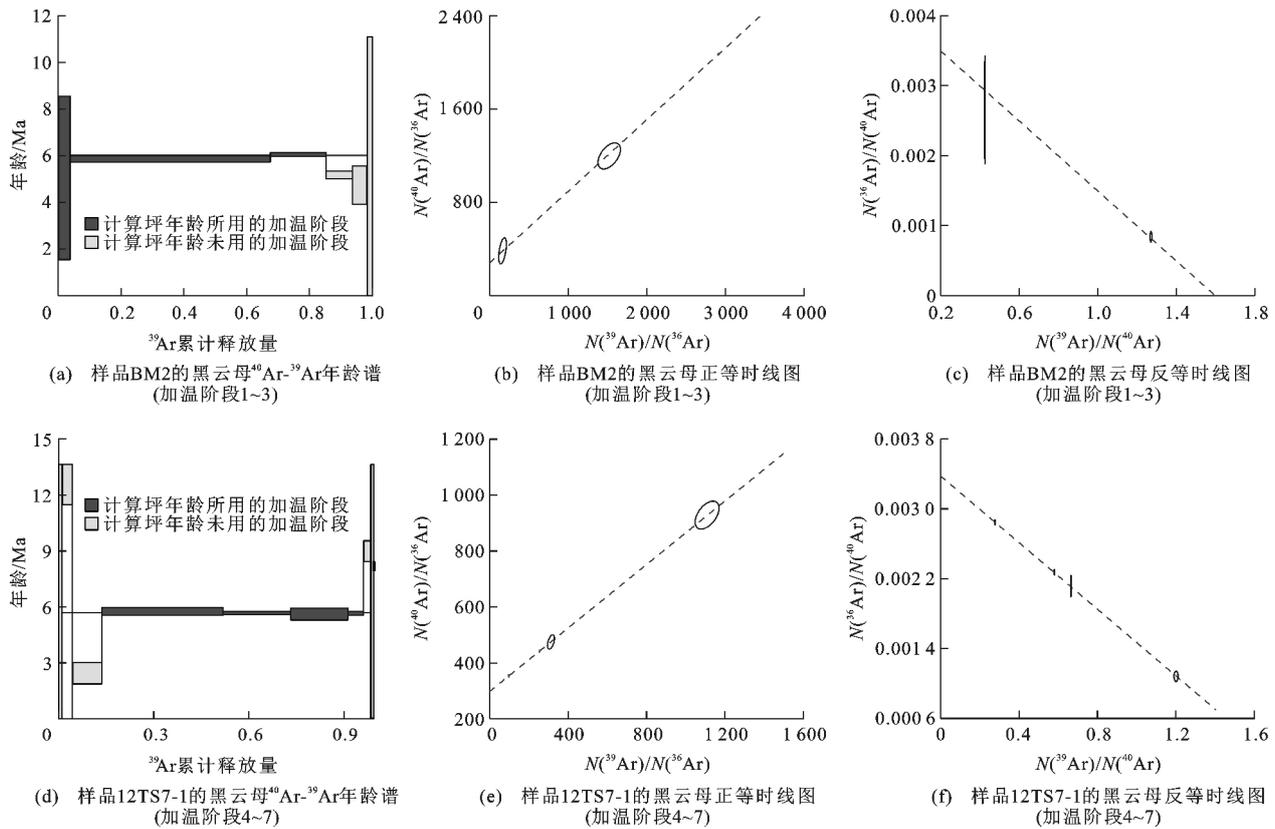


图 5 样品 BM2 与 12TS7-1 的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄谱与等时线图

Fig. 5 Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar Age Spectra and Isochron Diagrams of Samples BM2 and 12TS7-1

的界线(麻扎—康西瓦断裂)上,且侵位于麻扎—康西瓦断裂两侧的西昆仑地体与甜水海地体中(图 1),明显具有钉合岩体的特点^[43]。此外,慕士塔格岩体为一套高钾钙碱性岩石^[13,31-32],可能形成于活动大陆边缘^[44]或后碰撞拉张环境^[45-46]。因此,晚三叠世时期,出露于西昆仑造山带中与慕士塔格岩体同期的岩体形成于与古特提斯洋演化相关的后碰撞阶段。

综上所述,晚三叠世甜水海地体与西昆仑地体沿着麻扎—康西瓦断裂碰撞拼合后的板片断离,引发西昆仑造山带下部软流圈地幔上涌,之前交代的岩石圈地幔部分熔融,从而导致了较大规模的高钾钙碱性岩浆岩侵位^[13,31]。慕士塔格岩体中的暗色包体和寄主花岗岩也就是在这个时期侵位的。

4.2 黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄地质意义

黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄记录的是岩石降温冷却至黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素体系到达封闭温度所处的深度范围时的年龄,其一般可代表岩体的原位冷却年龄^[47]、岩体侵位后剪切变形年龄^[48]或热变质改造年龄^[49]以及岩体隆升年龄^[50]。样品 BM2、12TS7-1 取自西昆仑慕士塔格岩体中的暗色包体,

黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄分别为(6.018±0.072)Ma 和(5.675±0.059)Ma(图 5),与慕士塔格岩体中的暗色包体锆石 U-Pb 年龄((218.8±1.9)Ma)相差甚远,表明黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄不可能代表慕士塔格岩体的侵位年龄。一般而言,花岗岩体的原位冷却速率为 10~30 °C·Ma⁻¹^[51],因此,本次研究获得的两个慕士塔格岩体中暗色包体的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄分别为(6.018±0.072)Ma 和(5.675±0.059)Ma(图 5),但并不能代表岩体侵位后的原位冷却年龄。矿物晶格变形会对矿物保存与俘获⁴⁰Ar 的能力造成影响^[52-54]。慕士塔格岩体出露于麻扎—康西瓦断裂上,该断裂自形成以来活动较为频繁。野外特征和显微薄片观察都明确显示,慕士塔格岩体中矿物存在微弱定向,这可能是岩体经受剪切变形造成的或是原始岩浆流动所致。然而,样品中单个矿物晶体变形并不明显[图 2(c)],表明即使本次研究样品经历过剪切变质作用,但岩石中的黑云母并未受到此次剪切变质作用的影响,因而并没有记录下该变质作用的年龄^[55]。区域地层资料表明慕士塔格岩体毗邻地区未发现 6 Ma 左右的岩浆活动,但并不排除该时期该地区的岩浆活动发生在较深部位,目前并未抬升至地表出露

的可能。但在寄主花岗岩及暗色包体的显微薄片并未观察到重结晶等接触变质活动记录[图2(c)]。样品BM2、12TS7-1的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱中构成坪年龄的加温阶段数少,且这些阶段的 ^{39}Ar 释放量非常高,明显为岩浆结晶黑云母的年龄谱特征(内部资料)。一般情况下,岩浆中的黑云母是在平衡物理化学条件下结晶的,因此,K、Ar同位素与黑云母结合的化学键强度都各自相当, ^{40}Ar 等同位素会在很窄的加温区间内释放量非常大,从而使得构成坪年龄的加温阶段数少,并且 ^{39}Ar 累计释放量高。因此,本次研究样品的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄代表岩体的剪切变形年龄或热变质年龄的可能性非常小,而很可能记录了岩体隆升冷却年龄。

西昆仑慕士塔格岩体所含暗色包体中黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄记录了岩体约6 Ma的冷却年龄,属中新世晚期。古地层、古环境以及热年代学记录了西昆仑及周边地区在中新世晚期到上新世早期发生的一系列构造事件^[5-7,23-26,56-62]。古地层特征包括:中新世晚期到上新世早期,西昆仑山前盆地出现巨厚层磨拉石沉积,并且向上粒度变粗,层中出现不整合;上新统阿图什组下段为扇三角洲平原亚相沉积、滨浅湖相沉积与扇三角洲相沉积,相对于前期地层,岩石粒度变粗,分选变差,砾石棱角更明显,矿物成熟度降低,砾石含量明显增多^[62-64]。这些山前快速沉积反映了快速隆升的动荡环境。古环境特征包括:区域水流方向在中新世末期到上新世早期发生了剧变^[25,65];晚中新世一早上新世期间,西昆仑山前出现的风成沉积意味着山前带气候为干旱气候,塔克拉玛干沙漠逐步扩张^[25,66-68],区域构造背景发生了明显变化。热年代学特征包括:区域内广泛存在着晚中新世热事件;公格尔正断层存在大量约7.5 Ma的热事件;塔合曼断裂存在着约8 Ma的热事件^[59-60]。曹凯等认为这些热事件引发了区内垂向剥蚀,造成了公格尔山至慕士塔格峰山链的强烈隆升^[26]。基于此,本次研究的慕士塔格岩体中暗色包体的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄((6.018±0.072)Ma和(5.675±0.059)Ma)代表着岩体的隆升冷却年龄。样品12TS7-1、BM2的采样点海拔分别为2520 m与3012 m,而样品BM2的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄比样品12TS7-1老0.343 Ma,据此估算出岩体的隆升速率为每年1.43 mm。如此大的隆升速率表明,西昆仑地区至少于中新世晚期已进入强烈隆升阶段。正是由于西昆仑地区的强烈隆升,其高海拔阻挡了印度季风带来的水汽,使得青藏高原西北缘自中新世晚期出现干旱的气候,隆升的西昆仑地区也阻挡

了风成物质的搬运,加速了在西昆仑北侧的塔里木盆地形成塔克拉玛干沙漠^[26,62,67-68]。

5 结 语

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测得西昆仑慕士塔格岩体中暗色包体 U-Pb 加权平均年龄为(218.8±1.9)Ma(MSWD 值为 1.5),为晚三叠世,代表着岩体的结晶年龄。结合区域资料,可推断慕士塔格岩体形成于古特提斯洋闭合后的后碰撞阶段。

(2)西昆仑慕士塔格岩体中暗色闪长岩包体的黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素分析给出了(6.018±0.072)Ma(MSWD 值为 0.530)和(5.675±0.059)Ma(MSWD 值为 0.092)的坪年龄,其代表了岩体的隆升冷却年龄,说明西昆仑地区最晚于中新世晚期已进入快速隆升阶段。

新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局董连慧教授级高级工程师和屈迅教授级高级工程师在野外一手资料的获取上提供了大量帮助,中国科学院新疆生态与地理研究所周司法研究员在野外工作保障上提供了有益帮助,北京大学地球与空间科学学院季建清教授与周晶博士在实验测试中提供了热情帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

References:

- [1] 李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社,2008.
LI Rong-she, JI Wen-hua, YANG Yong-cheng, et al. Geologic Map of the Kunlun and Adjacent[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [2] MATTERN F, SCHNEIDER W. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys Oceans in the Western Kunlun (Xinjiang, China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6): 637-650.
- [3] WANG Z H. Tectonic Evolution of the Western Kunlun Orogenic Belt, Western China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24(2): 153-161.
- [4] LIU Z, JIANG Y H, JIA R Y, et al. Origin of Middle Cambrian and Late Silurian Potassic Granitoids from the Western Kunlun Orogen, Northwest China: A Magmatic Response to the Proto-Tethys Evolution [J]. Mineralogy and Petrology, 2014, 108(1): 91-110.
- [5] 王 军. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升: 来自磷灰石裂变径迹分析的证据 [J]. 地质论评, 1998, 44(4): 435-442.
WANG Jun. Uplift of the Karibasheng and Kuzigan

- Granite in the West Kunlun Mountains; Evidence from Apatite Fission Track Analysis[J]. *Geological Review*, 1998, 44(4): 435-442.
- [6] COWGILL E S. Tectonic Evolution of the Altyn Tagh-western Kunlun Fault System, Northwestern China [D]. Los Angeles: University of California, 2001.
- [7] 王永, 李德贵, 肖序常, 等. 西昆仑山前晚新生代构造活动与青藏高原西北缘的隆升[J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 41-47.
WANG Yong, LI De-gui, XIAO Xu-chang, et al. Late Cenozoic Tectonic Movement in the Front of the West Kunlun Mountains and Uplift of the Northwestern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 41-47.
- [8] 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
JIANG Chun-fa, WANG Zong-qi, LI Jin-yi. Opening-closing Tectonics of Center Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [9] 朱杰, 李秋根, 王宗起, 等. 西昆仑甜水海地体早寒武世花岗岩浆作用及其构造意义[J]. *西北地质*, 2016, 49(4): 1-18.
ZHU Jie, LI Qiu-gen, WANG Zong-qi, et al. Magmatism and Tectonic Implications of Early Cambrian Granitoid Plutons in Tianshuihai Terrane of the Western Kunlun Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(4): 1-18.
- [10] 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西北缘大洋斜长花岗岩带的岩石地球化学特征、成因及其构造环境[J]. *岩石学报*, 2015, 31(9): 2566-2582.
KANG Lei, XIAO Pei-xi, GAO Xiao-feng, et al. Geochemical Characteristics, Petrogenesis and Tectonic Setting of Oceanic Plagiogranite Belt in the Northwestern Margin of Western Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(9): 2566-2582.
- [11] 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西段晚古生代—中生代花岗质岩浆作用及构造演化过程[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 533-552.
KANG Lei, XIAO Pei-xi, GAO Xiao-feng, et al. Neopaleozoic and Mesozoic Granitoid Magmatism and Tectonic Evolution of the Western West Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 533-552.
- [12] 胡军, 王核, 韩红卫, 等. 西昆仑甜水海地块大红柳滩铁矿床成因浅析及找矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(5): 949-959.
HU Jun, WANG He, HAN Hong-wei, et al. Genesis of the Dahongliutan Iron Deposit in the Tianshuihai Terrane, West Kunlun and Its Prospecting Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(5): 949-959.
- [13] 刘铮. 西昆仑造山带早中生代花岗岩成因与古特提斯构造演化[D]. 南京: 南京大学, 2015.
LIU Zheng. Petrogenesis of Early Mesozoic Granites in West Kunlun Orogen and Its Implications for Paleo-Tethys Tectonic Evolution[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [14] 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1180-1194.
QIAO Geng-biao, ZHANG Han-de, WU Yue-zhong, et al. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1180-1194.
- [15] 刘成军. 西昆仑造山带(西段)及周缘早古生代—早中生代物质组成与构造演化[D]. 西安: 长安大学, 2015.
LIU Cheng-jun. Composition and Tectonic Evolution of West Kunlun Orogenic Belt and Its Periphery in the Early Paleozoic-Early Mesozoic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [16] 新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队. 新疆南疆西部地质图(1:500 000)及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
No. 2 Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Geologic Map of Western Part of the South of Xinjiang(1:500 000) and Its Manual [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [17] 张玉泉, 谢应雯. 青藏高原及邻区富碱侵入岩: 以苦干子和太和二岩体为例[J]. *中国科学: B 辑*, 1994, 24(10): 1102-1108.
ZHANG Yu-quan, XIE Ying-wen. Alkaline-rich Intrusive Rocks of Tibet Plateau and Its Adjacent Region: Taking Kuganzi Complex and Taihe Pluton as Examples [J]. *Science in China: Series B*, 1994, 24(10): 1102-1108.
- [18] JIANG Y H, LIU Z, JIA R Y, et al. Miocene Potassic Granite-syenite Association in Western Tibetan Plateau: Implications for Shoshonitic and High Ba-Sr Granite Genesis[J]. *Lithos*, 2012, 134/135: 146-162.
- [19] 邓万明. 青藏北部新生代钾质火山岩微量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 1993, 9(4): 379-387.
DENG Wan-ming. Study on Trace Element and Sr, Nd Isotopic Geochemistry of Cenozoic Potassic Vol-

- canic Rocks in North Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(4): 379-387.
- [20] 漆树基. 西昆仑山大红柳滩断裂一线的新生代熔岩被及其地质意义[J]. *新疆地质*, 1989, 7(2): 86-91.
QI Shu-ji. Cenozoic Lava Sheet Along Dahongliutan Fault and Its Geologic Significance[J]. *Xinjiang Geology*, 1989, 7(2): 86-91.
- [21] 刘嘉麒, 买买提. 西昆仑山第四纪火山的分布与 K-Ar 年龄[J]. *中国科学: B 辑*, 1990(2): 180-197.
LIU Jia-qi, MAIMAITI. Distribution of Quaternary Volcanos in West Kunlun Mountain and Their K-Ar Ages[J]. *Science in China: Series B*, 1990(2): 180-197.
- [22] 邓万明. 中昆仑造山带钾玄岩质火山岩的地质、地球化学和时代[J]. *地质科学*, 1991, 26(3): 201-213.
DENG Wan-ming. Geology, Geochemistry and Age of Shoshonitic Lavas in the Central Kunlun Orogenic Belt[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1991, 26(3): 201-213.
- [23] 刘 函, 王国灿, 曹 凯, 等. 西昆仑及邻区区域构造演化的碎屑锆石裂变径迹年龄记录[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 64-78.
LIU Han, WANG Guo-can, CAO Kai, et al. The Detrital Zircon Fission-track Ages Constraint to Tectonic Processes in West Kunlun and Adjacent Regions [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 64-78.
- [24] 王国灿, 杨巍然, 马华东, 等. 东、西昆仑山晚新生代以来构造隆升作用对比[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 157-166.
WANG Guo-can, YANG Wei-ran, MA Hua-dong, et al. Comparing of the Tectonic Uplift Since Late Cenozoic Between the East and West Kunlun Mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 157-166.
- [25] 司家亮. 青藏高原西北缘新生代构造隆升及扩展 [D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
SI Jia-liang. Cenozoic Uplift and Growth of Northwestern Margin of the Tibetan Plateau [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [26] 曹 凯, 王国灿, 刘 超, 等. 西昆仑及邻区新生代差异隆升的热年代学证据[J]. *地球科学*, 2009, 34(6): 895-906.
CAO Kai, WANG Guo-can, LIU Chao, et al. Thermochronological Evidence of the Cenozoic Differential Uplift Processes of the West Kunlun and Its Adjacent Area [J]. *Earth Science*, 2009, 34(6): 895-906.
- [27] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [28] HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- [29] RUBATTO D, GEBAUER D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps [M] // PAGEL M, BARBIN V, BLANC P, et al. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin: Springer, 2000: 373-400.
- [30] HANSON G N, GAST P W. Kinetic Studies in Contact Metamorphic Zones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1967, 31(7): 1119-1153.
- [31] JIANG Y H, JIA R Y, LIU Z, et al. Origin of Middle Triassic High-K Calc-alkaline Granitoids and Their Potassic Microgranular Enclaves from the Western Kunlun Orogen, Northwest China: A Record of the Closure of Paleo-Tethys [J]. *Lithos*, 2013, 156/157/158/159: 13-30.
- [32] 康 磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的岩石地球化学特征、岩石成因及其构造意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 2001-2014.
KANG Lei, XIAO Pei-xi, GAO Xiao-feng, et al. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Muztagata Intrusion in Western Kunlun Orogenic Belt and Their Tectonic Significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(12): 2001-2014.
- [33] 宋 樾, 王 建, 刘金霖, 等. 西昆仑慕士塔格公格尔印支期侵入岩岩石与锆石地球化学特征及研究意义 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(5): 1418-1435.
SONG Yue, WANG Jian, LIU Jin-lin, et al. Chronology, Geochemistry, Hafnium Isotope Characteristics and Tectonic Implications of Muztag-Kongur Indosinian Instructive Rocks [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(5): 1418-1435.
- [34] 许志琴, 戚学祥, 刘福来, 等. 西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义 [J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 733-743.
XU Zhi-qin, QI Xue-xiang, LIU Fu-lai, et al. The Kangxiwar Caledonian Khondalite Series in West Kunlun, China, and Its Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 733-743.
- [35] 张传林, 陆松年, 于海锋, 等. 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 [J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37(2): 145-154.
ZHANG Chuan-lin, LU Song-nian, YU Hai-feng, et al. Tectonic Evolution of the Western Kunlun Orogenic Belt in Northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence

- from Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb Geochronology[J]. Science in China; Series D, Earth Sciences, 2007, 37(2): 145-154.
- [36] 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑康西瓦断裂西段斜长片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质通报, 2012, 31(8): 1244-1250.
KANG Lei, XIAO Pei-xi, GAO Xiao-feng, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Garnet-bearing Muscovite-biotite Plagioclase Gneiss in Western Kangxiwar Fault of Western Kunlun and Its Tectonic Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(8): 1244-1250.
- [37] 张传林, 于海锋, 王爱国, 等. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(5): 645-652.
ZHANG Chuan-lin, YU Hai-feng, WANG Ai-guo, et al. Dating of Triassic Granites in the Western Kunlun Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(5): 645-652.
- [38] 杨文强. 西昆仑塔县—康西瓦构造带印支期变质、岩浆作用及布伦阔勒岩群的形成时代[D]. 西安: 西北大学, 2013.
YANG Wen-qiang. The Indosinian Metamorphism, Magmatism and Formation Age of Bunlunkuole Rock Group in the Taxkorgan-Kangxiwar Tectonic Belt, Western Kunlun[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [39] HUANG J G, YANG R D, YANG J, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Triassic Granite from Taer Region, the Northern Margin of West Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica; English Edition, 2013, 87(2): 346-357.
- [40] 陈海云, 孙妍, 包平, 等. 西昆仑上其木干岩体岩石成因及地质意义: 地球化学及 U-Pb 年代学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(4): 657-670.
CHEN Hai-yun, SUN Yan, BAO Ping, et al. Petrogenesis and Geological Significance of Shangqimugan Plutons in Western Kunlun: Evidence from Geochemistry and U-Pb Chronology[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(4): 657-670.
- [41] 袁超, 孙敏, 周辉, 等. 西昆仑阿卡阿孜山岩体的年代、源区和构造意义[J]. 新疆地质, 2003, 21(1): 37-45.
YUAN Chao, SUN Min, ZHOU Hui, et al. Arkarz Shan Intrusive Complex, Western Kunlun: Age, Source and Tectonic Implications[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(1): 37-45.
- [42] 杨文强, 刘良, 曹玉亭, 等. 西昆仑塔什库尔干印支期(高压)变质事件的确定及其构造地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1047-1060.
YANG Wen-qiang, LIU Liang, CAO Yu-ting, et al. Geochronological Evidence of Indosinian (High-pressure) Metamorphic Event and Its Tectonic Significance in Taxkorgan Area of the Western Kunlun Mountains, NW China[J]. Science China; Earth Sciences, 2011, 41(8): 1047-1060.
- [43] 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2233-2246.
HAN Bao-fu, GUO Zhao-jie, HE Guo-qi. Timing of Major Suture Zones in North Xinjiang, China: Constraints from Stitching Plutons[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2233-2246.
- [44] CONDIE K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1982.
- [45] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [46] BARBARIN B. A Review of the Relationships Between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments[J]. Lithos, 1999, 46(3): 605-626.
- [47] ALTUNKAYNAK S, SUNAL G, ALDANMAZ E, et al. Eocene Granitic Magmatism in NW Anatolia (Turkey) Revisited: New Implications from Comparative Zircon SHRIMP U-Pb and ⁴⁰Ar-³⁹Ar Geochronology and Isotope Geochemistry on Magma Genesis and Emplacement[J]. Lithos, 2012, 155: 289-309.
- [48] 周辉, 储著银, 李继亮, 等. 西昆仑库地韧性剪切带的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 233-239.
ZHOU Hui, CHU Zhu-yin, LI Ji-liang, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of Ductile Shear Zone in Kuda, West Kunlun, Xinjiang[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(2): 233-239.
- [49] 唐菊兴, 张丽, 黄勇, 等. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 759-769.
TANG Ju-xing, ZHANG Li, HUANG Yong, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Isotope Ages of Main Geological Bodies in Xiongkun Copper-gold Deposit, Xietongmen County, Tibet, and Their Geological Significance[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(6): 759-769.
- [50] COPELAND P, HARRISON T M, KIDD W S F, et al. Rapid Early Miocene Acceleration of Uplift in the Gangdese Belt, Xizang (Southern Tibet), and Its Bearing on Accommodation Mechanisms of the India-Asia

- Collision[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 86(2/3/4): 240-252.
- [51] CLIFF R A. Isotopic Dating in Metamorphic Belts[J]. *Journal of the Geological Society*, 1985, 142(1): 97-110.
- [52] KRAMAR N, COSCA M A, HUNZIKER J C. Heterogeneous ^{40}Ar Distributions in Naturally Deformed Muscovite; In-situ UV-laser Ablation Evidence for Microstructurally Controlled Intragrain Diffusion[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 377-388.
- [53] REDDY S M, POTTS G J, KELLEY S P. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages in Deformed Potassium Feldspar; Evidence of Microstructural Control on Ar Isotope Systematics [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(2): 186-200.
- [54] COSCA M, STUNITZ H, BOURGEIX A L, et al. ^{40}Ar Loss in Experimentally Deformed Muscovite and Biotite with Implications for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Naturally Deformed Rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(24): 7759-7778.
- [55] MOTTRAM C M, WARREN C J, HALTON A M, et al. Argon Behaviour in an Inverted Barrovian Sequence, Sikkim Himalaya: The Consequences of Temperature and Timescale on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Mica Geochronology[J]. *Lithos*, 2015, 238: 37-51.
- [56] ARNAUD N O, BRUNEL M, CANTAGREL J M, et al. High Cooling and Denudation Rates at Kongur Shan, Eastern Pamir (Xinjiang, China) Revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Alkali Feldspar Thermochronology[J]. *Tectonics*, 1993, 12(6): 1335-1346.
- [57] ZHENG H B, POWELL C M, AN Z S, et al. Pliocene Uplift of the Northern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 715.
- [58] WANG E C, WAN J L, LIU J Q. Late Cenozoic Geological Evolution of the Foreland Basin Bordering the West Kunlun Range in Pulu Area; Constraints on Timing of Uplift of Northern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, DOI: 10.1029/2002JB001877.
- [59] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Tectonic Evolution of the Northeastern Pamir; Constraints from the Northern Portion of the Cenozoic Kongur Shan Extensional System, Western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(7/8): 953.
- [60] ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al. Cenozoic Evolution of the Eastern Pamir; Implications for Strain-accommodation Mechanisms at the Western End of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(7/8): 882-896.
- [61] 司家亮, 李海兵, BARRIER L, 等. 青藏高原西北缘晚新生代的隆升特征: 来自西昆仑山前盆地的沉积学证据[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1356-1367.
- SI Jia-liang, LI Hai-bing, BARRIER L, et al. Late Cenozoic Uplift of the Northwestern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Sedimentary Evidence from Piedmont Basins of the West Kunlun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1356-1367.
- [62] 廖林. 西昆仑新生代构造事件及其沉积响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- LIAO Lin. Cenozoic Tectonic Events and Their Sedimentary Records in the West Kunlun[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [63] 雷刚林, 廖林, 师俊, 等. 西昆仑中新世晚期—上新世早期隆升活动的沉积记录: 来自塔西南棋北3井沉积物重矿物的证据[J]. *地质学报*, 2011, 85(8): 1334-1342.
- LEI Gang-lin, LIAO Lin, SHI Jun, et al. Sedimentary Records of Uplifting in West Kunlun During Late Miocene-Early Pliocene; Evidence from the Heavy Mineral Assemblages of Well Qibei-3 in the Southwestern Tarim[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1334-1342.
- [64] 金小赤, 王军, 陈炳蔚, 等. 新生代西昆仑隆升的地层学和沉积学记录[J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 459-467.
- JIN Xiao-chi, WANG Jun, CHEN Bing-wei, et al. Stratigraphic and Sedimentologic Records of the Uplifting of the West Kunlun in the Cenozoic[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4): 459-467.
- [65] 黎敦朋. 青藏高原西北缘上新世—早更新世构造变形与高原隆升[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- LI Dun-peng. Tectonic Deformation on Northwestern Margin of Tibetan Plateau During Pliocene-Pleistocene and Uplift of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [66] ZHENG H B, POWELL C M, BUTCHER K, et al. Late Neogene Loess Deposition in Southern Tarim Basin; Tectonic and Palaeoenvironmental Implications [J]. *Tectonophysics*, 2003, 375(1/2/3/4): 49-59.
- [67] SUN J M, LIU T S. The Age of the Taklimakan Desert[J]. *Science*, 2006, 312: 1621.
- [68] SUN J M, ZHANG L Y, DENG C L, et al. Evidence for Enhanced Aridity in the Tarim Basin of China Since 5.3 Ma[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(9/10): 1012-1023.