

新疆伊吾地区晚石炭世石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

马俊强^{1,2}, 杨 峻³, 张 凯³, 潘杨辉³, 程柏林³, 杨晓君²

MA Junqiang^{1,2}, YANG Jun³, ZHANG Kai³, PAN Yanghui³, CHENG Bolin³, YANG Xiaojun²

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

2. 四川川核地质工程有限公司, 四川成都 610052;

3. 四川省核工业地质调查院, 四川成都 610052

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan China;

2. Sichuan Chuan He Geology Engineering, Chengdu 610052, Sichuan, China;

3. Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610052, Sichuan, China

摘要:新疆伊吾地区晚石炭世侵入岩产于天山-兴蒙造山系谢米斯台-库兰卡兹干古生代复合岛弧带的东段。用 LA-ICP-MS 技术测得伊吾地区石英闪长岩中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $312.4 \pm 1.5\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.18, n=30$), 属晚石炭世。岩石化学资料表明, 伊吾地区晚石炭世侵入岩为准铝质高钾钙碱性岩系, 轻稀土元素富集, 重稀土元素平坦, 具中等程度的负 Eu 异常。微量元素中富集轻稀土元素及 Ba、Th 等大离子亲石元素, 而相对亏损 Nb、Ti、P 元素, P 元素较强亏损可能与磷灰石分离结晶作用有关, 元素地球化学组成指示其与大陆地壳物质具有明显的亲缘性; 以上资料揭示, 伊吾地区在晚石炭世已经处于后碰撞构造环境。

关键词:伊吾地区; 晚石炭世; 石英闪长岩; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学

中图分类号: P534.45; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)10-1637-10

Ma J Q, Yang J, Zhang K, Pan Y H, Cheng B L, Yang X J. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Late Carboniferous quartz diorite in Yiwu area of Xinjiang and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(10):1637-1646

Abstract: The Late Carboniferous intrusions in Yiwu region of Xinjiang were produced in the eastern section of Tianshan-Xingmeng orogenic belt. LA-ICP-MS technological analysis shows that the quartz diorite zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of the study area is $312.4 \pm 1.5\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.18, n=30$), suggesting Late Carboniferous epoch. The petrochemical data show that the late Carboniferous intrusive rocks in Yiwu region belong to aluminum alkaline rock series characterized by LREE enrichment and HREE flat type, with moderate Eu negative anomaly. Trace elements in rocks are characterized by enrichment of light rare earth elements and large ion lithophile elements such as Ba and Th, and the relative loss of Nb, Ti and P; strong P element loss may be associated with apatite crystallization separation. These elements and the continental crust material have an obvious affinity. These data reveal that the Yiwu region was in a post-collision tectonic environment in the Late Carboniferous.

Key words: Yiwu region; Late Carboniferous; quartz diorite; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; petrogeochemistry

天山-兴蒙造山系呈近东西向横穿新疆中北部, 向西延伸至邻国, 作为中亚造山带的重要组成部分, 经历了长期的构造演化发展过程^[1-5], 以晚古

生代新陆壳增生和小陆块汇聚为特征^[6-7]。目前的研究认为本区在晚古生代已完成洋陆转换, 并在岛弧带中广泛发育同碰撞及后碰撞的花岗岩^[8-9]。新

收稿日期: 2018-11-06; 修订日期: 2019-01-16

资助项目: 新疆自治区中央返还两权价款基金项目《新疆伊吾县 1:5 万 K46E003022、K46E003023、K46E003024 三幅区域地质矿产调查》(编号: T15-1-LQ06)

作者简介: 马俊强(1989-), 男, 在读硕士生, 工程师, 从事区域地质调查及矿产勘查工作。E-mail: 578133701@qq.com

疆伊吾地区靠近中蒙边境,自然环境恶劣,地质研究程度较低,虽然最近十几年对本区后碰撞构造的研究取得了较大进展,但对该区晚古生代岩浆作用的形成环境及其动力学机制仍存在较大分歧^[10-11]。有学者推测,东天山广泛发育的岩浆活动是与东准噶尔南部的卡拉麦里-莫钦乌拉蛇绿岩带代表的洋盆向南俯冲有关的泥盆纪-石炭纪岛弧^[7,12],或是康古尔塔格一带洋盆向北俯冲形成的泥盆纪岛弧^[5,13];舒良树等^[14]认为,该地区的岩浆活动与石炭纪向南俯冲形成的岛弧、晚石炭世的同碰撞过程及伴随的早二叠世后碰撞活动有关。虽然各家观点不同,但一致认为本区岩浆活动与板块俯冲有关。碰撞岩浆作用记录俯冲/碰撞过程壳幔物质循环的诸多信息,其源区属性及所揭示的深部动力学背景对理解造山带构造演化和壳-幔相互作用尤为重要^[11]。本文基于在该区开展的1:5万区域地质调查,对伊吾县城东北靠近中蒙边境地区的晚石炭世侵入岩进行岩石学、岩石地球化学及锆石U-Pb年代学研究,对该区晚石炭世中酸性侵入岩形成的地质背景、岩浆源区性质及区域构造-岩浆演化特征进行探讨,以期对伊吾地区晚古生代岩浆作用的形成环境及其动力学机制提供岩石学、岩石地球化学及年代学支撑。

1 地质背景及岩石学特征

研究区位于天山-兴蒙造山系谢米斯台-库兰卡兹干古生代复合岛弧带东段,其南侧与唐巴勒-卡拉麦里古生代复合沟弧带以区域性大断裂为界。该复合岛弧带区域上是以泥盆系-石炭系中基性-中性火山岩、硅质岩、碳酸盐岩和中酸性火山碎屑岩为主的沉积盆地^①。区内中酸性侵入岩成带性明显,侵入体数量众多,呈岩株或岩瘤状产出,平面形态多不规则,长轴方向以北西西向为主,与区域构造线方向大体一致(图1)。主要岩石类型有石英闪长玢岩、石英二长闪长玢岩、石英闪长岩、石英二长闪长岩(图2),各侵入体之间多见直接接触,呈渐变过渡关系,侵入于下石炭统姜巴斯套组,与上石炭统巴塔玛依内山组及下二叠统哈尔加乌组沉积接触。中酸性侵入体中有暗色包体出现,但数量较少。

石英闪长玢岩:浅灰色,半自形细粒结构,块状构造,岩石由斑晶、基质组成。斑晶5%:中长石3%,半自形板粒状,粒径1~1.7mm,泥化、绢云母化强。石英1%,粒状,粒径0.4~0.6mm。基质:95%半自形细粒结构,多为中长石,半自形细板条状,粒径0.1~0.2mm,环带构造、聚片双晶发育,绢云母化轻度,粒

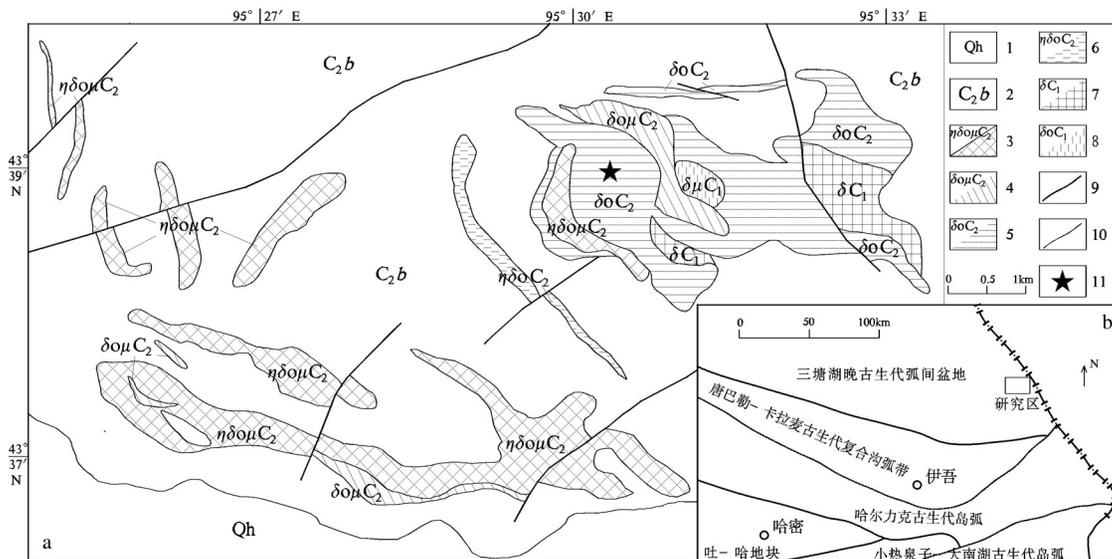


图1 伊吾地区中酸性侵入岩地质简图(a)^②及构造分区略图(b)^[9]

Fig. 1 Geological schematic map (a) of acid intrusive rocks in Yiwu region and tectonic zoning sketch map (b)
 1—第四系;2—巴塔玛依内山组;3—晚石炭世石英二长闪长玢岩;4—晚石炭世石英闪长玢岩;5—晚石炭世石英闪长岩;
 6—晚石炭世石英二长闪长岩;7—早石炭世闪长岩;8—早石炭世石英闪长岩;9—断层;10—地质界线;11—采样位置

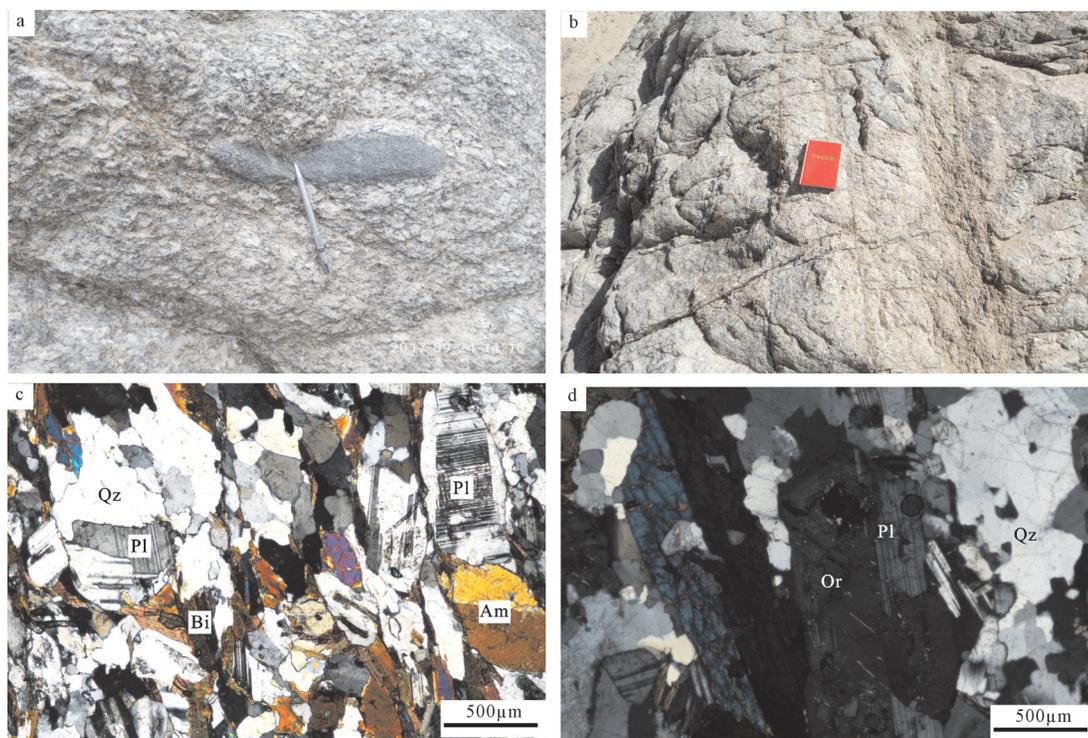


图 2 伊吾地区晚石炭世侵入岩野外照片(a,b)及岩相学显微照片(c,d正交偏光)

Fig. 2 The Late Carboniferous intrusive rocks(a,b) and petrographic microscopic field photographs(c,d) in Yiwu region

Am—角闪石;Bi—黑云母;Pl—斜长石;Or—正长石;Qz—石英

间分布 10% 的石英、2% 的黑云母。

石英二长闪长玢岩:浅灰色-灰绿色,半自形细粒结构,块状构造,岩石由斑晶、基质组成。斑晶 5%:中长石 4%,半自形板状、粒状,粒径 0.8~2.7mm,环带构造、聚片双晶发育。受中-高温热液交代蚀变影响,暗色矿物(1%)个别黑云母化。基质(95%)半自形细粒结构,主要为中长石,粒径 0.1~0.5mm,环带构造、聚片双晶发育,粒间分布 15% 的石英、4% 的黄绿色角闪石。正长石(18%)粒径小于 0.3mm,微粒,高岭土化强,分布于斜长石间隙,或呈斜长石镶边分布。含微量细柱状磷灰石。

石英闪长岩:浅灰色,半自形粒状结构,块状构造,岩石由斜长石、少数石英、次生绿泥石组成。主要为中长石(73%),半自形板状、粒状,粒径 0.6~2.8mm,普遍泥化、帘石化强,密集分布。斜长石间填隙状分布 10% 的石英,粒径 0.1~0.3mm,他形粒状。暗色矿物(15%)个别被绿泥石取代,残留柱状,粒径 0.3~1.3mm,杂乱分布于斜长石间。磁铁矿(2%)粒径 0.1~0.2mm,粒状,稀疏浸染状分布。含

微量柱状磷灰石。

石英二长闪长岩:灰色,半自形粒状结构,块状构造,岩石由斜长石、正长石、角闪石及少数石英组成,矿物均匀分布。斜长石(59%)为半自形板粒状,0.3~1.7mm,成分为中长石。正长石(15%)粒径为 0.1~0.6mm,他形细粒,均匀分布。石英(10%)粒径为 0.1~0.4mm,他形粒状,填隙分布于长石粒间。暗色矿物(15%)以褐黄色黑云母为主,少数黄绿色角闪石、辉石,粒径 0.2~0.7mm,片状、柱状,杂乱分布于长石、石英粒间。含微量磷灰石。

2 分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试

样品采自研究区中部(图 1),室内鉴定为石英闪长岩。在干净环境下,清洗原岩样品后粉碎,淘洗岩石粉末得到重砂,再经过电磁选和重液分选出锆石,最后在双目镜下挑选出锆石颗粒。将锆石颗粒和标样一同制成环氧树脂靶,待靶固结后,打磨抛光至锆石中心暴露,然后进行反射光、透射光显

微照相和阴极发光(CL)图像分析,为测定时选取待测部位和测定后数据解释提供依据。

锆石U-Pb同位素分析在中国地质科学院矿产资源所LA-ICP-MS实验室完成,所用仪器为Thermo Element II型LA-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 193nm激光剥蚀系统。LA-ICP-MS激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,激光剥蚀所用斑束直径为35 μm ,频率为10Hz,能量密度为16~17J/cm²,以氦为载气。用标准锆石样品GJ-1校正U/Pb分馏、标准锆石Plešovice监视仪器状态,用Glitter(Version4.0, Mcquaire University)程序处理原始数据。详细实验测试过程见参考文献[15]。

2.2 岩石化学分析

样品加工与分析均由新疆维吾尔自治区地质矿产开发局实验室完成,测试选取地表新鲜的岩石样品,经室内岩石薄片观察鉴定,再综合选取新鲜样品进行岩石化学分析,为保证样品的均匀性,全样粉碎至1mm以下才进行缩分。

主量元素采用无水四硼酸锂熔融,以硝酸铵为氧化剂,加氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱模剂,制成玻璃样片,在荷兰帕纳科X射线分析仪器有限公司生产的Axios X射线荧光光谱仪上进行测定;FeO采用氢氟酸、硫酸分解,重铬酸钾法测定。H₂O采用105℃烘干差减重量法测定。稀土元素采用过氧化钠熔融分解样品,在碱性介质中随基体元素一起沉淀,通过过滤分离掉大量的溶剂,再将沉淀用酸溶解,用美国珀金埃尔默公司生产的NexION 300x等离子体质谱仪测定。微量元素等

采用盐酸+硝酸+氢氟酸+高氯酸溶解,在美国热电公司生产的iCAP6300全谱直读等离子发射光谱仪上测定或在美国珀金埃尔默公司生产的NexION 300x等离子体质谱仪上测定。

3 锆石U-Pb同位素测定结果

样品YQ06-TW02为浅灰色石英闪长岩,采自研究区中北部。挑选30颗锆石进行测试,结果见表1。U、Th含量变化范围较大,U含量介于115 $\times 10^{-6}$ ~560 $\times 10^{-6}$ 之间,平均为281 $\times 10^{-6}$;Th含量介于37 $\times 10^{-6}$ ~585 $\times 10^{-6}$ 之间,平均为198 $\times 10^{-6}$;Th/U值介于0.15~0.94之间,个别点可达1.24,平均值为0.66。锆石阴极发光图像见图3。由于Th、U含量较高,锆石阴极发光性弱,导致阴极发光图像颜色偏黑。大部分锆石具有明显的振荡环带结构,环带窄而细密,极个别具扇形分带结构,总体具有典型的岩浆锆石特征。测试结果在U-Pb谐和图(图4)中的投影位置落于谐和线上及其附近,30个数据的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为312.4 \pm 1.5Ma(MSWD=0.18)。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

晚石炭世侵入岩主量元素分析结果见表2。由表可以看出,由石英闪长岩到石英闪长玢岩SiO₂含量逐渐增加,其含量在50.88%~63.93%之间,属于中酸性岩;Al₂O₃含量介于14.45%~16.56%之间,K₂O含量在1.00%~3.65%之间,Na₂O含量介于

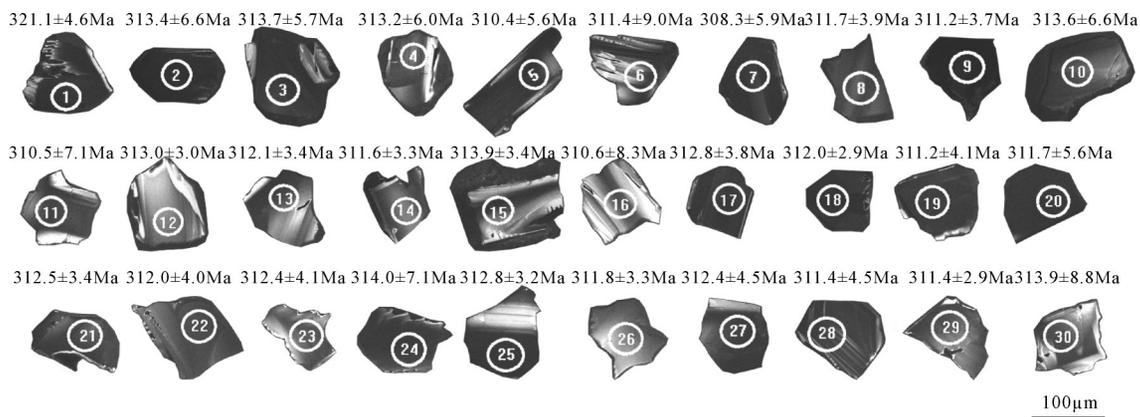


图3 晚石炭世石英闪长岩锆石阴极发光照片及测点编号、²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄

Fig. 3 The cathodoluminescence photos of Late Carboniferous quartz diorite and the serial number of measuring points, ²⁰⁶Pb/²³⁸U age

表 1 晚石炭世侵入岩锆石 U-Th-Pb 同位素数据(样品 YQ06-TW02)

Table 1 U-Th-Pb isotope composition of the zircon in Late Carboniferous intrusive rock (YQ06-TW02)

测试点	含量/ 10^{-6}			同位素比值及误差						同位素年龄及误差/Ma					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	109	212	0.51	0.053	0.0028	0.373	0.018	0.0511	0.0007	327.0	116.9	321.8	13.6	321.1	4.6
2	53	141	0.38	0.053	0.0045	0.367	0.030	0.0498	0.0011	346.8	179.5	317.4	22.0	313.4	6.6
3	51	115	0.44	0.054	0.0039	0.3696	0.025	0.0499	0.0009	360.2	155.1	319.4	18.8	313.7	5.7
4	382	389	0.98	0.054	0.0041	0.3688	0.026	0.0498	0.001	359.4	161.5	318.8	19.6	313.2	6.0
5	103	297	0.35	0.053	0.0038	0.3606	0.024	0.0493	0.0009	329.0	153.5	312.7	18.2	310.4	5.6
6	56	159	0.35	0.053	0.0063	0.3586	0.042	0.0495	0.0015	309.2	251.0	311.2	31.0	311.4	9.0
7	309	337	0.92	0.054	0.004	0.3662	0.026	0.049	0.001	379.9	158.0	316.9	19.1	308.3	5.9
8	213	314	0.68	0.053	0.0023	0.3589	0.014	0.0496	0.0006	308.1	98.5	311.4	10.7	311.7	3.9
9	564	551	1.02	0.053	0.0022	0.3614	0.014	0.0495	0.0006	328.3	93.1	313.2	10.1	311.2	3.7
10	404	430	0.94	0.053	0.0044	0.3615	0.029	0.0499	0.0011	310.8	178.4	313.3	21.5	313.6	6.6
11	385	367	1.05	0.053	0.0048	0.3635	0.032	0.0493	0.0012	346.9	192.2	314.8	23.6	310.5	7.1
12	151	285	0.53	0.053	0.0016	0.3624	0.009	0.0498	0.0005	321.2	68.7	314	6.6	313.0	3.0
13	168	309	0.54	0.053	0.0019	0.3632	0.011	0.0496	0.0006	332.9	80.3	314.6	8.3	312.1	3.4
14	69	182	0.38	0.053	0.0019	0.3588	0.011	0.0495	0.0005	308.9	80.7	311.3	8.2	311.6	3.3
15	251	305	0.82	0.053	0.0019	0.365	0.011	0.0499	0.0006	330.9	80.3	315.9	8.3	313.9	3.4
16	218	261	0.83	0.054	0.0058	0.3653	0.038	0.0494	0.0014	356.6	227.6	316.1	28.4	310.6	8.3
17	96	240	0.4	0.053	0.0023	0.3644	0.014	0.0497	0.0006	334.6	96	315.5	10.6	312.8	3.8
18	585	560	1.04	0.053	0.0015	0.3604	0.008	0.0496	0.0005	316.3	63.3	312.5	5.7	312.0	2.9
19	109	153	0.71	0.053	0.0026	0.3597	0.016	0.0495	0.0007	317.5	108.6	312.0	12.1	311.2	4.1
20	124	272	0.45	0.054	0.0037	0.3661	0.024	0.0495	0.0009	353.5	149.4	316.8	17.9	311.7	5.6
21	223	232	0.96	0.053	0.002	0.3638	0.012	0.0497	0.0006	333.0	82.9	315	8.7	312.5	3.4
22	85	139	0.61	0.053	0.0025	0.3641	0.015	0.0496	0.0007	339.3	102.7	315.3	11.5	312.0	4.0
23	122	195	0.63	0.053	0.0025	0.3614	0.015	0.0497	0.0007	319.0	103.9	313.2	11.5	312.4	4.1
24	151	184	0.82	0.053	0.0048	0.3636	0.031	0.0499	0.0012	321.4	192.0	314.9	23.4	314.0	7.1
25	463	375	1.24	0.053	0.0017	0.3646	0.010	0.0497	0.0005	336.4	71.5	315.6	7.0	312.8	3.2
26	142	220	0.65	0.053	0.0019	0.3638	0.011	0.0496	0.0005	338.2	78.1	315.0	8.0	311.8	3.3
27	37	245	0.15	0.054	0.0028	0.3675	0.018	0.0497	0.0007	356.9	114.4	317.8	13.3	312.4	4.5
28	208	295	0.7	0.054	0.0029	0.3667	0.018	0.0495	0.0007	359.4	116.6	317.2	13.5	311.4	4.5
29	41	528	0.08	0.053	0.0015	0.363	0.008	0.0495	0.0005	336.8	63.3	314.5	5.6	311.4	2.9
30	79	151	0.53	0.053	0.0061	0.3623	0.041	0.0499	0.0014	313.4	243.6	314.0	30.3	313.9	8.8

注:测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所

3.02%~6.74%之间,由石英闪长岩到石英闪长玢岩 SiO_2 和碱含量逐渐增加,反映岩浆由深部到浅部向富硅、富碱方向演化; A/NK 值介于 1.34~1.67 之间,平均值为 1.46, A/CNK 值介于 0.79~0.99 之间,平均值为 0.90, 小于 1, 均为准铝质岩系。大多数样品的 σ 值一般介于 3.34~4.29 之间, 碱度率 AR 介于 1.92~2.54 之间, 属于碱性岩系。在 A/CNK-A/NK 图解(图 5-a)中, 所有样品点均落在准铝质区; 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5-b)中, 大部分样品点落入高钾钙碱性区域。以上特征表明, 研究区晚石炭世侵入

岩属准铝质高钾钙碱性系列岩石。

4.2 稀土元素

晚石炭世侵入岩稀土元素分析结果见表 2。稀土元素总量 ΣREE 在 130×10^{-6} ~ 375×10^{-6} 之间, 平均 258×10^{-6} , 略高于上地壳平均值 (210×10^{-6})。随着岩浆侵入深度的减小, 酸性的增加, 稀土元素总量呈逐渐降低的趋势, 反映该类岩石分离结晶过程及物源的复杂性。轻、重稀土元素比值 $\text{LREE}/\text{HREE}=4.58 \sim 5.36$, 平均 5.06; $(\text{La}/\text{Yb})_N=3.63 \sim 4.87$, 平均 4.13, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N=2.99 \sim 4.14$, 平均 3.49, 表明属

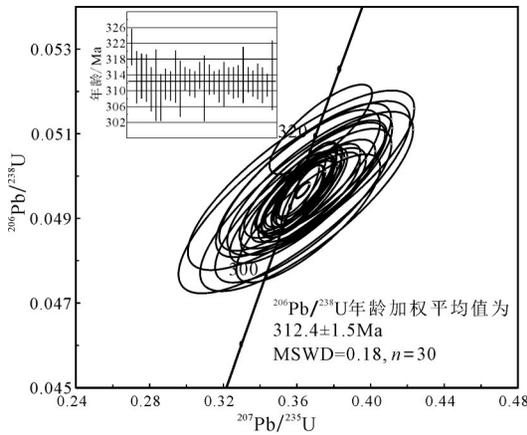


图4 石英闪长岩锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 The zircon U-Pb concordia diagram of quartz diorite

轻稀土元素富集,且轻、重稀土元素分异较好。 $(La/Sm)_N=1.83 \sim 2.36$, 平均 2.1, $(Gd/Yb)_N=1.17 \sim 1.55$, 平均 1.34, 说明轻稀土元素较重稀土元素分馏程度高。 $\delta Eu=0.7 \sim 1.1$, 平均 0.83, $\delta Ce=0.89 \sim 1.08$, 平均 0.95, 具有 Eu 和 Ce 的负异常。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 6-a)中, 曲线呈右倾斜的轻稀土元素富集、重稀土元素平坦型式, Eu 出现中等程度亏损, 反映岩石经历了一定程度的分离结晶作用, 且分异程度越来越高。

4.3 微量元素

晚石炭世侵入岩微量元素分析结果见表 2。由表 2 可知, $Rb/Sr=0.05 \sim 0.18$, 介于地幔平均值(0.025)与陆壳平均值(0.44)之间, 显示壳幔混合特征。在球粒陨石标准化微量元素蛛网图(图 6-b)中, 岩石富集轻稀土元素及 Ba、Th 等大离子亲石元

素, 而相对亏损 Nb、Ti、P 元素, P 元素较强亏损可能与磷灰石分离结晶作用有关。所有样品曲线形态趋势相近, 呈锯齿状, 说明具有相似的源区, 个别元素含量相差较大, 可能与成岩过程中其他组分同化混染作用有关。晚石炭世侵入岩微量元素分布型式与 Pearce 等^[16]划分的火山弧花岗岩的分布型式接近, 显示出火山弧岩浆岩的特征。

5 讨论

5.1 岩体成因

Pitcher^[17]将花岗岩与其产出构造环境相联系, 提出 I 型、S 型、M 型和 A 型 4 种花岗岩成因类型。一般来说, I 型花岗岩源自于壳内中基性火成岩, 而 S 型花岗岩由中上地壳的变沉积岩熔融而来^[18-19]。研究区晚石炭世侵入岩主量元素中, 由石英闪长岩→石英二长闪长岩→石英闪长玢岩, SiO_2 和碱含量逐渐增加, 反映岩浆由深部到浅部向富硅、富碱方向演化。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中, 曲线呈右倾斜的轻稀土元素富集、重稀土元素平坦型式, Eu 出现中等程度负异常, 反映岩石经历了一定程度的分离结晶作用, 且分异程度越来越高。将晚石炭世侵入岩样品投在 ACF 图解(图 7)中, 样品点落在 S 型与 I 型花岗岩界线区域, 主量元素 Al_2O_3 含量介于 14.45% ~ 16.56% 之间, A/NK 值介于 1.34 ~ 1.67 之间, A/CNK 值介于 0.79 ~ 0.99 之间, 为准铝质岩系, 岩石主要由石英、斜长石、正长石、角闪石及黑云母组成, 不含白云母。综合岩石组合及岩石化学特征认为, 新疆伊吾地区晚石炭世侵入岩为 I 型花岗岩。

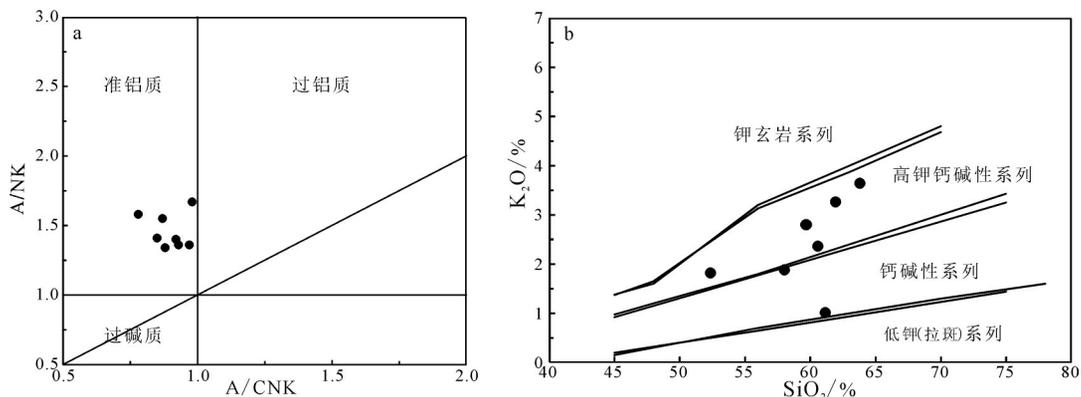
图5 晚石炭世侵入岩 A/CNK-A/NK 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)Fig. 5 A/CNK-A/NK (a) and SiO_2 - K_2O (b) diagrams of Late Carboniferous intrusive rock

表 2 晚石炭世侵入岩主量、微量和稀土元素分析数据及特征参数

Table 2 The major, trace and rare earth elements composition and characteristic parameters of Late Carboniferous intrusive rocks

元素	石英闪长岩		石英二长闪长岩	石英闪长岩				
	YQ06-11	YQ06-52	YQ06-54	YQ06-03	YQ06-04	YQ06-09	YQ06-40	YQ06-44
SiO ₂	60.45	63.93	60.15	57.85	56.00	58.67	57.80	50.88
TiO ₂	0.86	0.88	0.93	1.32	1.49	1.32	1.27	2.20
Al ₂ O ₃	16.56	14.84	15.15	14.97	15.46	15.28	14.97	14.45
Fe ₂ O ₃	3.84	3.36	4.87	4.95	5.04	4.79	5.26	6.16
FeO	5.10	5.01	6.27	6.79	7.57	6.51	6.94	10.27
MnO	0.12	0.10	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.19
MgO	2.23	1.34	1.16	1.98	2.59	2.07	1.96	3.13
CaO	2.66	3.41	2.89	3.84	4.31	3.12	3.16	5.14
Na ₂ O	6.74	3.02	4.67	4.68	4.86	5.13	5.03	4.39
K ₂ O	1.00	3.65	3.17	2.71	1.81	2.29	2.71	1.77
P ₂ O ₅	0.25	0.24	0.35	0.50	0.46	0.48	0.50	0.87
总计	99.81	99.77	99.75	99.72	99.72	99.81	99.74	99.46
σ	3.38	2.13	3.44	3.48	3.18	3.34	3.83	4.29
SI	11.69	8.09	5.67	9.24	11.68	9.88	8.83	11.92
DI	69.80	68.62	69.68	64.14	58.23	65.98	66.03	49.47
AR	2.35	1.99	2.54	2.29	2.02	2.35	2.49	1.92
FL	74.43	66.17	73.03	65.83	60.77	70.40	71.02	54.51
MF	80.35	86.49	90.79	85.87	83.28	84.71	86.42	84.43
OX	0.57	0.60	0.56	0.58	0.60	0.58	0.57	0.63
A/NK	1.36	1.67	1.36	1.41	1.55	1.40	1.34	1.58
A/CNK	0.98	0.99	0.93	0.86	0.88	0.93	0.89	0.79
KN	7.83	6.65	8.07	7.63	6.91	7.66	7.99	6.34
La	18.00	33.60	45.20	36.10	20.80	29.10	40.50	44.20
Ce	38.30	70.20	92.60	80.00	46.10	66.80	82.70	115.00
Pr	5.00	10.50	13.60	10.60	6.30	8.90	12.20	14.90
Nd	21.40	43.40	56.60	47.80	30.00	41.10	52.30	65.80
Sm	4.80	9.98	12.70	10.60	6.70	9.20	11.70	15.20
Eu	1.70	2.19	2.89	2.50	2.10	2.50	2.81	3.54
Gd	4.50	8.81	10.90	9.60	6.40	8.80	10.30	13.20
Tb	0.82	1.59	1.95	1.70	1.10	1.60	1.80	2.33
Dy	4.60	9.46	11.40	10.00	6.60	9.70	10.80	13.50
Ho	0.90	1.96	2.34	2.00	1.30	1.90	2.24	2.81
Er	2.50	5.20	6.11	5.40	3.60	5.30	5.93	7.19
Tm	0.40	0.86	1.03	0.0	0.56	0.81	0.98	1.16
Yb	2.60	6.08	6.94	5.00	3.50	5.40	6.97	7.80
Lu	0.47	0.92	1.05	0.78	0.54	0.89	1.05	1.19
Y	23.60	49.4	58.40	50.70	32.90	50.10	55.30	67.00
Σ REE	129.59	254.15	323.71	273.58	168.50	242.10	297.58	374.82
LREE	89.20	169.87	223.59	187.60	112.00	157.60	202.21	258.64
HREE	16.79	34.88	41.72	35.28	23.60	34.40	40.07	49.18
LREE/HREE	5.31	4.87	5.36	5.32	4.75	4.58	5.05	5.26
(La/Yb) _N	4.67	3.73	4.39	4.87	4.01	3.63	3.92	3.82
δ Eu	1.10	0.70	0.73	0.74	0.97	0.84	0.77	0.75
Zr	243.00	555.00	579.00	480.00	219.00	443.00	518.00	335.00
V	77.67	78.13	82.31	91.84	173.00	74.09	101.74	88.54
Th	1.67	6.55	7.87	3.76	1.28	1.86	7.47	4.55
Sc	14.38	12.71	17.66	18.04	18.93	23.43	19.56	29.35
Sr	360.00	566.00	436.00	520.00	647.00	358.00	417.00	404.00
Rb	16.20	60.90	79.90	68.60	39.60	48.40	63.70	38.77
Nb	6.44	16.90	18.82	12.83	8.89	11.39	17.25	16.95
Cr	7.95	10.46	8.17	8.76	15.35	8.14	17.19	19.06
Ba	757.00	766.00	693.00	702.00	684.00	660.00	585.00	435.00
Hf	6.03	11.12	19.89	13.94	4.91	9.22	15.08	9.84
Ta	0.31	0.58	0.40	0.37	0.17	0.14	0.51	0.26

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

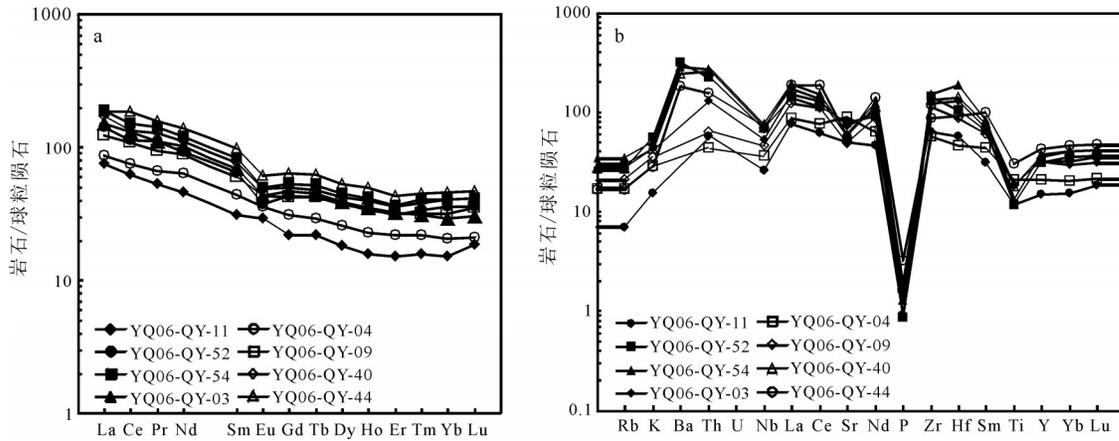


图6 晚石炭世侵入岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 REE patterns (a) and trace element spider diagrams (b) of Late Carboniferous intrusive rocks

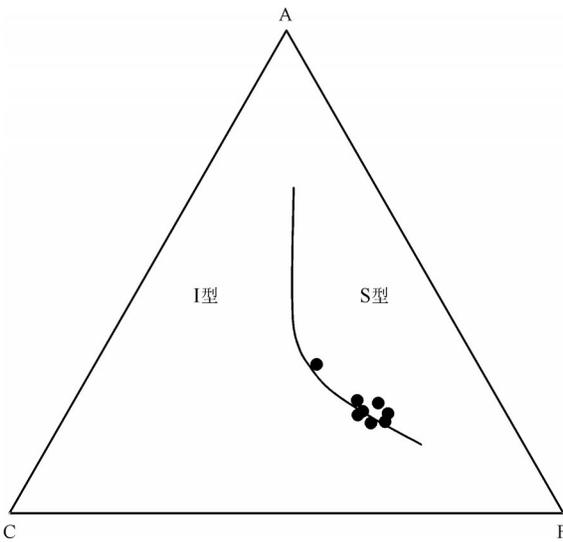


图7 晚石炭世侵入岩ACF图解

Fig. 7 ACF diagram of Late Carboniferous intrusive rocks

伊吾地区晚石炭世侵入岩相对富碱($K_2O + NaO = 4.02\% \sim 10.39\%$),在 $SiO_2 - K_2O$ 关系图(图5-b)上,除1个样品点外其余均落入高钾钙碱性系列区域。高钾钙碱性I型花岗岩主要形成于2种构造背景,一种类似于安第斯山的大陆弧背景,其地球化学和同位素特征反映岩浆源区可能与地幔楔在俯冲流体的作用下发生部分熔融有关。另一种类似于加里东造山带的后碰撞构造背景,其岩浆源区主要来自地壳加厚之后的减压伸展过程^[20],伊吾地区晚石炭世侵入岩 MgO 、 Cr 含量较低($MgO = 1.16\% \sim 3.13\%$, $Cr = 7.95 \times 10^{-6} \sim 19.06 \times 10^{-6}$),其中 Cr 含量远

低于地幔橄榄岩源区部分熔融形成的原始玄武质岩浆($Cr = 500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$)^[21]。在微量元素蛛网图上,岩石富集轻稀土元素及Ba、Th等大离子亲石元素,相对亏损Nb、Ti、P元素,P元素亏损较强,可能与磷灰石分离结晶作用有关,这些元素地球化学组成指示其与大陆地壳物质具有明显的亲缘性^[22]。因此,伊吾地区晚石炭世侵入岩不可能起源于幔源岩浆的分异演化,而更可能起源于地壳物质的部分熔融。

5.2 环境分析

通常认为,花岗岩与大地构造环境之间存在密切的联系,花岗岩产出的构造环境或其出露的构造位置在讨论其成因方面具有重要的意义,利用地球化学标志可以判别花岗岩形成的大地构造环境^[16-17,23-26]。新疆东部地区中酸性侵入岩浆作用经历了板块碰撞前、火山弧、碰撞同期、板内伸展、陆内叠覆造山和非造山6个演化阶段^[13]。晚石炭世新疆东部地区古亚洲洋闭合,随后开始发生强烈的区域拉张作用^[11],并发生大规模中-酸性岩浆活动,其花岗岩年龄集中在 $340 \sim 310Ma$ ^[27-28]。本次在石英闪长岩中获得的 $312.4 \pm 1.5Ma$ 的年龄值亦证实,晚石炭世伊吾地区存在构造岩浆活动。

利用 $R_1 - R_2$ 图解对研究区侵入岩进行构造环境判别(图8),除1个样品点落入碰撞后抬升区域外,其余样品均落入造山晚期区域,总体反映了碰撞后抬升和造山晚期的特征。在花岗岩类Y-Nb构造判别图解(图9-a)上,大部分样品点落在异常洋中脊

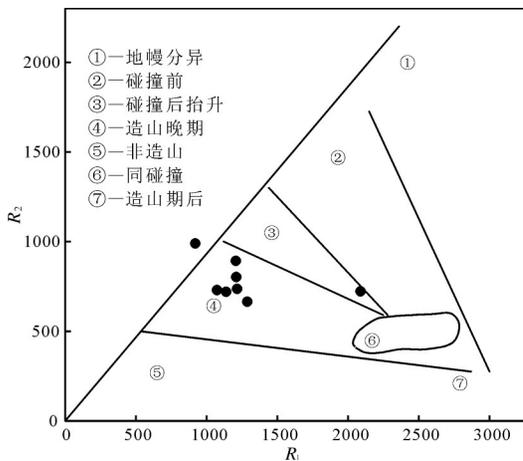


图 8 晚石炭世侵入岩 R_1-R_2 图解

Fig. 8 R_1-R_2 diagram of Late Carboniferous intrusive rocks

花岗岩区域,个别落在火山弧花岗岩+同碰撞花岗岩区域;在花岗岩类(Y+Nb)-Rb 构造判别图解(图 9-b)中,大部分样品点落在板内花岗岩区域,个别落在火山弧花岗岩区域。前述主量元素反映侵入岩属于高钾钙碱性岩系,表明本区处于碰撞后拉张阶段,指示应力相对松弛的后碰撞构造背景。综合认为,伊吾地区晚石炭世侵入岩是在后碰撞引张背景下产生的,而该期侵入岩具有弧性质是继承了碰撞时的火山弧组分。

综合以上认为,晚石炭世伊吾地区残余海盆随着板块拼合而消失,板块进一步碰撞拼接^①。随着挤压碰撞作用的持续进行,增厚的下地壳发生拆

沉,造成热的软流圈地幔上隆,发生部分熔融,产生后造山岩浆作用,并诱发拉伸构造体制^[29-30],在拉伸构造体制下,区域性的拉张深断裂为上地幔岩浆底侵提供了有利的构造条件,减压增温诱使地壳物质发生减压熔融,产生长英质岩浆^[11],岩浆在上升侵位时卷入部分陆壳物质进行重融,在一定部位经同化混染、结晶分异等地质作用而表现出 Nb、P、Ti 负异常,并向富硅、富碱方向演化,最终形成石英闪长岩→石英二长闪长岩→石英闪长玢岩的岩浆序列。

因此,本区晚石炭世侵入岩的形成可能与伊吾地区加厚地壳部分熔融作用有关,是造山晚期挤压体制向伸展体制转变的产物,标志着碰撞造山作用接近尾声,而该期侵入岩具有弧性质是继承了碰撞时的火山弧组分。本次获得的 312.4 ± 1.5 Ma 的年龄值为新疆伊吾地区碰撞造山时限提供了精确的同位素年代学约束。

6 结 论

(1)伊吾地区晚石炭世侵入岩为准铝质碱性岩系,轻稀土元素富集,重稀土元素平坦,具有中等程度负 Eu 异常,反映岩石经历了一定程度的分离结晶作用,且分异程度越来越高。岩石富集轻稀土元素及 Ba、Th 等大离子亲石元素,而相对亏损 Nb、Ti、P 元素,P 元素较强亏损可能与磷灰石分离结晶作用有关,这些元素地球化学组成指示其与大陆地壳物质具有明显的亲缘性。

(2)伊吾地区石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为

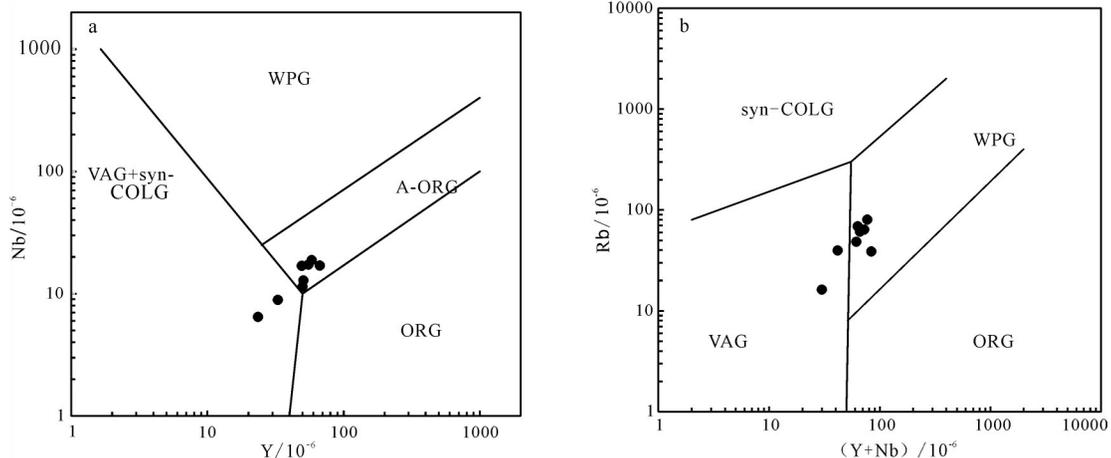


图 9 晚石炭世侵入岩 Y-Nb(a)和(Y+Nb)-Rb(b)判别图解

Fig. 9 Y-Nb (a) and (Y+Nb)-Rb (b) discriminant diagrams of Late Carboniferous intrusive rocks

VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;syn-COLG—同碰撞花岗岩;A-ORG—异常洋中脊花岗岩

312.4±1.5Ma,是造山晚期挤压体制向伸展体制转变的产物,标志着碰撞造山作用接近尾声,而该期侵入岩具有弧性质是继承了碰撞时的火山弧组分。

致谢:论文编写过程中得到伊吾项目组的大力支持与帮助,锆石U-Pb同位素测定过程中得到中国地质科学院矿产资源所LA-ICP-MS实验室陈振宇副研究员的帮助,审稿专家为提高本文质量提出了建设性的修改意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]Bunman V S. Meso-Tethyan oceanic sutures and their deformation[J]. *Tectonophysics*, 1994, 234: 305-327.
- [2]冯益民,朱宝清,杨军录,等.东天山大地构造及演化——1:50万东天山大地构造图简要说明[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 309-314.
- [3]秦克章,方同辉,王书来,等.东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 302-308.
- [4]Aitehison J C, Davis A M. Evidence for the multiphase nature of the India-Asia collision from the YarlungTsangpo suture zone, Tibet[C]//Malpas J G. *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. *Geo1. Soc. Spec. Publ.*, 2004, 226: 217-233.
- [5]李锦轶,王克卓,孙桂华,等.东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片:中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1087-1102.
- [6]肖文交,韩春明,袁超,等.新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1062-1076.
- [7]Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S. Palaeozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan(NW China): welding of the Tarim and Junggarplates[J]. *Episodes*, 2007, 30(3): 162-186.
- [8]熊小林,蔡志勇,牛贺才,等.东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 967-976.
- [9]董连慧,祁世军,成守德.新疆地壳演化及优势矿产成矿规律研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2009: 8.
- [10]Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, et al. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan Belt, NW China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2011, 54(2): 166-184.
- [11]陈希节,张奎华,周健.东天山哈密地区早二叠世花岗岩体及铁镁质包体的年代学,岩石地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2334-2354.
- [12]马瑞士,舒良树,孙家齐.东天山构造演化与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1997: 1-202.
- [13]李文明,任秉琛,杨兴科,等.东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *西北地质*, 2002, 35(4): 41-63.
- [14]舒良树,王博,朱文斌,等.南天山蛇绿混杂岩中放射虫化石的时代及其构造意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1161-1168.
- [15]侯可军,李延河,田有荣,等. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
- [16]Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretations of granitic rocks[J]. *J. Petrol.*, 1984, 25: 956-983.
- [17]Pitcher W S. Granite type and tectonic environment[C]//Hsu K. *Mountain Building Processes*. Academic Press, London, 1983: 19-40.
- [18]Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1992, 272: 1-26.
- [19]Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535-551.
- [20]Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium calcalkaline I-type granitoids[J]. *Geology*, 1993, 21(9): 825-828.
- [21]Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-466.
- [22]Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: its composition and evolution*[M]. Blackwell Scientific Publications, 1985: 1-312.
- [23]Batchelor B, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 1985, 48: 43-55.
- [24]Barbarin, B. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments[J]. *Lithos*, 1999, 46: 605-626.
- [25]肖庆辉,邓晋福,马大栓,等.花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社, 2002: 1-294.
- [26]张旗,潘国强,李承东,等.花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- [27]孙桂华,李锦轶,高立明,等.新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 563-469.
- [28]郭华春,钟莉,李丽群.哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 928-931.
- [29]韩宝福,何国琦,王式洸.后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准葛尔盆地基底的性质[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(1): 16-21.
- [30]夏林圻,夏祖春,徐学义,等.天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 903-1001.
- ①新疆地矿局第六地质大队.新疆伊吾县和尔赛一带1:5万区域地质矿产调查报告. 2010.
- ②四川省核工业地质调查院.新疆伊吾县1:5万K46E003022、K46E003023、K46E003024三幅区域地质矿产调查报告. 2018.