

doi: 10.12029/gc20201116001

何国建, 胡修棉, 楼法生, 陈浩鹏, 杨晓飞, 陈建中, 吴春伟, 张密棕. 2024. 喀喇昆仑北羌塘地体加勒万河地区中—基性岩地球化学与年代学研究[J]. 中国地质, 51(4): 1422–1440.

He Guojian, Hu Xiumian, Lou Fasheng, Chen Haopeng, Yang Xiaofei, Chen Jianzhong, Wu Chunwei, Zhang Miliang. 2024. Geochemistry and geochronology of intermediate–basic rocks in the Galwan Valley area of the North Qiangtang terrane, Karakoram[J]. Geology in China, 51(4): 1422–1440(in Chinese with English abstract).

## 喀喇昆仑北羌塘地体加勒万河地区中—基性岩 地球化学与年代学研究

何国建<sup>1,2,3</sup>, 胡修棉<sup>1</sup>, 楼法生<sup>4</sup>, 陈浩鹏<sup>2,3</sup>, 杨晓飞<sup>5</sup>,  
陈建中<sup>5</sup>, 吴春伟<sup>5</sup>, 张密棕<sup>2,3</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 江西省地质调查勘查院基础地质调查所, 江西南昌 330030; 3. 江西有色地质矿产勘查开发院, 江西南昌 330030; 4. 江西省地质调查勘查院, 江西南昌 330009; 5. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:**【研究目的】加勒万河谷位于北羌塘地体的喀喇昆仑山, 紧邻火烧云超大型铅锌矿床。对加勒万河地区新发现的岩浆岩开展岩石地球化学及年代学研究有助于深入理解区域成矿动力学背景和岩浆演化历史, 为区域岩浆–构造–成矿作用研究提供理论基础。【研究方法】本研究报道了加勒万河地区 7 件中—基性岩岩样, 岩性包括玄武岩、辉绿岩和闪长岩, 并对这些样品进行了系统的矿物学、主量和微量元素、锆石 U–Pb 年龄和微量元素分析。【研究结果】锆石 U–Pb 定年结果表明冰洞闪长岩的侵位年龄为(98.9±1.2)Ma, 其全岩成分具有低钾钙碱性的特点, 而玄武岩中锆石 U–Pb 定年结果显示其喷发年龄为(232±9)Ma, 全岩地球化学组成上具有钙碱性—过碱性的特点。锆石定年结果显示闪长岩与玄武岩中均发育大量约 800 Ma 的继承锆石, 且二者继承锆石年龄频谱均出现 6 个不同时代的年龄峰。【结论】冰洞闪长岩是地壳增厚背景下壳–幔混合作用的产物, 与新特提斯洋闭合后印度板块与欧亚板块碰撞造山的远程效应有关。闪长岩与玄武岩中大量 800 Ma 继承锆石的发育表明他们来源于新元古代基底物质的熔融。闪长岩与玄武岩中的 6 个不同的锆石年龄峰反映了中元古代结晶基底、Rodinia 超大陆的裂解至新特提斯洋闭合碰撞造山等 6 个期次的构造岩浆活动。

**关键词:** 继承锆石; 基底; 地质调查工程; 加勒万河; 北羌塘地体; 喀喇昆仑

**创新点:** 获得了加勒万河一带中—基性岩浆岩的年龄, 同时通过大量出现的 800 Ma 的继承锆石年龄推断了其新元古代基底熔融产物。以闪长岩、玄武岩继承锆石年龄频谱作为地质记录, 梳理和探讨了区域构造岩浆地质演化活动。

中图分类号: P584; P588.1; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)04–1422–19

## Geochemistry and geochronology of intermediate–basic rocks in the Galwan Valley area of the North Qiangtang terrane, Karakoram

收稿日期: 2020–11–16; 改回日期: 2021–01–22

基金项目: 新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目(K15–1–LQ22)资助。

作者简介: 何国建, 男, 1987 年生, 硕士生, 高级工程师, 主要从事于青藏高原区域地质矿产调查研究工作; E-mail: 541373659@qq.com。

HE Guojian<sup>1,2,3</sup>, HU Xiumian<sup>1</sup>, LOU Fasheng<sup>4</sup>, CHEN Haopeng<sup>2,3</sup>, YANG Xiaofei<sup>5</sup>,  
CHEN Jianzhong<sup>5</sup>, WU Chunwei<sup>5</sup>, ZHANG Miliang<sup>2,3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Basic Geological Survey Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330030, Jiangxi, China; 3. Jiangxi Institute of Geological Prospecting and Mineral Resource for Nonferrous Metal, Nanchang 330030, Jiangxi, China; 4. Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330009, Jiangxi, China; 5. No.3 Geological Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** This paper is the result of geological survey engineering.

**[Objective]** The Galwan Valley, which adjacent to the Huoshayun super large lead–zinc deposit, located in the Karakoram Mountains of the Northern Qiangtang terrane. A systematically litho geochemistry and chronological studies was conducted on the newly discovered magmatic rocks in the Galwan Valley area to helps us deeply understanding the regional metallogenic dynamics and magmatic evolution history, providing a theoretical foundation for the study of regional magmatic–tectonic–mineralization processes. **[Methods]** This study reports seven samples of intermediate–basic magmatic rocks in the Galwan Valley area, including basalt, diabase, and diorite. A systematic mineralogical, major and trace element, zircon U–Pb age, and trace element analyses were conducted on these samples. **[Results]** The zircon U–Pb dating results indicate that the Bingdong diorite is emplaced at  $(98.9\pm 1.2)$  Ma, and its whole–rock composition is characterized by low–potassium calc–alkaline features. In contrast, the zircon U–Pb dating results for the basalt show an eruption age of  $(232\pm 9)$  Ma, with its whole–rock geochemical composition displaying calcium alkali or peralkaline characteristics. The zircon dating results show that both the diorite and basalt samples contain a large number of ~800 Ma inherited zircons, and both have age spectra featuring six distinct age peaks. **[Conclusions]** The Bingdong diorite is a product of crust–mantle mixing under a crustal thickening background, related to the remote effect of the India–Asia collision orogeny following the closure of the Neo–Tethys Ocean. The existence of numerous ~800 Ma inherited zircons in the diorite and basalt indicates that they originated from the melting of Neoproterozoic basement material. The six distinct zircon age peaks in both the diorite and basalt reflect six periods of tectono–magmatic activity, ranging from the Mesoproterozoic crystalline basement and the breakup of the Rodinia supercontinent to the closure of the Neo–Tethys Ocean and subsequent collisional orogeny.

**Key words:** inherited zircon; basement; geological survey engineering; Galwan Valley; the North Qiangtang terrane; Karakoram

**Highlights:** We have obtained new ages of intermediate–basic magmatic rocks in the Galwan Valley area, and inferred the material source of their Neoproterozoic basement melting through a large number of ~800 Ma inherited zircon ages. Diorites and basalts inherited zircon age spectra were used as evidence for geological records to sort out and explore regional tectonic magmatic geological evolution activities.

**About the first author:** HE Guojian, male, born in 1987, master candidate, senior engineer, mainly engaged in the Qinghai Tibet Plateau regional geological and mineral researches; E–mail: [541373659@qq.com](mailto:541373659@qq.com).

**Fund support:** Supported by the project of Xinjiang Geological Exploration Fund (No.K15–1–LQ22).

## 1 引 言

喀喇昆仑地处青藏高原西北部, 西北起于帕米尔高原, 东南止于青藏高原西北部, 加勒万河地区位于喀喇昆仑山脉西南侧。近年来随着火烧云超大型铅锌矿以及红柳滩一带伟晶岩型锂矿的发现, 喀喇昆仑地区近年的地质工作程度得到了大幅提升。火烧云—加勒万河—河尾滩一带岩浆活动极弱, 仅见有少量中基性岩脉、岩滴以及侏罗系中见

有玄武岩, 所以该区域的岩浆岩研究程度较低。团结峰一带的龙山组( $J_2l$ )玄武岩获得锆石 U–Pb 同位素年龄为  $(174.4\pm 2.7)$  Ma(菅坤坤等, 2019); 而在火烧云北多宝山一带获得巴工布兰莎组( $J_1bg$ )中英安岩的锆石 U–Pb 同位素年龄为  $(195.5\pm 1.1)$  Ma(周能武等, 2019); 董连慧等(2015)获得火烧云闪锌矿 Rb–Sr 同位素为  $(186\pm 6)$  Ma。

喀喇昆仑地区已发现有众多的铅锌矿床, 有火烧云、萨岔口、加勒万河、兴山北、红山湖南、甜水海、化石山、豹子山、团结峰等(图 1)。其中火烧云

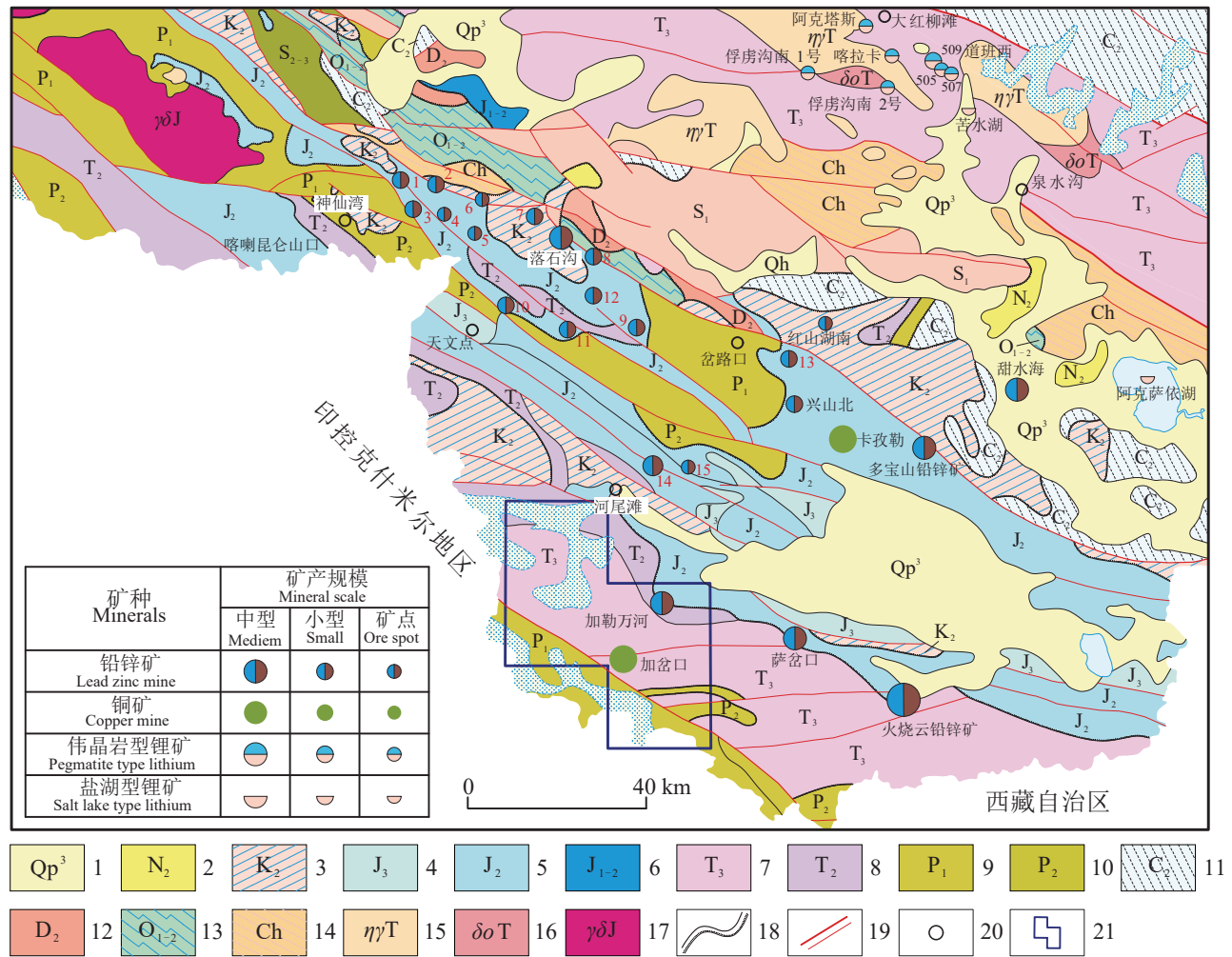


图1 喀喇昆仑区域地质矿产图(据高永宝等, 2019 修改)

1—上更新统; 2—始新统; 3—上白垩统; 4—上侏罗统; 5—中侏罗统; 6—中—下侏罗统; 7—上三叠统; 8—中三叠统; 9—早二叠统; 10—中二叠统; 11—上石炭统; 12—中泥盆统; 13—下—中奥陶统; 14—长城系; 15—三叠纪二长花岗岩; 16—三叠纪石英闪长岩; 17—侏罗纪花岗岩闪长岩; 18—地质界线/角度不整合界线; 19—断裂/大断裂; 20—地理位置; 21—研究区范围

Fig.1 Regional geological map of the Karakoram (modified from Gao Yongbao et al., 2019)

1—Upper Pleistocene; 2—Eocene series; 3—Upper Cretaceous; 4—Upper Jurassic; 5—Middle Jurassic; 6—Middle–Lower Jurassic; 7—Upper Triassic; 8—Middle Triassic; 9—Upper Permian; 10—Middle Permian; 11—Upper Carboniferous; 12—Middle Devonian; 13—Lower/Middle Ordovician; 14—Changchengian System; 15—Triassic monzogranite; 16—Triassic quartz diorite; 17—Jurassic granodiorite; 18—Geological boundary or angular unconformity boundary; 19—Large fault or fault; 20—Geographical position; 21—Study area

估算铅+锌资源量为 1895.0 万 t(范廷宾等, 2019), 已成为国内探明储量最大的超大型铅锌矿床; 萨岔口铅锌矿床估算铅+锌资源量已大于 150 万 t, 达到大型规模(范廷宾等, 2019)。笔者 2015—2018 年在火烧云西北约 50 km 的加勒万河谷中新发现了加勒万河铅锌矿以及加岔口铜矿。加勒万河铅锌矿与火烧云及萨岔口铅锌矿在同一地层构造带上(图 1), 成矿地质条件极为相似。范廷宾等(2019)对甜水海地区近 39 处不同大小的铅锌矿床特征进行了归纳总结, 划分了密西西比河谷型(MVT)和沉

积喷流型(SEDEX)两大类型, 二者的主要典型矿床为多宝山铅锌矿与火烧云铅锌矿。高永宝等(2019)从矿物学、地球化学及同位素示踪对火烧云铅锌矿进行了详细的研究与分析, 提出了盆地边缘褶皱逆冲+构造流体+次生交代 3 阶段成矿模式。

不同学者提出的不同成矿模式略有不同, 但基本上都反映出该区域铅锌矿床是由区域地层、构造、岩浆共同演化的产物。以往的研究主要针对区域内矿床的地质特征、矿物成因、控矿构造、成矿阶段与模式(高永宝等, 2019), 虽然都提出成矿流

体、金属矿元素来源与深部的岩浆活动有着重要的关系,但由于岩浆出露的局限性,对区域内的岩浆活动了解十分有限。本次工作在研究地层、构造以及找矿的基础上,对加勒万河区域内的各类岩脉以及火山岩进行地球化学及年代学研究,以期为区域的地质演化及成矿理论研究提供宝贵的依据。

## 2 区域地质背景

加勒万河地区位于红山湖—乔尔天山断裂以南,班公湖—怒江断裂以北地区,属于特提斯构造域西藏—三江造山系(I级)、羌塘多岛弧盆系(II级)、塔什库尔干—甜水海地块(III级)中的乔尔天山—红南山前陆盆地(图 2)(潘桂棠等, 2009; 范廷宾等, 2019)。出露地层有加温达坂组、空喀山口组、河尾滩组、克勒青河组、巴工布兰莎组、龙山组(何国建等, 2020)。区域内岩浆活动弱,未见岩体,仅见少量的辉绿岩、辉绿辉长岩等中—基性岩脉,主要侵入于二叠系加温达坂组深色系碎屑岩之中;火山岩主要见于西南峡谷一带侏罗系巴工布兰莎组之中,岩性为杏仁状辉石玄武岩。

## 3 岩石特征

### 3.1 玄武岩

分布于河尾滩西南侧清水沟—长岭一带早侏罗世巴工布兰莎组上段地层之中(图 3),呈夹层出现,岩石类型单一,岩性为杏仁状辉石玄武岩。杏仁状辉石玄武岩呈暗灰绿色、墨绿色(图 4a、b),无斑间粒结构,块状构造,由斜长石、辉石、角闪石及少量磷灰石组成。斜长石含量为 65%,呈细长条状,斜长石无规则排列,间粒间隐结构,未见次生变化(图 4d、e);辉石含量为 26%,粒度大多在 0.05~0.1 mm,主要为普通辉石,呈粒状或短柱状,局部辉石矿物颗粒蚀变为绿帘石,具环带状结构;角闪石含量为 4%,呈粒状,大小在 0.2 mm 以下,碎屑状分布,岩石中分布不均匀;磷灰石少量,呈柱状,长径在 0.01~0.1 mm,岩石中分布不均匀。

### 3.2 闪长岩

闪长岩分布于加勒万河加岔口冰洞南东部,面积接近 1 km<sup>2</sup>,呈脉状产出,出露宽度 1~3 m,与二叠系加温达坂组呈侵入接触。呈灰绿色、灰色,细粒结构、细粒斑状结构,块状构造、微定向构造

(图 4c、f)。斜长石含量 70% 左右,普遍具中度绿泥石化、高岭土化、隐晶帘石化;暗色矿物含量 15%~30%,均绿泥石化、绿帘石化、阳起石化,仅残留片柱状形态,个别见有鳞片状黑云母;石英闪长岩内见有石英,含量 5% 左右,呈波状消光。

## 4 样品采集及分析方法

加勒万河谷区域内杏仁状辉石玄武岩采集 2 件样品 PM101-RZ1、PM102-RZ1;闪长岩采集了 1 件样品 PM201-RZ1;对这 3 件样品进行 U-Pb 同位素年龄测定、主量与微量及稀土元素的分析测试。在区域其他地区采集 4 件中—基性岩脉样品进行主量与微量元素的分析测试,其中辉绿辉长岩采集了 2 件样品 PM307-HQ9、Pdh1-HQ4,辉绿岩采集了 1 件样品 PM304-HQ1,角闪辉石岩采集了 1 件样品 Pdh1-HQ48。样品采集位置如图 2 所示。样品均在剖面测制过程中采集的基岩,确保原地采集以及挑选风化蚀变较弱的岩块。

样品的薄片鉴定、主量元素、微量元素分析测试在新疆地矿局第三地质大队实验室完成。主量元素由原子吸收分光光度仪与紫外可见分光光度仪完成测试;微量元素由电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析测试。

锆石的挑选在自然资源部南昌矿产资源监督检测中心(江西省地质调查研究院)完成。对样品进行粉碎、重液分离和单辊干式强磁选机磁选,最后通过双目镜进行锆石的挑选。锆石 U-Pb 同位素分析由武汉上谱科技有限责任公司实验室完成。将已挑选好的锆石使用环氧树脂中制靶,随后进行阴极发光(CL)照相。测年所用等离子体质谱仪为 Agilent7700,激光剥蚀系统为 GeoLas Pro,激光能量密度 80 mJ,频率 5 Hz,激光束斑直径 32 μm,微量元素校正标准样品为 NIST 610,同位素比值校正标准样品为 91500,同位素比值监控标准样品采用 GJ-1。具体分析条件及流程详见文献 Liu et al. (2008),数据采用 ICPMS DataCal10.0 进行处理。

## 5 分析结果

### 5.1 年代学

岩浆岩中的继承锆石或捕获锆石对研究深部岩石圈结构和演化具有重要的意义,被认为是

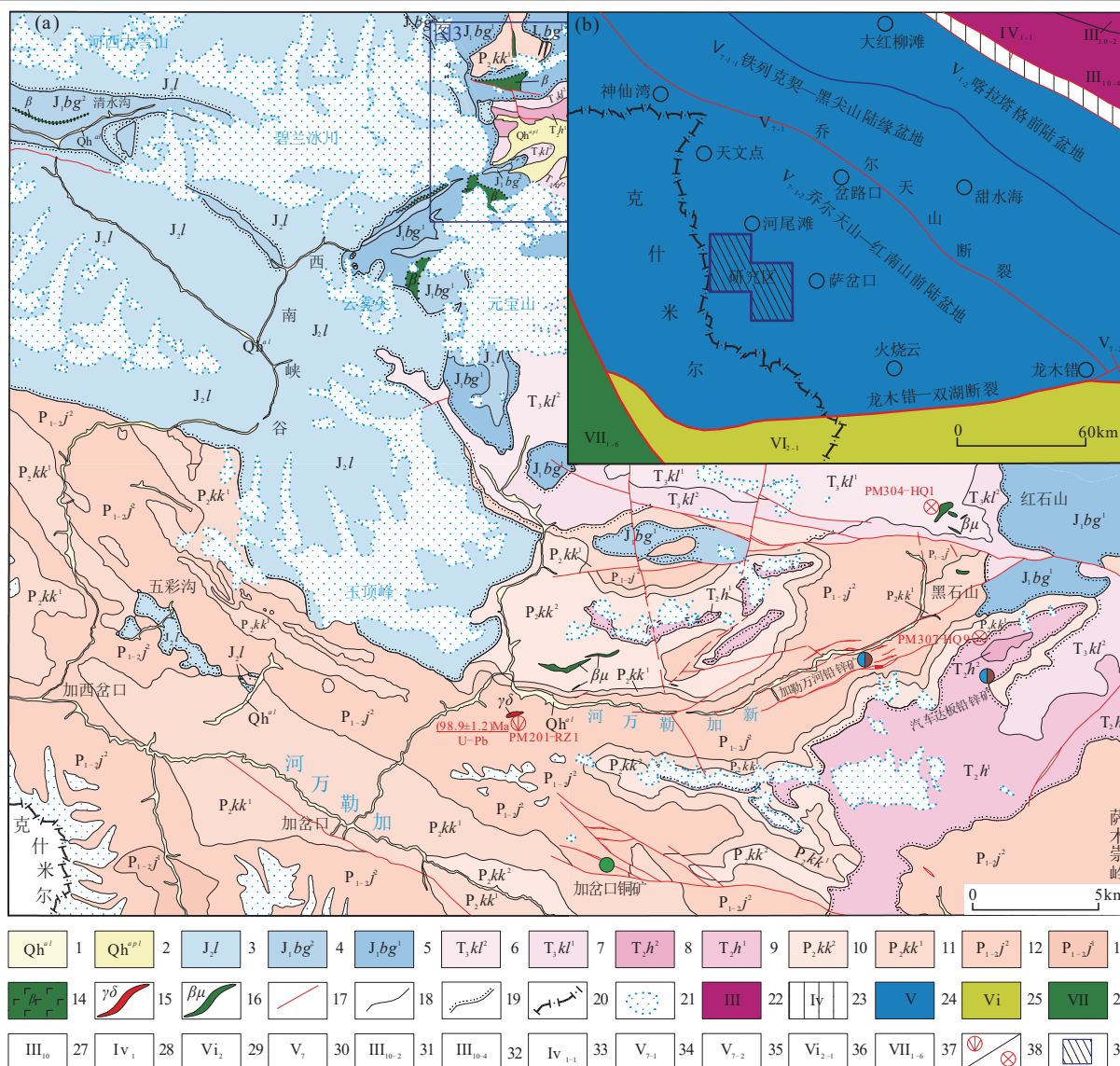


图2 喀喇昆仑加勒万河地区地质图(a)、大地构造分区图(b)(据范廷宾等, 2019)

1—第四系冲积; 2—第四系冲洪积; 3—龙山组; 4—巴工布兰莎组上段; 5—巴工布兰莎组下段; 6—克勒青河组上段; 7—克勒青河组下段; 8—河尾滩组上段; 9—河尾滩组下段; 10—空喀山口组上段; 11—空喀山口组下段; 12—加温达坂组上段; 13—加温达坂组下段; 14—玄武岩; 15—花岗闪长岩; 16—辉绿玢岩; 17—断层; 18—整合接触; 19—角度不整合接触; 20—国界线; 21—冰川; 22—Ⅲ秦祁昆造山系; 23—Ⅳ康西瓦—玛沁对接带; 24—Ⅴ羌塘—三江造山系; 25—Ⅵ班公湖—怒江结合带; 26—Ⅶ冈底斯—喜马拉雅造山系; 27—西昆仑湖盆系; 28—康西瓦—苏巴什结合带; 29—南羌塘增生弧盆系; 30—北羌塘—甜水海地块; 31—奥依塔格—塔木其岛弧带; 32—柳什塔格—上其汗岩浆弧带; 33—康西瓦结合带; 34—塔什库尔干—甜水海地块; 35—北羌塘地块; 36—多玛增生地块; 37—拉达克—冈底斯—下察隅岩浆弧带; 38—同位素样品/硅酸盐样品; 39—研究区

Fig.2 Geological map of the Galwan Valley area in Karakoram (a) and tectonic division map (b) (modified from Fan Tingbin et al., 2019)

1—Quaternary alluvial; 2—Quaternary alluvial proluvial; 3—Longshan Formation; 4—Upper member of Bagongbulansha Formation; 5—Lower member of Bagongbulansha Formation; 6—Upper member of Keleqinghe Formation; 7—Lower member of Keleqinghe Formation; 8—Upper member of Heweitai Formation; 9—Lower member of Heweitai Formation; 10—Upper member of Kongkashankou Formation; 11—Lower member of Kongkashankou Formation; 12—Upper member of Jiawendaban Formation; 13—Lower member of Jiawendaban Formation; 14—Basalt; 15—Granodiorite; 16—Diabase porphyrite; 17—Fault; 18—Conformal contact; 19—Angular unconformity contact; 20—Boundary; 21—Glacier; 22—Ⅲ Qinqikun orogenic system; 23—Ⅳ Kangxiwa—Maqin junction zone; 24—Ⅴ Qiangtang—Sanjiang orogenic system; 25—Ⅵ Bangong—Nujiang junction zone; 26—Ⅶ Gangdise—Himalayan orogenic system; 27—West Kunlun lacustrine system; 28—Kangxiwa—Subashi junction zone; 29—South Qiangtang accretionary arc basin system; 30—North Qiangtang—Tianshuihai block; 31—Oytag—Tamuqi island arc zone; 32—Liushitag—Shangqihan magmatic arc zone; 33—Kangxiwa junction zone; 34—Tashkergan—Tianshuihai block; 35—North Qiangtang block; 36—Duoma accretionary block; 37—Ladak—Gangdise—Xiachayu magmatic arc zone; 38—Isotopic samples/silicate samples; 39—Study area

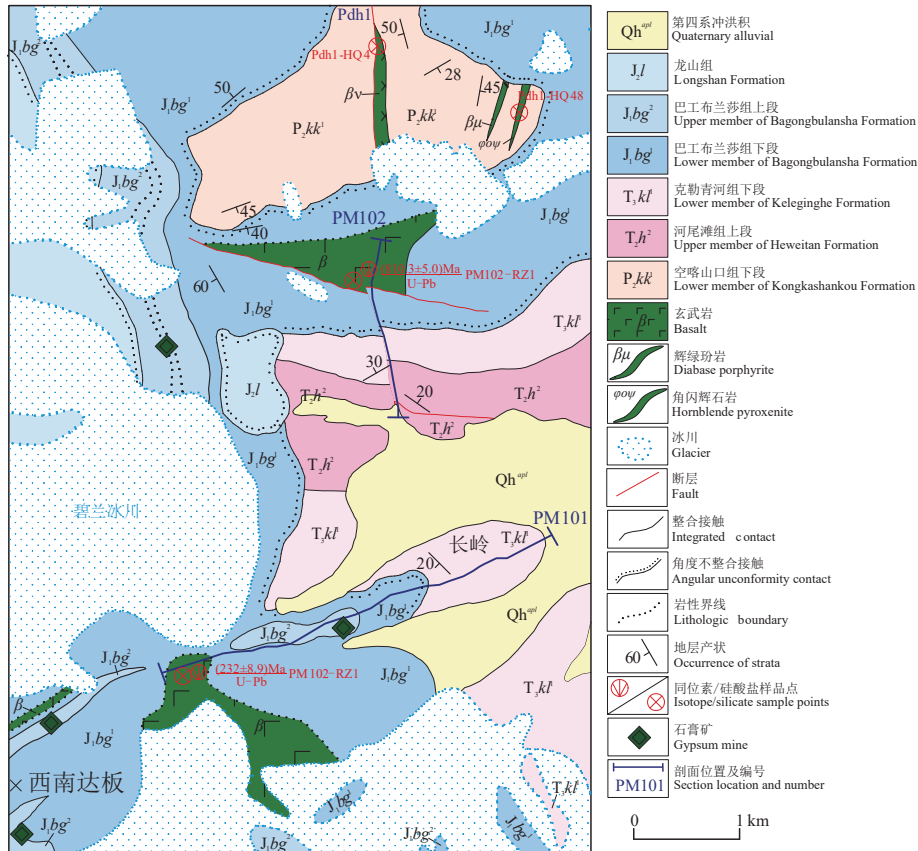


图 3 喀喇昆仑西南达坂一带地质图  
Fig.3 Geological map of southwest Daban area in Karakoram

“天然超深样”(赵越等, 2006; 郑建平等, 2008; 李奎奎等, 2018)。虽然加勒万河地区的闪长岩和玄武岩发生了风化或区域变质, 但都是浅变质作用, 熔融温度大于 900℃ 的锆石基本不受影响, 仍可以作为 U-Pb 的封闭系统, 锆石 U-Pb 同位素年龄依然具有参考价值。

5.1.1.1 玄武岩

阴极发光图像(图 5a、b)显示, 所分析的锆石颗粒晶形整体较好, 大部分晶体棱角分明、边界平直, 呈长柱状自形—半自形晶, 少数呈不规则状。所选测试锆石均发育岩浆韵律环带, PM101-RZ1-01 锆石呈长柱状, 环带呈扇形、面状构造。岩浆振荡环带较宽显示高温成因的特点, PM101-RZ1-06 锆石 CL 图像显示十分明亮, 推测应是后期锆石中 U、REE、Th 等微量元素含量变化所致, 其 U-Pb 同位素年龄谐和度也只有 86%, 所以其年龄值不做参考。其他大部分锆石的特征表明锆石为原生的岩浆锆石。

锆石粒度变化范围较大, 除 PM101-RZ1-01 达 220 μm, 其他锆石长轴基本在 50~120 μm, 长短轴比 1~4。长柱状锆石可能形成于偏基性高温的岩浆之中。从锆石的长短轴比值、形态特征、生长环带特征可以看出, PM101-RZ1 玄武岩中的锆石并不是同一生长环境下形成的, 而 PM102-RZ1 中的锆石形态相近, 具有同源的特征。PM101-RZ1 中 16 颗锆石的 Th 含量在  $50.2 \times 10^{-6} \sim 366 \times 10^{-6}$ , U 含量为  $251 \times 10^{-6} \sim 705 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.11~0.89(表 1); PM102-RZ1 中 20 颗锆石的 Th 含量在  $35.8 \times 10^{-6} \sim 279 \times 10^{-6}$ , U 含量为  $275 \times 10^{-6} \sim 969 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.12~0.48(表 1), 整体 Th/U 值较低。综合分析认为早侏罗世巴工布兰莎组中玄武岩的锆石为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。

PM101-RZ1 玄武岩锆石 U-Pb 同位素测年结果数据谐和性整体较好(图 6a), PM101-RZ1 的 16 颗锆石有 11 颗年龄值谐和度均大于等于 90%。PM101-RZ1-14、PM101-RZ1-16 这 2 颗锆石被打

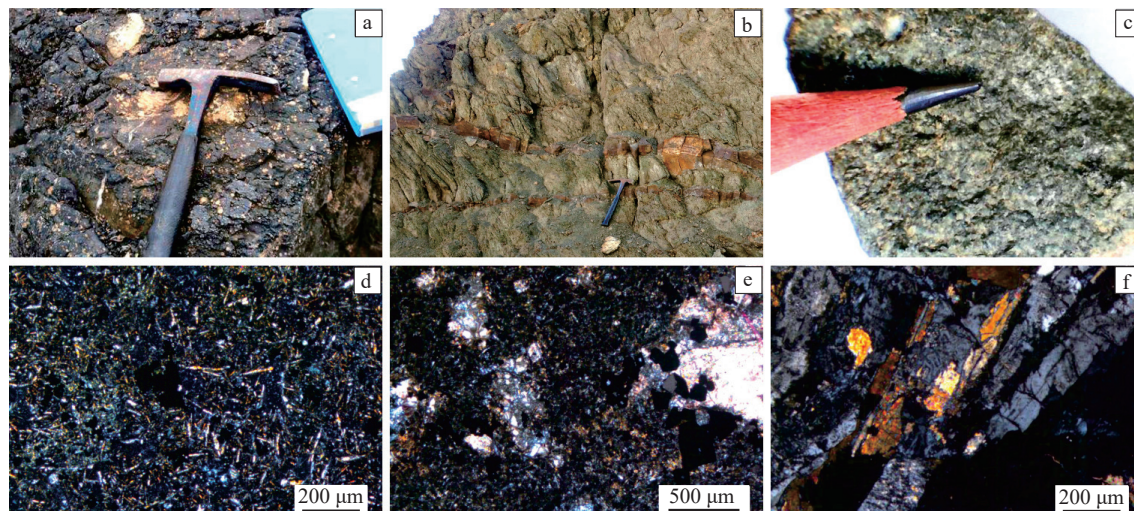


图4 加勒万河地区中—基性岩浆岩野外照片和显微照片

a—杏仁状玄武岩露头; b—气孔状玄武岩露头; c—闪长岩; d—PM101-RZ1 杏仁状玄武岩显微镜下照片; e—PM102-RZ1 气孔状玄武岩显微镜下照片; f—P201-RZ1 闪长岩显微镜下照片

Fig.4 Field photographs and microphotographs of intermediate–basic magmatic rocks in the Galwan River area

a—Amygdaloid basaltic outcrop; b—Vesicular basalt outcrop; c—Diorite; d—Microscopic photograph of PM101-RZ1 amygdaloid basaltic; e—Microscopic photograph of PM102-RZ1 vesicular basalt; f—Microscopic photograph of PM201-RZ1 diorite

穿; M101-RZ1-05、PM101-RZ1-06、PM101-RZ1-12 此 3 颗锆石年龄值谐和度低于 90%, 这 5 颗锆石年龄中不作为参考数据, 年龄数据详见表 1。11 个有效年龄值, 大致可以分为 4 个年龄组, 分别为 232 Ma、380 Ma、739~830 Ma、1931 Ma(图 6a)。其中 PM101-RZ1-15 号锆石年龄大于 1400 Ma, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄值。4 个年龄群组中, 739~830 Ma 的样品数达到 8 个, 谐和度都在 95% 以上, 6 个谐和度达 98%。

PM102-RZ1 样品的 20 颗锆石年龄值谐和度都在 96% 以上(图 6b)。PM102-RZ1 样品的 20 颗锆石年龄值更加集中, 除 PM102-RZ1-08、PM102-RZ1-15 两锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为 685 Ma、872 Ma, 其余 18 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄均在 793~826 Ma。793~826 Ma 年龄段的谐和年龄为  $(810.1 \pm 2.0)$  Ma,  $\text{MSWD} = 0.056$ ; 加权平均年龄为  $(810.3 \pm 5.0)$  Ma,  $\text{MSWD} = 1.4$ (图 6b)。

地层中火山岩夹层的就位时间与地层的形成时间基本一致。但火山岩中的继承锆石或捕获锆石的年龄一般老于火山岩的就位时间。西南达坂一带早侏罗世巴工布兰莎组( $J_1bg$ )的火山岩喷发或溢流时间为早侏罗世, 晚于最年轻锆石组 PM101-RZ-03 的结晶时间  $(232 \pm 9)$  Ma, 说明玄武岩

的这些锆石年龄是岩浆房的结晶年龄, 而非喷发年龄。

#### 5.1.2 闪长岩

PM201-RZ1 花岗闪长岩共挑选出 65 颗锆石, 阴极发光下多为棱角分明、边界平直的长柱状自形一半自形晶, 少数呈不规则状。挑选了 18 颗(图 5c)形态较好的锆石进行 U–Pb 同位素测年(表 1)。所选测试锆石均发育岩浆韵律环带, 4、6、18 锆石岩浆振荡环带较宽, 显示高温成因的特点, 14 号锆石最外层可见薄增生边, 以上特征表明锆石为原生的岩浆锆石。锆石长 50~120  $\mu\text{m}$ , 长短轴比值为 1~4; 4、5、6、15、18 号锆石长柱状显示中基性岩浆锆石的特点。从锆石的长短轴比值、形态以及生长环带特征可以看出, 这些锆石并不是同一环境下形成的, 应该是岩浆中的继承锆石或捕获锆石, 反映的是岩浆来源地深部地壳的特征和性质。

18 颗锆石的 Th 含量在  $22.3 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ , U 含量为  $212 \times 10^{-6} \sim 1983 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.03~0.82(表 1), 6 颗锆石的 Th/U 值大于 0.3, 锆石地球化学特征表明这些锆石主要为岩浆成因锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。

18 颗锆石的年龄数据谐和性整体较好, 16 颗谐和度大于等于 90%, 其中 11 颗锆石的年龄数据谐和度大于 96%, 4 颗锆石的年龄数据谐和度

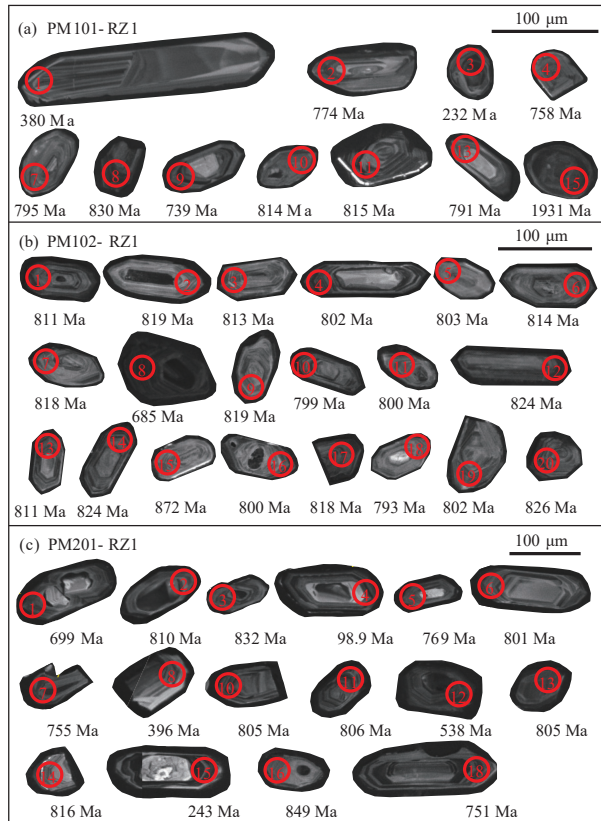


图 5 加勒万河地区玄武岩和闪长岩锆石阴极发光图像 (年龄大于 1000 Ma 的锆石采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄; 年龄小于 1000 Ma 的锆石采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄)

Fig.5 Zircon cathodoluminescence (CL) images of the basalts and diorites in the Galwan Valley area (The  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age is used to zircons older than 1000 Ma, and the  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age is used to zircons younger than 1000 Ma)

为 98%, 3 颗锆石的年龄数据谐和度为 99%。在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和图上(图 5c)(7、19 号谐和度低于 90%, 不做参考), 数据投点多位于谐和曲线上或其附近。18 颗锆石年龄变化范围特别大, 从新元古代一直跨越到中生代, 其中最老的一颗锆石 (PM201-RZ-16)  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为 849 Ma, 最年轻的年龄值为 98.9 Ma。16 个有效年龄数据大致分为 5 个年龄组, 分别为 98.9 Ma、243 Ma、396 Ma、538 Ma、751~849 Ma(图 6c)。其中 751~849 Ma 年龄组共 10 颗锆石, 而年龄峰值组 801~816 Ma 共计 6 颗锆石, 对此 6 个锆石的谐和年龄为  $(807.9\pm 3.9)$  Ma(图 6c), 加权平均年龄为  $(806.7\pm 7.6)$  Ma(图 6c),  $\text{MSWD}=0.29$ 。

PM201-RZ1 闪长岩侵入于下二叠统加温达坂组 ( $P_{1j}$ ) 深灰色粉砂岩, 约束其侵位时代为早二叠

世之后。锆石 U–Pb 同位素年龄只有 PM201-RZ-04、PM201-RZ-15 是晚于地层的形成时代。这两颗锆石形态都是长轴状, 长短轴比基本接近。PM201-RZ-15 内部结构较复杂, 可能受后期溶蚀作用, 使封闭的锆石中 U–Pb 系统被打开, 同位素时钟重启; 而 PM201-RZ-04 锆石形态完整, 韵律环带清晰, 晶体表面光洁明亮, 未发现有溶蚀或变质的特征, 年龄值谐和度达 96%。综合分析认为 PM201-RZ-04 锆石的 U–Pb 同位素年龄可靠, 对整个岩浆形成的时间具有最晚年龄的制约,  $(98.9\pm 1.2)$  Ma 可作为冰洞闪长岩的形成年龄。

冰洞闪长岩中锆石 U–Pb 年龄出现了 5 个频谱, 其中继承锆石的年龄频谱 243 Ma、396 Ma、538 Ma、751~849 Ma 共 4 个, 认为本测区在早白垩世以前  $(98.9\pm 1.2)$  Ma 至少发生了 5 次被记录的岩浆活动。751~849 Ma 新元古代锆石 U–Pb 同位素年龄峰值表明闪长岩熔融时将深部基底中的锆石裹挟进入岩浆并一同侵位到了浅地表。

### 5.1.3 源区讨论

加勒万河地区玄武岩以及闪长岩都携带了大量的 739~830 Ma 新元古代的继承锆石, 这不是一个偶然事件。西南达坂巴工布兰莎组玄武岩与冰洞加温达坂组闪长岩在空间上相隔约 40 km, 岩性差异大, 形成时代也存在一定的差异。两者同时携带了大量新元古代锆石, 充分指向和说明两者同源的一个事实, 源区即新元古代深部的老基底。

分别对 PM101-RZ1 中 11 颗、PM102-RZ1 中 20 颗、PM201-RZ1 中 16 颗测年锆石进行了稀土元素含量的测定, 测试结果见表 2。锆石稀土元素配分型式图(图 7)表明, 各样品中出现了主体样式和少量的不同稀土元素配分样式, 但可以发现加勒万河地区玄武岩、闪长岩中主体锆石(黑色线型)稀土元素配分样式基本一致; 表现为轻稀土含量低, 而重稀土含量较高, 明显的 La、Pr、Sm、Eu 亏损的“MW”型。加勒万河地区玄武岩、闪长岩主体原生锆石的稀土配分样式与 Greenland 西南部 Gothabsfjord 地区的中太古代 (GGU125540) 样品锆石稀土元素配分图基本一致 (Whitehouse and Kamber, 2002)。锆石 U–Pb 同位素年龄结合锆石稀土元素分配特征进一步说明玄武岩与闪长岩均有新元古代同一源区的物质来源。



表 1 加勒万河地区中基性岩锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 1 Zircon U-Pb isotopic results of the intermediate-basic rocks in Galwan Valley area

测点号	Pb/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	U/10 <sup>-6</sup>	Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						协和度
					<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	
PM201-RZ1 (闪长岩)																	
1	63.0	63.5	465	0.14	0.0704	0.0024	1.1109	0.0357	0.1145	0.0016	939	65.7	759	17.2	699	9.1	91%
2	64.8	294	359	0.82	0.0658	0.0018	1.2216	0.0342	0.1338	0.0017	1200	57.4	811	15.6	810	9.7	99%
3	53.0	84.0	320	0.26	0.0718	0.0022	1.3639	0.0403	0.1378	0.0018	989	61.4	874	17.3	832	10.4	95%
4	34.1	400	1983	0.20	0.0494	0.0018	0.1059	0.0041	0.0155	0.0002	169	87.0	102	3.8	98.9	1.2	96%
5	44.4	44.4	298	0.15	0.0739	0.0023	1.3005	0.0426	0.1268	0.0013	1039	63.0	846	18.8	769	7.6	90%
6	32.9	90.6	202	0.45	0.0662	0.0023	1.2094	0.0432	0.1322	0.0016	813	73.3	805	19.9	801	9.1	99%
7	54.3	97.1	360	0.27	0.0699	0.0021	1.2338	0.0373	0.1277	0.0014	928	61.1	816	17.0	775	8.0	94%
8	15.7	33.1	212	0.16	0.0617	0.0031	0.5353	0.0258	0.0634	0.0008	665	107	435	17.0	396	4.7	90%
10	51.4	63.7	338	0.19	0.0690	0.0019	1.2698	0.0362	0.1330	0.0016	900	63.1	832	16.2	805	9.0	96%
11	48.0	127	295	0.43	0.0675	0.0019	1.2471	0.0375	0.1332	0.0017	854	63.9	822	16.9	806	9.5	98%
12	37.3	232	330	0.70	0.0591	0.0021	0.7099	0.0256	0.0870	0.0012	572	77.8	545	15.2	538	7.2	98%
13	47.6	62.9	314	0.20	0.0671	0.0024	1.2379	0.0413	0.1331	0.0017	843	77.0	818	18.7	805	9.5	98%
14	49.5	212	288	0.74	0.0680	0.0020	1.2701	0.0371	0.1350	0.0019	878	60.3	832	16.6	816	10.5	98%
15	29.1	22.3	709	0.03	0.0514	0.0018	0.2737	0.0098	0.0385	0.0004	257	83.3	246	7.8	243	2.7	99%
16	33.9	61.6	213	0.29	0.0709	0.0024	1.3819	0.0474	0.1407	0.0017	955	74.2	881	20.2	849	9.6	96%
18	132	307	914	0.34	0.0671	0.0016	1.1507	0.0282	0.1236	0.0012	843	54.6	778	13.3	751	6.7	96%
PM101-RZ1 (辉石玄武岩)																	
1	28.9	96.1	409	0.24	0.0542	0.0024	0.4545	0.0206	0.0607	0.0009	389	100	380	14.4	380	5.3	99%
2	42.9	70.2	288	0.24	0.0652	0.0022	1.1556	0.0411	0.1276	0.0016	789	72.2	780	19.4	774	8.9	99%
3	26.7	366	582	0.63	0.0510	0.0022	0.2565	0.0110	0.0366	0.0005	239	72.2	232	8.9	232	3.3	99%
4	44.4	51.7	309	0.17	0.0646	0.0021	1.1147	0.0353	0.1247	0.0014	761	67.7	760	17.0	758	8.1	99%
7	47.7	50.2	298	0.17	0.0664	0.0022	1.2061	0.0388	0.1313	0.0014	817	70.4	803	17.9	795	8.1	98%
8	120	79.3	683	0.12	0.0614	0.0034	1.1885	0.0690	0.1375	0.0020	654	119	795	32.0	830	11.5	95%
9	97.3	75.7	705	0.11	0.0621	0.0019	1.0473	0.0314	0.1215	0.0013	680	64.8	728	15.6	739	7.3	98%
10	61.3	142	356	0.40	0.0696	0.0025	1.2954	0.0458	0.1346	0.0015	917	75.9	844	20.3	814	8.6	96%
11	58.9	192	334	0.57	0.0665	0.0020	1.2437	0.0372	0.1348	0.0015	833	60.2	821	16.8	815	8.5	99%
13	53.0	109	332	0.33	0.0660	0.0019	1.1978	0.0340	0.1306	0.0015	806	59.3	800	15.7	791	8.5	98%
15	112	224	251	0.89	0.1183	0.0029	5.0616	0.1288	0.3066	0.0037	1931	44.4	1830	21.6	1724	18.2	94%
PM102-RZ1 (辉石玄武岩)																	
1	63.8	48.2	403	0.12	0.0677	0.0020	1.2634	0.0364	0.1340	0.0016	861	61.1	829	16.3	811	8.9	97%
2	44.3	53.3	275	0.19	0.0658	0.0020	1.2378	0.0359	0.1356	0.0016	1200	59.1	818	16.3	819	9.0	99%
3	51.5	58.8	320	0.18	0.0679	0.0018	1.2710	0.0349	0.1344	0.0014	865	55.6	833	15.6	813	7.8	97%
4	97.8	131	617	0.21	0.0660	0.0017	1.2156	0.0311	0.1324	0.0013	806	53.7	808	14.2	802	7.3	99%
5	45.6	71.1	283	0.25	0.0674	0.0022	1.2370	0.0384	0.1326	0.0015	852	67.4	818	17.4	803	8.7	98%
6	56.6	53.1	364	0.15	0.0648	0.0018	1.2112	0.0345	0.1345	0.0015	769	59.3	806	15.8	814	8.4	99%
7	44.8	35.8	282	0.13	0.0692	0.0021	1.2964	0.0375	0.1354	0.0014	906	63.0	844	16.6	818	7.9	96%
8	101	274	720	0.38	0.0643	0.0015	1.0009	0.0234	0.1121	0.0011	750	48.9	704	11.9	685	6.2	97%
9	56.4	55.6	356	0.16	0.0663	0.0019	1.2446	0.0369	0.1354	0.0016	817	61.1	821	16.7	819	9.2	99%
10	94.0	99.7	612	0.16	0.0647	0.0017	1.1849	0.0330	0.1320	0.0016	765	55.6	794	15.3	799	9.0	99%
11	98.2	279	585	0.48	0.0636	0.0017	1.1630	0.0315	0.1322	0.0016	728	25.0	783	14.8	800	8.9	97%
12	151	131	969	0.13	0.0644	0.0015	1.2190	0.0303	0.1363	0.0015	754	249.1	809	13.9	824	8.3	98%
13	61.8	76.0	387	0.20	0.0655	0.0019	1.2181	0.0360	0.1340	0.0017	791	59.3	809	16.5	811	9.4	99%
14	70.4	57.7	449	0.13	0.0659	0.0018	1.2471	0.0354	0.1364	0.0018	806	57.4	822	16.0	824	10.1	99%
15	50.2	47.9	296	0.16	0.0707	0.0021	1.4306	0.0479	0.1449	0.0022	950	61.1	902	20.0	872	12.5	96%
16	65.1	51.4	427	0.12	0.0637	0.0019	1.1719	0.0363	0.1322	0.0015	731	64.8	788	17.0	800	8.4	98%
17	61.9	67.8	396	0.17	0.0638	0.0018	1.2019	0.0354	0.1353	0.0016	744	59.3	801	16.4	818	9.0	97%
18	51.0	71.7	330	0.22	0.0672	0.0019	1.2224	0.0356	0.1309	0.0014	843	59.3	811	16.3	793	7.9	97%
19	46.2	43.1	307	0.14	0.0650	0.0019	1.1959	0.0344	0.1325	0.0014	776	56.5	799	15.9	802	8.1	99%
20	67.6	110	422	0.26	0.0634	0.0018	1.2037	0.0340	0.1367	0.0016	720	63.9	802	15.7	826	9.1	97%

5.2 岩石地球化学特征

加勒万河地区 7 件中基性岩主量与微量元素分析结果见表 3。

5.2.1 主量元素特征

PM201-RZ1 闪长岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 51.91%，属中性岩类，ALK 为 5.01，K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 0.36，贫钾；

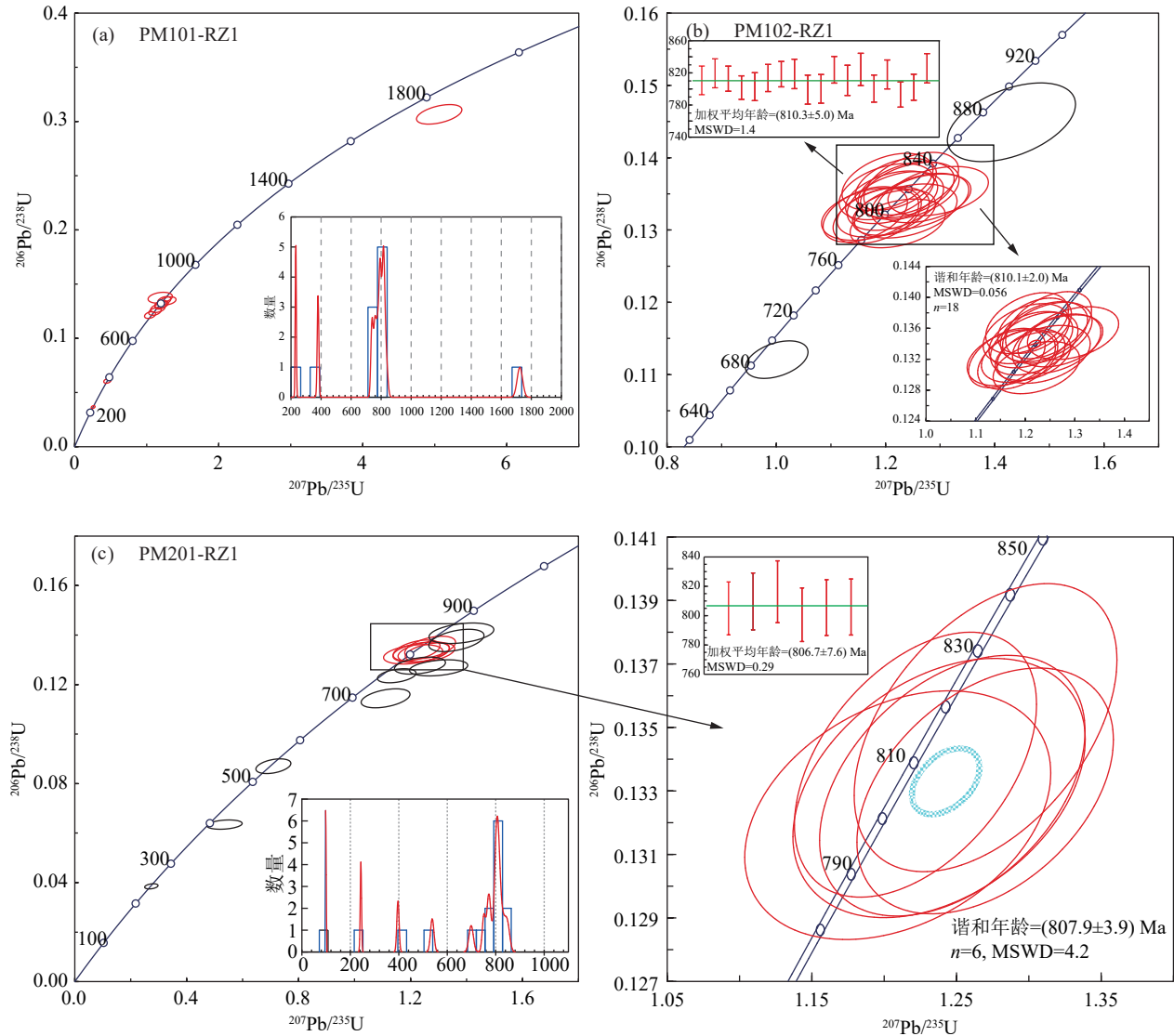


图 6 加勒万河地区中基性岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.6 Zircons U-Pb concordia diagrams of the intermediate-basic rock in the Galwan Valley area

A/CNK 为 0.92, 小于 1, 为亚铝质; PM201-RZ1 中 CIPW 标准矿物基本不含 C、Q 分子, 分异指数(DI) 为 42.68, 按吴利仁(1963)划分属于富铁质超基性岩。里特曼指数为 1.99, 属于亚碱性系列。综合上述, PM201-RZ1 闪长岩具高铝、铁、镁、钙, 低钾、钠、钛、磷的特征。在闪长岩 TAS 图解(图 8b)中, 落在辉长闪长岩中, 在 AR-SiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 与 SiO-K<sub>2</sub>O 图解中(图 9)显示属钙碱性系列。

PM101-RZ1、PM102-RZ1 玄武岩 SiO<sub>2</sub> 分别为 40.44%、44.15%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分别为 11.46%、13.53%, 属基性—超基性; Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量为 4.19%、5.07%; K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 0.08、0.61, 变化范围较大, 低钾。在

TAS 图解中(图 8a), 均落在碱玄武岩/碧玄武岩区。杏仁状辉石玄武岩 PM101-RZ1 里特曼指数为 1.5, 小于 3.3, 属钙碱性岩石; 气孔状玄武岩 PM102-RZ1 里特曼指数为 17.84, 大于 9, 属过碱性岩石。固结指数 SI 值中等, 分别为 23.01、28.65; 分异指数 DI 低, 分别为 31.45、37.56, 反映出岩浆结晶分异程度低。

基性岩脉 Pdh1-HQ4、Pdh1-HQ48、PM304-HQ1、PM307-HQ9 镜鉴岩性分别为辉绿辉长岩、角闪辉石岩、辉绿岩、辉绿辉长岩。主量元素含量特征基本一致, SiO<sub>2</sub> 含量基本在 45% 以下, 均为基性岩。分异指数(DI) 分别为 31.52、32.57、28.86、

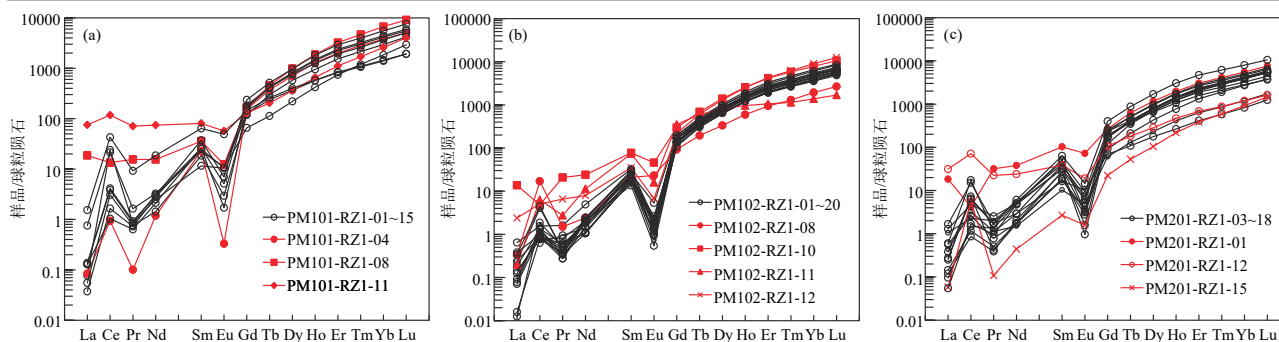


图7 加勒万河地区中基性岩样品锆石稀土元素配分型式图

a—PM101-RZ1 辉石玄武岩; b—PM102-RZ1 杏仁状辉石玄武岩; c—PM201-RZ1 闪长岩

Fig.7 Zircon REE patterns of the intermediate-basic rocks in the Galwan Valley area

a-Basalt of sample PM101-RZ1; b-Basalt of sample PM102-RZ1; c-Diorite of sample PM201-RZ1

53.87; 除 PM307-HQ9 分异程度较高以外, 其余 3 条岩脉的分异程度很低, 甚至低于早侏罗世玄武岩的分异程度。

### 5.2.2 微量元素特征

闪长岩微量元素含量见表 3, 其不相容元素 Rb、K、Ba、Th 强富集, 高场强元素 Nb、Zr、Hf 弱富集, Ta 具一定亏损。轻稀土、重稀土均基本不亏损, 总体接近 MORB。

玄武岩微量元素含量及特征参数见表 2。玄武岩微量元素含量与基性岩维氏值相比, 一般高于其维氏值的元素主要有 Zn、Nb、Ta、Hf, 尤其是大离子亲石元素 Hf, 其平均含量高于维氏值 4~5 倍, 呈较强烈的富集趋势; 一般低于维氏值的元素有 Rb、Ba、Sr、Ni、Co、Cs, 尤其是大离子亲石元素 Rb 其平均含量低于维氏值 5~10 倍, 其他元素 Ga、V、Cr 变化规律不明显。Sr 的负异常结合烧失量较高的情况, 认为 Sr 负异常可能是由样品处于地表经过蚀变而造成的。与上、下地壳元素相比 (Wedepohl, 1995), 其大离子亲石元素 Rb、Ba、Cs 低于上、下地壳丰度, Nb、Ta、Hf 高于上、下地壳丰度; 相容元素中 Cr、Co、Ni、V 元素含量多高于上、下地壳元素含量。微量元素中亲幔源元素 (Cr、Co、Ni、V) 含量明显偏高。

### 5.2.3 稀土元素

闪长岩稀土元素含量见表 2。可以看出闪长岩具有较低含量的  $\Sigma\text{REE}$ 、 $\Sigma\text{LREE}$ 、 $\text{LREE}/\text{HREE}$ , 其稀土总量  $\Sigma\text{REE}$  为  $110.41 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为 5.40, 轻稀土富集不明显;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 5.35, 轻重稀土略有分馏;  $\delta\text{Eu}=1$ , Eu 无亏损; 在球粒陨石标准化

配分型式图 (图 10a) 上, 呈右倾曲线。稀土元素球粒陨石标准化配分型式图呈左陡右缓的趋势, 说明轻稀土富集重稀土相对亏损, 且轻稀土分异强度大于重稀土。

玄武岩 PM101-RZ1、PM102-RZ1 的  $\Sigma\text{REE}$  分别为  $790.08 \times 10^{-6}$ 、 $851.31 \times 10^{-6}$ , 总量较高, 同时显示轻稀土富集重稀土相对亏损的右倾样式;  $\text{LREE}/\text{HREE}=10.17\sim 12.95$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 16.58~25.38 都显示玄武岩发生强烈的轻重稀土分馏的过程, 属于轻稀土富集型 (图 10a)。 $\delta\text{Eu}=0.91\sim 1.11$ , 铕无明显亏损, 表明岩浆可能没有经历明显的分离结晶作用。 $\delta\text{Ce}=0.98\sim 1.06$ , 显示为弱负 Ce 异常, 说明岩石受低温蚀变作用的影响较弱。

## 6 讨论

### 6.1 北羌塘地体岩浆活动历史: 继承锆石记录

西昆仑造山带经历了多期次的构造-岩浆演化阶段 (毕华等, 1999; 张传林等, 2007, 2019), 加勒万河地区做的岩浆锆石、碎屑锆石均有反映。将闪长岩与玄武岩 3 个岩石样品共 47 个有效 (谐和度 > 90%) 锆石 U-Pb 年龄进行频率统计, 结果呈现约 6 个年龄组 (图 11), 由老至新分别是 1724 Ma、685~872 Ma、538 Ma、380~396 Ma、243 Ma、98.9 Ma。因此, 闪长岩与玄武岩 3 个岩石样品共记录了区域内的 6 次岩浆活动。

目前甜水海地块中记录的最古老的锆石 U-Pb 年龄为在西段古元古界布伦阔勒岩群中片理化变流纹岩的单颗粒锆石, 年龄为  $(2481 \pm 14)\text{Ma}$  (计文化等, 2011), 研究区南屏山—俘虏沟一带出露较



表 3 加勒万河地区中基性岩主量元素 (%) 和微量元素含量 ( $10^{-6}$ )

Table 3 Whole-rock major (%) and trace ( $10^{-6}$ ) elements data of intermediate-basic rocks in the Galwan Valley area							
样品号	PM101-RZ1	PM102-RZ1	PM201-RZ1	PM307-HQ9	Pdh1-HQ4	Pdh1-HQ48	PM304-HQ1
岩性	辉石玄武岩	气孔状辉石玄武岩	闪长岩	辉绿辉长岩	辉绿辉长岩	角闪辉石岩	辉绿岩
SiO <sub>2</sub>	38.59	40.80	51.91	45.16	37.82	38.62	39.13
TiO <sub>2</sub>	4.55	4.77	0.99	3.02	5.85	5.63	6.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.50	10.70	14.42	15.53	12.65	12.48	9.63
FeO	6.56	7.04	7.29	7.22	7.85	8.43	11.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.87	8.27	2.50	3.10	6.03	8.27	2.77
MnO	0.18	0.17	0.16	0.19	0.18	0.19	0.20
MgO	6.17	6.09	6.63	3.02	7.09	6.73	8.85
CaO	8.85	8.53	4.74	6.20	9.29	8.65	7.39
K <sub>2</sub> O	0.97	0.33	1.23	0.43	1.48	1.36	1.53
Na <sub>2</sub> O	3.68	3.86	3.45	5.53	2.44	3.44	2.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.73	1.87	0.13	1.34	2.86	1.12	1.49
LOI	6.77	5.52	4.10	6.69	4.75	3.86	4.35
H <sub>2</sub> O	1.56	1.03	0.35	0.16	0.58	0.36	0.77
Total	99.98	98.97	97.89	97.59	98.84	99.15	96.01
A/NK	1.60	2.06	1.48	1.63	2.26	1.75	1.94
A/CNK	0.48	0.92	0.45	0.75	0.56	0.55	0.52
Cr	6.89	2.68	222.5	6.56	1.79	44.99	17.73
Ni	26.05	17.29	50.46	7.91	27.72	31.75	21.97
Rb	29.12	9.33	41	14.44	81.78	47.41	53.41
Ba	447.6	152.0	575.3	2102	1707	1169	1138
Th	19.95	17.85	6.1	7.26	5.17	4.89	4.77
Nb	152.8	149.7	11.8	79.9	57.14	52.06	61.27
K	8000	2700	10200	3600	12200	11200	12700
Ta	9.71	9.78	1.09	6.3	4.67	4.41	4.11
Pr	39.72	43.55	5.13	25.17	25.06	18.06	18.46
Sr	764.7	726.8	323.4	374.6	498.6	471.0	1050
Nd	152.4	167.3	20.47	102.2	111	77.69	78.62
Zr	993.8	964.5	184.5	434.3	307.6	306.5	269.4
Hf	21.31	21.73	5.22	10.19	8.87	8.73	6.75
Sm	26.1	28.92	4.43	17.35	20.93	14.59	14.78
Eu	7.48	8.37	1.43	6.39	7.16	4.96	5.02
Ti	28277	30204	5642	18111	35327	34052	37470
Gd	23.26	25.43	4.15	15.49	17.44	11.95	12.41
Tb	3.13	3.39	0.77	2.13	2.47	1.77	1.74
Dy	14.42	15.62	4.95	9.72	11.49	8.55	8.49
Y	60.13	62.27	24.44	40.01	45.32	33.89	34.5
Ho	2.46	2.67	0.97	1.65	1.93	1.44	1.45
Er	6.98	7.34	2.81	4.71	5.06	3.86	3.63
Tm	0.83	0.82	0.42	0.56	0.57	0.46	0.44
Yb	4.92	5.01	2.77	3.24	3.38	2.81	2.51
Lu	0.73	0.73	0.42	0.46	0.49	0.41	0.36
P	7583	8366	546.4	5987	12519	4931	6500
Li	40.52	47.86	49.87	44.02	82.2	43.97	148.2
Cs	7.08	0.47	8.68	0.92	99.85	6.02	37.14
V	127.0	125.2	131.7	118.2	157.1	175.0	137.8
La	168.3	177.1	20.65	89.74	78.12	61.44	60.04
Ce	339.4	365.1	41.04	205.6	193.3	134.5	127.7
Co	43.26	36.88	36.86	17.03	46.12	49.12	47.28
ΣREE	790.1	851.3	110.4	484.4	478.4	342.5	335.7
LREE	733.4	790.3	93.16	446.4	435.6	311.2	304.6
HREE	56.73	61.01	17.25	37.96	42.83	31.25	31.03
LREE/HREE	12.93	12.95	5.4	11.76	10.17	9.96	9.82
(La/Yb) <sub>N</sub>	24.53	25.38	5.35	19.88	16.58	15.68	17.16
DI	35.54	37.56	44.18	53.87	31.52	32.57	28.86
δEu	0.91	0.92	1	1.19	1.15	1.15	1.1

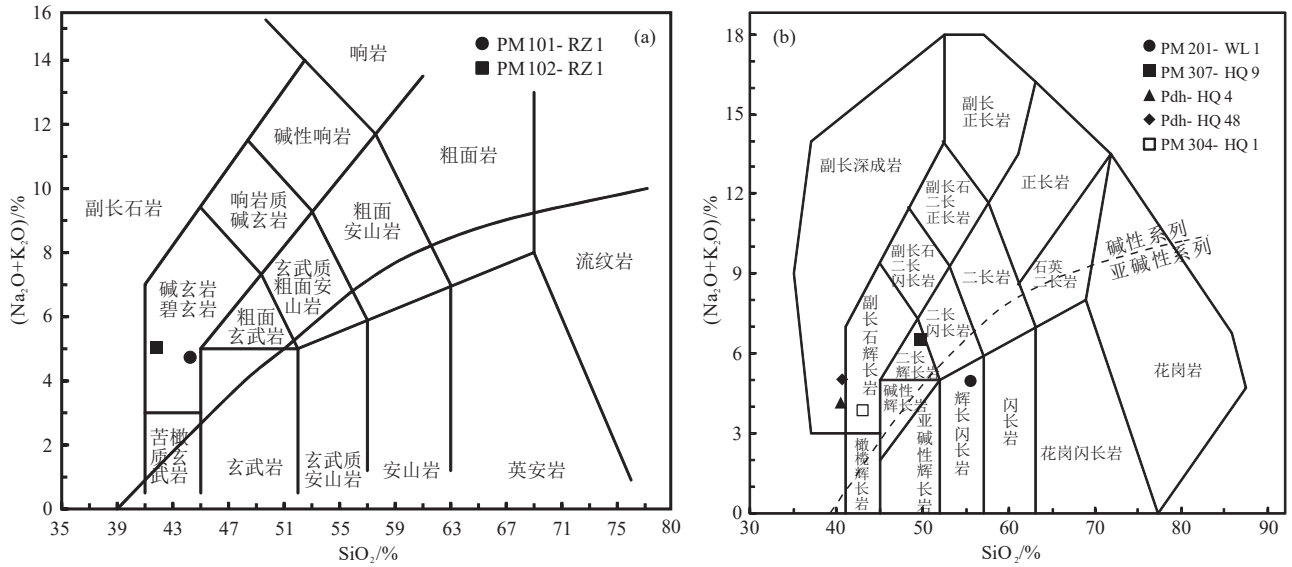


图 8 玄武岩 TAS 分类图(a, 据 Le Maitre, 1989)和中基性侵入岩 TAS 分类图(b, 据 Middlemost, 1994)

Fig. 8 TAS diagram of basalt (a, after Le Maitre, 1989); TAS diagram of intermediate-mafic intrusions (b, after Middlemost, 1994)

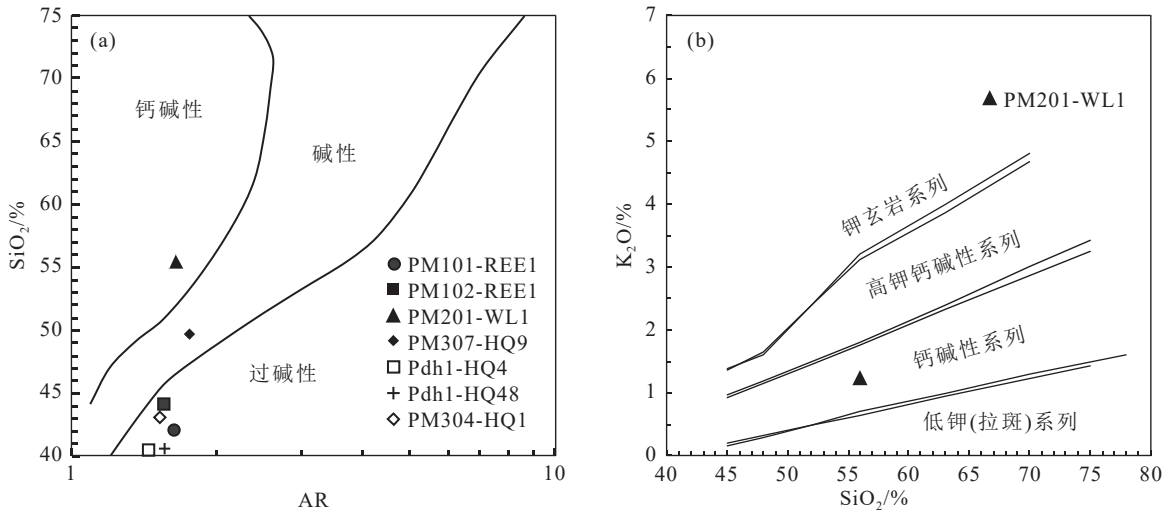


图 9 AR-SiO<sub>2</sub> 图解(a, 据 Maniar and Piccoli, 1989)和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 9 AR-SiO<sub>2</sub> diagram (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

峰值时间与晋宁运动一致,而此时正在发生 Rodinia 超大陆的裂解事件(郝杰和翟明国, 2004)。全球范围内剧烈的板块运动也伴随着活跃的岩浆活动,来自地幔熔融的玄武质岩浆上涌底侵至下地壳,发生壳幔混合作用并形成北羌塘地体的古老基底。

近年从甜水海地块古元古界布伦阔勒岩群解体出了一套寒武纪火山-沉积岩系(张传林等, 2007; 张辉善等, 2020),主要岩性为中基性火山岩,夹少量酸性火山岩和沉积岩。张辉善等(2020)认为可能

存在早寒武世和中晚寒武世两期火山岩浆事件,其可能反映的是特提斯麻扎-康西瓦洋向南俯冲形成寒武纪岩浆弧带。PM201-RZ1-12 号锆石年龄为 538 Ma 正是记录了早寒武世的岩浆活动。

震旦纪开始喀喇昆仑北羌塘进入了原特提斯演化阶段,库地蛇绿岩带中的枕状熔岩标志着原特提斯洋壳的成熟(邓万明, 1989)。原特提斯洋在奥陶纪晚期消亡的过程中伴随着两侧大陆发生加里东期碰撞造山作用,至泥盆系原特提斯消亡,昆

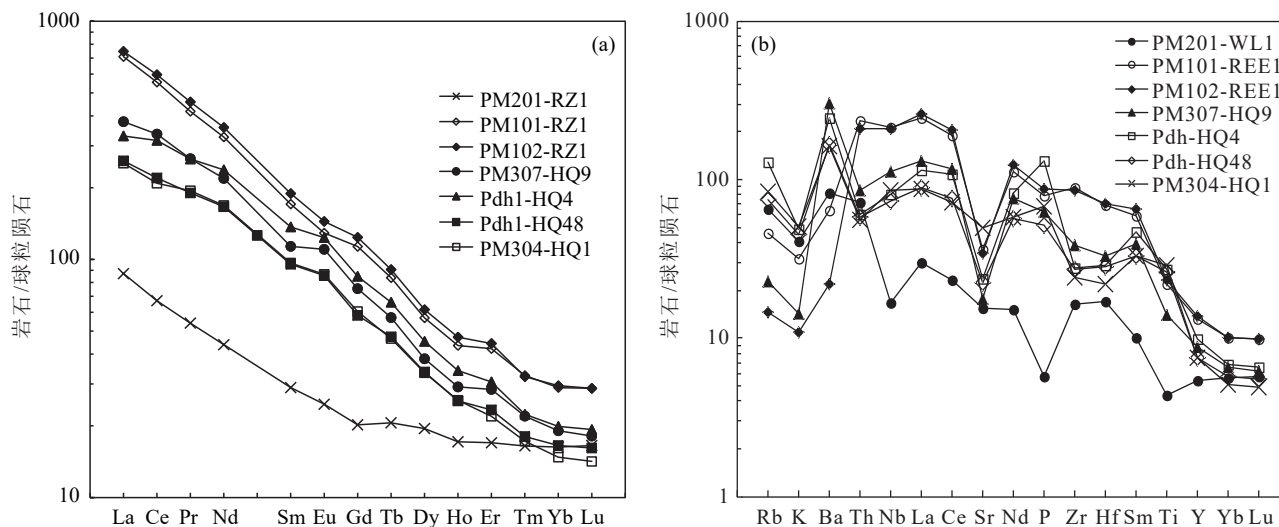


图 10 加勒万河地区中基性岩球粒陨石标准化稀土配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Chondrite normalized REE diagram (a) and primitive-mantle normalized trace elements diagram(b) of the intermediate-basic rocks in the Galwan Valley area (chondrite normalized and primitive-mantle normalized values after Sun and McDonough, 1989)

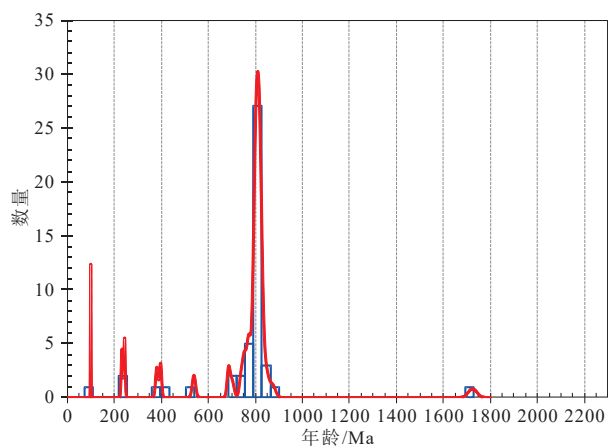


图 11 加勒万河地区玄武岩、闪长岩锆石 U-Pb 同位素年龄频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram of zircon U-Pb isotopic ages of basalts and diorites in the Galwan Valley area

整体处于一个相对稳定的沉积环境(潘裕生和方爱民, 2010)。闪长岩与玄武岩记录的 380 Ma 与 396 Ma 可能为一次小规模的内陆岩浆活动。

石炭纪时期大陆裂解, 进入了古特提斯洋演化, 羌塘地体处于多岛弧盆系的演化阶段。晚石炭世至早二叠世冈瓦纳大陆发生大陆极地冰川事件, 冈底斯的拉嘎组、南羌塘的曲地组均有来自南大陆冰川漂砾的记录, 而本区的加温达坂组未出现这一现象。二叠纪古特提斯洋已经开始快速向南、北两

侧消减收缩。二叠纪晚期, 古特提斯停止了扩张, 扩张洋脊已死亡, 古特提斯中的陆壳岛链与两侧大陆最终发生碰撞, 使羌塘、可可西里与昆仑山拼合到一起, 成为亚州大陆新的一部分(潘裕生和方爱民, 2010)。至中三叠世, 加勒万河区域接受古特提斯残留洋盆的沉积。区内汽车达坂一带见中三叠世河尾滩组覆盖于中二叠世空喀山口组之上, 底部为复成分砾岩, 随后出现一层厚约 11 m 的熔岩。PM201-RZ1-15 的 243 Ma 同位素年龄可能为该时期的岩浆活动记录(张宇等, 2023)。

晚三叠世新特提斯洋开始形成, 侏罗纪时期继续扩张, 期间印支运动使得本区的早侏罗世巴工布兰莎组不整合于晚三叠世克勒清河组之上。早侏罗世新特提斯洋壳已经开始形成, 但根据资料显示班怒带具有新特提斯洋蛇绿岩套与龙木错双湖结合带在三叠纪已经闭合的事实, 认为甜水海地区在新特提斯洋时期处于无成熟洋壳的弧后盆地沉积构造环境。喀喇昆仑地区巴工布兰莎组发育一套海相裂隙-中心式喷发的玄武岩-安山岩-英安岩组合火山岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。笔者在河尾滩西南达坂-碧兰冰川一带采集的 2 件玄武岩样品均为该时期的产物。在加勒万河北东侧多宝山一带的巴工布兰莎组双峰式火山岩中

的流纹岩获得锆石 U-Pb 同位素年龄为(195.5±1.1) Ma(周能武等, 2019)。早—中侏罗世海水下渗萃取了 Pb、Zn 元素, 矿质流体受岩浆热液驱动下由断裂构造上涌至近地表并成矿, 形成诸如火烧云、多宝山、甜水海以及研究区的加勒万河等铅锌矿床。

晚侏罗世后新特提斯洋开始消减, 班怒洋启动闭合, 洋壳俯冲并伴随碰撞造山, 甜水海地块抬升为陆。随着南大陆持续的向北俯冲, 地壳增厚, 温度上升并发生熔融, 在龙木错南侧龙角错一带侵位形成花岗岩条带, 在芒错岩体获得白云母二长花岗岩中白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄为(101.01±1.13)Ma(安徽省地质调查院, 2005<sup>①</sup>)。与加勒万河晚白垩世花岗岩(98.9±1.2)Ma 的年龄值基本一致。

玄武岩、闪长岩中携带多个时期的继承锆石反映了区域多期次的岩浆-构造活动。6 个锆石 U-Pb 同位素年龄频谱反映的是由老至新 1724 Ma、685~872 Ma、538 Ma、380~396 Ma、243 Ma、98.9 Ma 6 个阶段的岩浆构造演化。其对应的分别是中元古代结晶基底、Rodinia 超大陆的裂解、寒武纪麻扎—康西瓦洋俯冲、泥盆纪板内岩浆活动、中三叠世河尾滩组岩浆活动、新特提斯洋闭合碰撞造山等 6 个期次的构造岩浆活动。

## 6.2 早侏罗世和晚白垩世岩浆活动的性质

### 6.2.1 加勒万河晚白垩世闪长岩钙碱性岩石系列, 可能与班怒洋汇聚俯冲有关?

加勒万河晚白垩世闪长岩, 岩石类型为辉石闪长岩; 在 Hf/3-Th-Ta 图中(图 12b), 落入板边岛弧玄武岩区; 而 Th/Yb-Ta/Yb 图解(图 12a)上, 则落在大陆边缘玄武岩区。喀喇昆仑缺失晚侏罗、早白垩世地层是由于受到班怒洋的俯冲消亡并碰撞造山的结果, 该时期喀喇昆仑被抬升为陆地并接受风化剥蚀。晚白垩世随着印度板块持续的向北挤压, 北羌塘南侧为被动破坏性板块边缘。挤压造山造成陆壳叠覆增厚, 深部发生熔融, 形成钙碱系列岩浆。班怒带碰撞造山在本区域的岩浆活动反应主要在龙木错南部一带, 侵位了较大面积的花岗岩类岩体。通过<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法定年的年龄值(安徽省地质调查院, 2005)与班怒带碰撞造山的时间吻合, 所以综合分析认为加勒万河晚白垩世钙碱性闪长岩是班怒带汇聚碰撞造山, 壳幔混合的远端反应。

### 6.2.2 玄武岩碱性拉斑系列, 岩浆可能没有经历明显的分离结晶作用

对西南达坂—碧兰冰川一带的玄武岩 PM101-RZ1 与 PM102-RZ1 进行构造环境判别分析。在 Th/Yb-

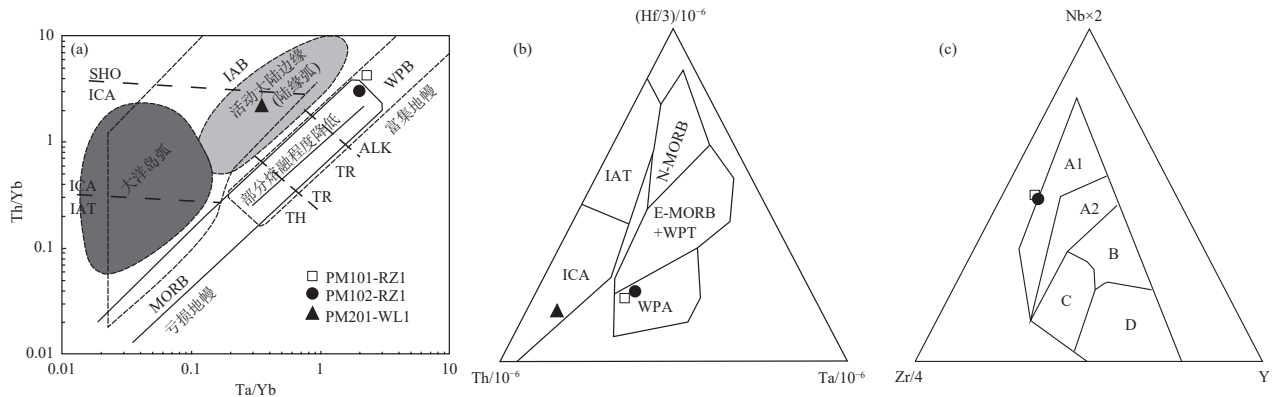


图 12 加勒万河地区玄武岩、闪长岩构造环境判别图

a—Th/Yb-Ta/Yb 图解(据 Pearce, 1982); b—Hf/3-Th-Ta 图解(据 Wood, 1980); c—2Nb-Zr/4-Y 图解(据 Meschede, 1986) WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; TH—拉斑系列; TR—过渡系列; ALK—碱性系列; IAT—岛弧拉斑系列; ICA—岛弧钙碱性系列; SHO—岛弧橄榄玄武岩系列; N-MORB—N 型洋脊玄武岩; E-MORB—E 型洋脊玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩; A1+A2—板内碱性玄武岩; A2+C—板内拉斑玄武岩; B—P 型洋中脊玄武岩; D—N 型洋中脊玄武岩; C+D—火山弧玄武岩

Fig.12 Tectonic setting discrimination diagrams of basalts and diorites in the Galwan Valley area

a—Th/Yb-Ta/Yb diagram (after Pearce, 1982); b—Hf/3-Th-Ta diagram (after Wood, 1979); c—Nb×2-Zr/4-Y diagram (after Meschede, 1986) WPB—Within plate basalt; MORB—Mid-oceanic ridge basalt; IAB—Island arc basalt; TH—Tholeiitic series; TR—Transitional series; ALK—Alkaline series; IAT—Island arc tholeiitic series; ICA—Island arc calc-alkaline series; SHO—Island arc shoshonite series; N-MORB—N-type mid-oceanic ridge basalt; E—E-type mid-oceanic ridge basalt; WPT—Within plate tholeiite; WPA—Within plate calc-alkaline basalt; A1+A2—Within-plate alkaline basalt; A2+C—Within-plate tholeiite; B—P-type mid-ocean ridge basalt; D—N-type mid-oceanic ridge basalt; C+D—Volcanic arc basalt



Ta/Yb 图解(图 12a)上, PM101-RZ1 与 PM102-RZ1 分别落在板内玄武岩与碱性玄武岩区。在 Hf/3-Th-Ta 图解(图 12b)上, 均落在板内碱性玄武岩区。在 Nb×2-Zr/4-Y 图解(图 12c)上, 两样品落在板内碱性玄武岩区边缘。

加勒万河北侧河尾滩断裂以北的团结峰—兴山—岔路口一带火山岩较为发育。菅坤坤等(2019)认为团结峰龙山组玄武岩来源于陆壳基底的初始洋盆。而周能武等(2019)认为多宝山巴工布兰莎组中的双峰式火山岩形成于无洋壳的弧后盆地环境。团结峰玄武岩的稀土配分图为近于平躺的 E-MORB 型(菅坤坤等, 2019); 而多宝山(火烧云北)玄武岩与英安岩的稀土配分图为似 OIB 型, 英安岩出现明显的 Eu 中等负异常(周能武等, 2019)。而本次西南达坂—碧兰冰川的巴工布兰莎组碱性拉斑玄武岩稀土配分模式呈高角度的右倾轻稀土富集 OIB 型, 且无 Eu 异常。结合野外没有发现其他类型火山岩, 同时玄武岩中携带大量的继承锆石的事实, 综合分析认为西南达坂—碧兰冰川一带巴工布兰莎组玄武岩为一套未经分离结晶的海相裂隙—中心式喷发火山岩。造成这三处火山岩中锆石组成、岩石地球化学性质的差别, 可能是三者离壳幔混合岩浆通道的时空距离不一致, 进而使得岩浆混合和分异的程度不一。西南达坂—碧兰冰川的巴工布兰莎组玄武岩是未经分离结晶的近火山通道快速溢流冷却的产物。

## 7 结 论

(1) 加勒万河地区西南达坂巴工布兰莎组杏仁状辉石玄武岩据碱性拉斑 OIB 玄武岩性质, 为未经分离结晶快速溢流冷却的产物, 岩浆成因环境为弧后盆地。玄武岩中含有约 4 个阶段的继承或原生锆石, 最年轻的锆石 U-Pb 同位素年龄为  $(232 \pm 9)$  Ma, 可能代表玄武岩岩浆房的结晶年龄。加勒万河晚白垩世花岗闪长岩中携带约 5 个时代的继承锆石或原生锆石, 最年轻的锆石 U-Pb 同位素年龄为  $(98.9 \pm 1.2)$  Ma, 为岩浆成因的原生锆石。闪长岩是壳幔混合、地壳增厚的产物, 是新特提斯洋闭合碰撞造山远端反映。

(2) 加勒万河地区的玄武岩、闪长岩及中基性岩脉具有极为相似的 OIB 轻稀土富集型稀土元素

配分模式; 玄武岩、闪长岩中携带最多的锆石均为新元古代岩浆锆石, 且锆石具有与 Gothabsfjord 地区中太古代(GGU125540)样品锆石相一致的稀土元素分配样式, 说明玄武岩、闪长岩均来源于新元古代基底物质的熔融。

(3) 玄武岩、闪长岩中携带多个时期的继承锆石反映了区域多期次的岩浆—构造活动。6 个锆石 U-Pb 同位素年龄频谱反映的是由老至新 1724 Ma、685~872 Ma、538 Ma、380~396 Ma、243 Ma、98.9 Ma 6 个阶段的岩浆构造演化, 分别对应中元古代结晶基底、Rodinia 超大陆的裂解、寒武纪麻扎—康西瓦洋俯冲、泥盆纪板内岩浆活动、中三叠世河尾滩组岩浆活动、新特提斯洋闭合碰撞造山等 6 个期次的构造岩浆活动。

**致谢:** 感谢南京大学地球科学与工程学院于津海教授、夏炎副教授、杨涛副教授对文章提出的宝贵意见! 感谢南京大学地球科学与工程学院薛伟伟博士、李娟博士以及江西省地质调查研究院张芳荣教授级工程师、陈士海高级工程师给予的建议与指导, 以及新疆地矿局第三地质大队实验室、江西省地质调查研究院实验室、武汉上谱科技有限责任公司实验室在样品分析测试过程中给予的技术支持!

## 注释

①安徽省地质调查院. 2005. 1 : 25 万温泉幅、松西幅区域地质调查报告 [R].

## References

- Bi Hua, Wang Zhonggang, Wang Yuanlong, Zhu Xiaoping. 1999. Tectono-magmatic evolution of the West Kunlun Orogenic Belt[J]. *Science in China (Series D)*, 29(5): 398-406 (in Chinese).
- Deng Wanming. 1989. A preliminary study on the basic-ultrabasic rocks of the Karakoram-Western Kunlun Mts[J]. *Journal of Natural Resources*, 4(3): 204-211 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lianhui, Xu Xingwang, Fan Tingbin, Qu Xun, Li Hao, Wan Jianling, An Haitao, Zhou Gang, Li Jihong, Chen Gang, Liu Chuan. 2015. Discovery of the Huoshaoyun super-large exhalative-sedimentary carbonate Pb-Zn deposit in the Western Kunlun area and its great significance for regional metallogeny[J]. *Xinjiang Geology*, 33(1): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- Fan Tingbin, Jin Hongzhan, Yu Yuanjun, Jiang Guopeng, Xia Mingyi. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting progress of lead-zinc deposits in the Tianshuihai area of west Kunlun[J].

- Journal of Geology, 43(2): 184–197 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Kan, Teng Jiabin, Zhao Xinmin, Zhao Xiaojian, Yan Zhouquan, Jin Moushun, Zhao Huibo, Li Xutuo. 2019. Mineralogy, geochemistry and genesis of giant Huoshaoyun Zn–Pb deposit in Karakoram area, Xinjiang, NW China[J]. 52(4): 152–169 (in Chinese with English abstract).
- Geological and Mineral Resources Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 136–759 (in Chinese).
- Hao Jie, Zhai Mingguo. 2004. Jinning movement and Sinian system in China: Their relationship with Rodinia supercontinent[J]. Chinese Journal of Geology, 39(1): 139–152 (in Chinese with English abstract).
- He Guojian, Chen Jianzhong, Zhang Miliang, Yao Jianbin, Chen Haopeng, Hu Weizheng. 2020. The discovery of Early Permian ammonite fossils in Galwan, West Kunlun, Xinjiang and its significance of lithofacies and palaeogeography[J]. Geological Bulletin of China, 42(1): 76–83 (in Chinese with English abstract).
- Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, He Shiping, Zhao Zhenming, Bian Xiaowei, Zhu Haiping, Cui Jigang, Ren Juangang. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoer Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of northwest China and its geological significance[J]. Science China Earth Science, 41(9): 1268–1280 (in Chinese).
- Jian Kunkun, Gao Feng, Du Biao, Zhang Zhenkai, Wang Xing, Zhao Duanchang. 2019. Formation age, geochemical characteristics and tectonic setting of the basalts from Longshan Formation in Heweitai area, Karakorum[J]. Mineralogy and Petrology, 39(3): 42–51 (in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Blackwell: Oxford, 193.
- Li Xingkui, Li Cai, Wang Ming, Liu Jinheng, Luo Anbo. 2018. Nature and evolution of crustal basement beneath the Duolong ore concentration area, northern Tibet, and their constraints on the metallogenesis: Insights from U–Pb ages of inherited zircons from the Bolong volcanic–intrusive rocks[J]. Geological Bulletin of China, 37(8): 1439–1449 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34–43.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 101: 635–643.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid–ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram[J]. Chemical Geology, 56: 207–218.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 37(3/4): 215–224.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1–28 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yusheng, Fang Aimin. 2010. Formation and evolution of the Tethys in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 45(1): 92–101 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63–81.
- Pearce J A. 1982. Trace elements characteristic of lavas from destructive plate boundaries. Andesites[C]//Thorpe R S. Orogenic Andesites and Related Rocks. Chichester, England: John Wiley & Sons, 525–548.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(7): 1217–1232.
- Whitehouse M J, Kamber B S. 2002. On the overabundance of light rare earth elements in terrestrial zircons and its implication for Earth’s earliest magmatic differentiation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 204: 333–346.
- Wood D A. 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 50(1): 11–30.
- Wu Liren. 1963. Metallogenic specialization of basic–ultrabasic rocks in China[J]. Scientia Geologica Sinica, (1): 29–41 (in Chinese).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and constraint on its U–Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, Ye Minmin. 2007. Tectonic evolution of the west Kunlun Orogenic Belt on the northern margin of the Tibet plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA–ICP–MS dating[J]. Science in China (Series D), 37(2): 145–154 (in Chinese).
- Zhang Chuanlin, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Ye Xiantao, Qiu Lin, Zhao Haixiang, Liu Xiaoqiang, Ding Teng, Wang Qian, Hao Xiaoshu. 2019. Tectonic evolution of the Western Kunlun–Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect[J]. Geological Review, 65(5): 1077–1102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huishan, Ji Wenhua, Ma Zhongping, Gao Xiaofeng, Sun Chao, Hong Jun, Lü Pengrui. 2020. Geochronology and geochemical study of the Cambrian andesite in Tianshuihai terrane: Implications for the evolution of the Proto–Tethys Ocean in the west Kunlun–Karakoram orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 36(1): 257–278 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Tang Mingying, He Yuliang, Cui Xiaofeng, Zhang Dongyang, Zhu Mingshuai. 2023. Geochemistry, zircon U–Pb age and Hf isotopic characteristics of two–mica monzonitic granites in Dujianshan area of Western Kunlun, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 50(4): 1203–1216 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Song Biao, Zhang Shuanhong, Liu Jian. 2006. Geochronology of the inherited zircons from Jurassic Nandaling basalt of the Western Hills of Beijing, North China: its implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 184–190 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Griffin W L, Tang Huayun, Zhang Zhihai, Su Yuping, Liu Guanliang. 2008. Archaean basement similar to the North China and Yangtze Continents may be existed beneath the Western Cathaysia[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 549–557 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Nengwu, Chen Bangxue, Deng Zhongfei, Sang Mingshuai, Bai Quanjin. 2019. Discovery and significance of Early Jurassic bimodal volcanic rocks in Huoshaoyun, Karakoram[J]. *Geoscience*, 33(5): 990–1002 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕华, 王中刚, 王元龙, 朱笑青. 1999. 西昆仑造山带构造岩浆演化史[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 29(5): 398–406.
- 邓万明. 1989. 喀喇昆仑—西昆仑地区基性—超基性岩初步考察[J]. *自然资源学报*, 4(3): 204–211.
- 董连慧, 徐兴旺, 范廷宾, 屈迅, 李昊, 万建领, 安海涛, 周刚, 李基宏, 陈刚, 刘川. 2015. 喀喇昆仑火烧云超大型喷流—沉积成因碳酸盐型 Pb–Zn 矿的发现及区域成矿学意义[J]. *新疆地质*, 33(1): 41–50.
- 范廷宾, 晋红展, 余元军, 蒋国鹏, 夏明毅. 2019. 西昆仑甜水海地区铅锌矿成矿特征及找矿进展[J]. *地质学刊*, 43(2): 184–197.
- 高永宝, 李侃, 滕家欣, 赵辛敏, 赵晓健, 燕洲泉, 金谋顺, 赵慧博, 李旭拓. 2019. 新疆喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床矿物学、地球化学及成因[J]. *西北地质*, 52(4): 152–169.
- 郝杰, 翟明国. 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. *地质科学*, 39(1): 139–152.
- 何国建, 陈建中, 张密棕, 姚建斌, 陈浩鹏, 胡为正. 2020. 新疆西昆仑加勒万河一带早二叠世菊石化石的发现及岩相古地理意义[J]. *地质通报*, 42(1): 76–83.
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任绢刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义[J]. *中国科学 (地球科学)*, 41(9): 1268–1280.
- 菅坤坤, 高峰, 杜彪, 张振凯, 王星, 赵端昌. 2019. 喀喇昆仑河尾滩地区龙山组火山岩年代、地球化学特征及其构造环境[J]. *矿物岩石*, 39(3): 42–51.
- 李兴奎, 李才, 王明, 刘金恒, 罗安波. 2018. 藏北多龙矿集区地壳基底性质、演化及其对成矿的制约——来自波龙火山—侵入岩中继承锆石 U–Pb 年龄的信息[J]. *地质通报*, 37(8): 1439–1449.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1–28.
- 潘裕生, 方爱民. 2010. 中国青藏高原特提斯的形成与演化[J]. *地质科学*, 45(1): 92–101.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性[J]. *地质科学*, (1): 29–41.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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*, 49(16): 1589–1604.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 136–759.
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA–ICP–MS 测年的证据[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37(2): 145–154.
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓姝. 2019. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应[J]. *地质论评*, 65(5): 1077–1102.
- 张辉善, 计文化, 马中平, 高晓峰, 孙超, 洪俊, 吕鹏瑞. 2020. 甜水海地块寒武纪安山岩的地球化学和年代学研究: 对西昆仑—喀喇昆仑造山带原特提斯洋演化的启示[J]. *岩石学报*, 36(1): 257–278.
- 张宇, 唐名鹰, 何玉良, 崔霄峰, 张东阳, 朱明帅. 2023. 新疆西昆仑独尖山地区二云母二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U–Pb 年龄与 Hf 同位素特征[J]. *中国地质*, 50(4): 1203–1216.
- 赵越, 宋彪, 张拴宏, 刘健. 2006. 北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义[J]. *地质学前沿*, 13(2): 184–190.
- 郑建平, Griffin W L, 汤华云, 张志海, 苏玉平, 刘观亮. 2008. 西部华夏地区深部可能存在与华北和扬子大陆相似的太古代基底[J]. *高校地质学报*, 14(4): 549–557.
- 周能武, 陈邦学, 邓中飞, 桑明帅, 白金金. 2019. 喀喇昆仑火烧云一带早侏罗世双峰式火山岩的发现及意义[J]. *现代地质*, 33(5): 990–1002.