



新疆库米什早泥盆世侵入岩时代、地球化学及大地构造意义

杨天南¹, 王小平²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 新疆维吾尔自治区矿产资源储量评审中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 详细的野外考察发现, 新疆库米什地区发育强变形的花岗岩与辉长岩, 花岗岩时代晚于辉长岩, 两者相互交错, 形成黑白相间的地貌格局。主要元素、微量元素和稀土元素分析表明, 两者没有发生明显的地球化学同化混染。辉长岩轻稀土、不相容元素强烈富集, 而重稀土、相容元素相对亏损, 高的 Sr 含量及低的 Rb/Sr 比值表明岩浆来自强烈富集地幔源区, 曾被源自沉积岩的流体混染, 属于火山弧环境; HREE 元素也存在分异, 表明岩浆形成时涉及石榴石的形成。花岗岩锆石阴极发光结构研究显示, 锆石内部普遍见浑圆状碎屑核, 表明花岗岩可能为变质沉积岩经局部熔融形成, SHRIMP U-Pb 测年结果表明岩体侵位时代为 396 ± 4 Ma。结合其他地质资料, 推测库米什变形侵入岩的形成与南天山洋的向北俯冲消减有关, 早泥盆世时库米什地区属于俯冲带上盘活动陆缘环境, 中、南天山地质单元的界线应位于库米什南、榆树沟蛇绿岩套以北。

关键词: 花岗岩, 辉长岩, 地球化学, SHRIMP U-Pb, 库米什, 天山

中图分类号: P588.12, P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)05-0401-11

Geochronology, petrochemistry and tectonic implications of Early Devonian plutons in Kumux area, Xinjiang

YANG Tian-nan¹ and WANG Xiao-ping²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 2. Mineral Resource & Reservoir Evaluation Center of Xinjiang, Urumqi 830000, China)

Abstract: Detailed field observations have identified basic and granitic plutons in Kumux area, whose intersections resulted in a white-black mosaic pattern at the surface. Geochemical analyses demonstrate that both granite and gabbro are strongly enriched in LREE and incompatible elements and depleted in HREE and other compatible elements. Very high Sr content and low Rb/Sr ratio of the gabbros can be attributed to some contamination of Sr-enriched fluids derived from sedimentary rocks. Such a geochemical feature suggests that the gabbros were derived from an enriched mantle wedge area in a magma arc environment. Weak fractionation of HREE indicates garnet crystallization during partial melting of the enriched mantle wedge. CL observations and SHRIMP U-Pb analyses of granitic zircons reveal that the granite is of S-type resulting from remelting of meta-sedimentary rocks at about 396 Ma. Taking into account the geological data from peripheral areas, the authors have reached the following conclusions: (1) the intensely deformed plutons of the Kumux area resulted from the northward subduction of the Paleo South Tianshan Ocean under the Central Tianshan terrane, (2) during the subduction, the Kumux area was located on the subduction-related continental magma arc zone, and (3) the boundary between the South Tianshan unit and the Central Tianshan unit should be re-located to the south of the Kumux and the

收稿日期: 2006-04-20; 修订日期: 2006-06-01

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2001CB409810)

作者简介: 杨天南(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要从事造山带变质、变形作用研究。

north of the Yushugou ophiolite slice.

Key words: granite; gabbro; geochemistry; SHRIMP U-Pb; Kumux; Tianshan

中亚造山带(Central Asia Orogenic Belt, CAOB) 由于其地壳的高度不成熟性(Hu *et al.*, 2000) 而广受关注, 已经成为研究显生宙地壳生长的重点地区(Jahn *et al.*, 2000)。绵延 2 500 km 的天山山脉位于中亚造山带的南部, 是该造山带的重要组成部分。同时, 我国境内的天山山脉也是重要的地球化学分界, 天山以北的准噶尔周缘、阿尔泰等地区以发育众多蛇绿岩(李锦轶, 1995; Wang *et al.*, 2003)、岛弧火山岩及相关沉积岩为特征, 具有相对较小的 Nd 模式年龄(胡蔼琴等, 2001), 普遍被认为是显生宙源自地幔的新生陆壳, 而天山以南的塔里木地块则由古老的陆壳组成, Nd 模式年龄(胡蔼琴等, 2001) 较大, 地壳的生长通过古老地块的拼贴实现。现有的资料(李锦轶, 2004) 表明, 天山南北两侧地壳的演化特点是不同的。作为两个具不同演化历史的地质单元间的连接山脉, 天山应该保留反映整个中亚造山带地质演化的某些地质信息, 是研究中亚造山带地质历史的关键之一。作为造山带中最常见的岩石类型之一, 侵入岩的地球化学性质及形成时代对于确定俯冲极性及其时代具有重要的制约意义(Maniar and Piccoli, 1989)。本文选取天山中段的库米什地区作为研究区, 在详细野外观察的基础上, 选取部分侵入岩(花岗岩、基性岩) 开展地球化学及锆石微结构、SHRIMP U-Pb 年代学研究, 并结合现有地质(包括年代学) 资料探讨其地质意义。

1 地质背景

区域地质调查结果(新疆地质矿产局, 1990) 揭示, 研究区由 3 个具有完全不同岩石组合的地质单元组成: 北天山、中天山以及南天山单元, 被两条北西西向断裂——中天山南缘断裂和中天山北缘断裂分开(肖序常等, 1992)(图 1)。北天山单元由石炭-二叠纪火山岩、火山碎屑岩及沉积碎屑岩组成(新疆地质局, 1988)。对于该单元的构造性质存在很大争议, 多数人称其为北天山弧(肖序常等, 1992; Allen *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1998); 另一些人则认为是石炭-二叠纪裂谷沉积(Xia *et al.*, 2004)。南天山的争议较少, 普遍认为是震旦纪至中泥盆世塔里木板块北缘的被动型大陆边缘沉积(肖序常等, 1992;

Allen *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1998)。中天山地块是伊犁-中天山微陆块的东延部分。根据沉积相对比以及古地磁资料分析, 该微陆块被认为是塔里木地块的一部分, 两者于震旦纪分开(Allen *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999), 并逐步形成南天山洋。该地块主要由不同类型的花岗岩组成(露头面积大于 70%), 出露少量前寒武纪结晶基底、元古宇变质地层以及早古生代浅变质沉积岩及火山碎屑岩(汤耀庆等, 1991)。在中天山地块的浅变质岩之上零星覆盖着若干未变质的早石炭世碎屑岩、碳酸盐岩地层。从变形角度看, 中天山块体内的花岗岩分为两类, 占绝大多数的是没有变形的似斑状花岗岩及二云母花岗岩以及少量闪长岩, 其野外产状、矿物组合及结构构造与南天山褶皱带内的未变形花岗岩十分类似。该花岗岩侵入到石炭纪地层中, 姜常义等(1999) 用锆石 U-Pb 法确定其侵位时代为晚石炭世末期至早二叠世末期(298~260Ma)。另一类花岗岩为强烈糜棱岩化的花岗岩, 发育透入性面理以及矿物拉伸线理(杨天南等, 2004)。这类花岗岩已有较多定年资料(Hopson *et al.*, 1989; 肖序常等, 1992; 吴文奎等, 1992; 陈义兵等, 1999; 韩宝福等, 2004), 主要为全岩 Rb-Sr 或 Sm-Nb 等时线年龄或单颗粒锆石年龄, 多为混合年龄, 只有少量的 SHRIMP U-Pb 数据(杨天南等, 2006), 地球化学资料也比较缺乏(Allen *et al.*, 1992; Li *et al.*, 2005)。

库米什地区位于东、西天山的分界区域, 一直被认为属于中天山单元的一部分(肖序常等, 1992)。库米什北约 60 km 出露干沟蛇绿岩, 与中、下奥陶统细碧-角斑岩、杂砂岩构造接触。库米什南约 20 km 出露榆树沟-硫磺山蛇绿混杂岩, 向南逆冲在中泥盆系碎屑岩-碳酸盐岩地层之上。库米什地区地层主要为志留系碎屑岩-碳酸盐岩沉积。吴文奎等(1990) 详细研究了该区志留系的古生物、沉积地球化学特点等, 认为其形成于早、中、晚志留世时的活动陆缘环境。1/20 万区域地质调查已经查明, 这套志留纪地层发生强烈变形, 形成大型褶皱构造(图 1), 其枢纽走向 NWW, 与中天山构造线的走向基本平行。库米什北侧为一宽达 30 km、长超过 100 km 的背斜构造, 而其南为一规模稍小的向斜构造。眼球状片麻岩沿着大型背斜构造的核部就位, 其被前

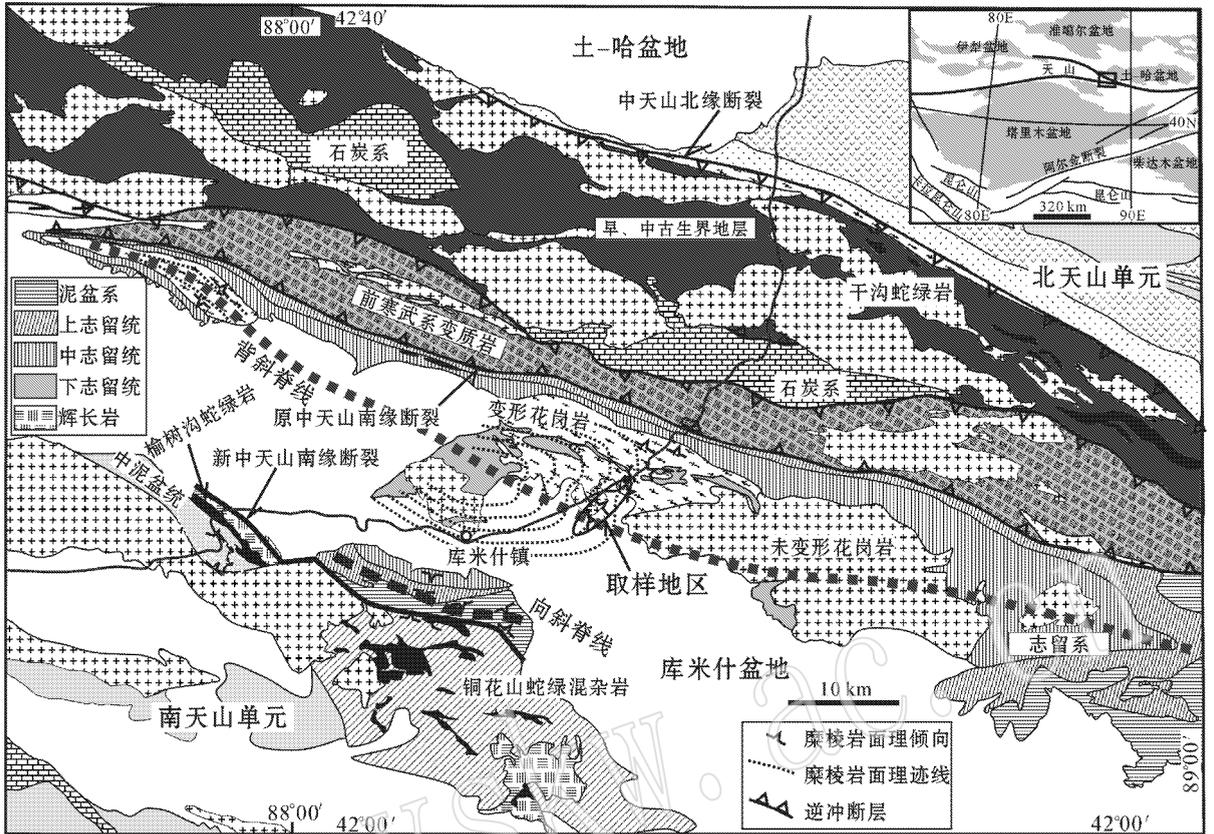


图1 库米什地区地质图(据新疆地矿局 1/20 万地质图修改)

Fig. 1 Geological map of Kumux area, Xinjiang (modified after unpublished 1/200 000 geological maps by Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource)

人认为是变质地层(混合岩)。笔者野外考察发现了清晰的侵入接触关系以及地层捕虏体等,表明其原岩应为花岗岩。该花岗岩发生强烈变形,形成糜棱岩或糜棱岩化岩石。值得特别指出的是,该糜棱岩化花岗岩的面理产状发生系统变化,其变化趋势与围岩地层产状的变化趋势接近一致,即糜棱岩面理的产状变化显示与地层褶皱一样的背斜构造。而且,这类变形侵入岩限定在背斜的核部(图1)。这种特点表明,岩体的侵入与褶皱变形密切相关。

详细的野外考察发现,原认为岩性单一的糜棱岩化花岗岩内部见大量小型基性团块,在地表露头上显示黑白相间的色调(图2a)。局部可见基性岩侵入到花岗岩中,但更常见的是花岗岩以脉状侵入于基性岩中。这种互相穿插关系表明两种岩石侵入时间可能相差不大,其中基性岩略早。基性岩石与花岗岩一样,也经历过强烈变形(图2b),但变形不均匀,局部保留堆晶构造(图2c)。笔者沿库米什以东的一条剖面对两类岩石连续取了16件新鲜样品,其

中基性岩8件,花岗岩8件,进行岩石化学分析,并对其中1件花岗岩样品进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究。

2 岩相学特征

前已述及,基性岩也经历过强烈变形,绝大部分样品中的岩浆结构已遭破坏,仅在部分样品中得以保留。具有堆晶结构的 x-106-1 样品保留较好的岩浆似斑状结构:斑晶为自形、粒径达1cm的辉石,其断续相连形成格架,空隙被细粒(<1 mm)的长石+单斜辉石充填。辉石斑晶具有低的干涉色(一级黄),推测为斜方辉石(尚需详细的矿物成分分析)。斑晶核部普遍包含片状黑云母包体,没有定向,没有切穿斑晶边界,平直的颗粒边界偶见熔蚀形成的港湾。其他基性岩样品均已强烈变形、变质,辉石被角闪石、黑云母替代,斜长石被绢云母、绿帘石替代。组成矿物有:斜长石(40%~50%),黑云母(20%~

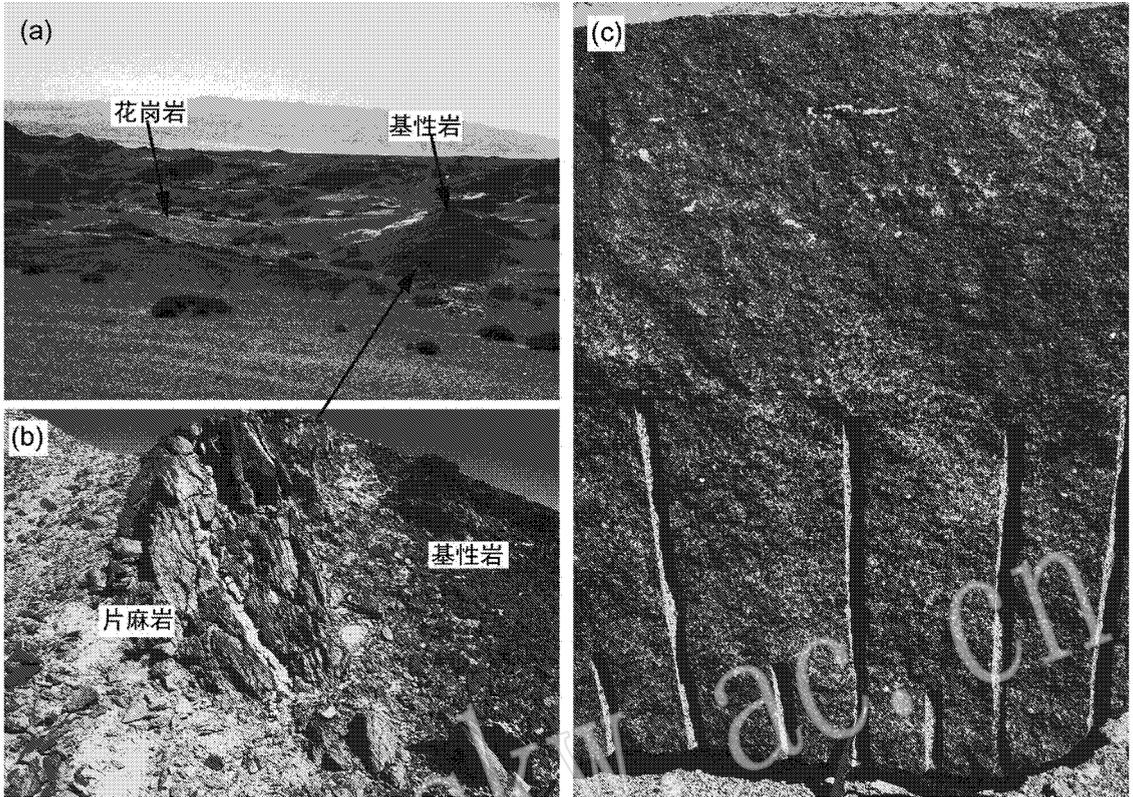


图 2 反映库米什地区侵入岩野外特点的照片

Fig. 2 Photographs showing field relationships of the plutons in Kumux area

a—露头远观, 示黑白相间的地表格局; b—变形花岗岩与变形基性岩的界线; c—野外可见的堆晶岩构造

a—granitic and basic plutons penetrating each other, resulting in a white-black mosaic pattern at surface; b—boundary between a granitic gneiss and a basic pluton; c—locally preserved layered cumulate-structure

30%) 角闪石(10%~20%)以及绿帘石等副矿物。

所有花岗岩样品已发生强烈塑性变形, 石英成条带状(体积含量大于20%), 长石(以钾长石为主)呈透镜(眼球)状, 黑云母定向排列。黑云母含量变化较大(5%~20%)。

3 样品与分析方法

岩石化学分析样品用无污染碎样仪破碎、研磨至200目, 送国家地质实验测试中心测试。绝大部分主量元素用X荧光光谱仪(3080E)分析; 稀土元素以及Sc、Cr、Co、Ni、Ga、Pb、Th、U用等离子质谱仪(Excell)分析; Ba、Cu、Sr、V、Zn、FeO、H₂O⁺、LOI用等离子光谱仪(IRIS)测试; Rb元素用X荧光光谱仪(2100)分析。结果见表1。

用于挑选锆石的样品X-107取自库米什以北, 地理坐标: 北纬42°18′49″, 东经88°24′10″。岩石为具有浅色条带的花岗质片麻岩, 糜棱岩化较强, 主要

矿物成分为: 长石(40%~50%)、石英(25%左右)、白云母(15%~20%)。样品(重约2 kg)经机械破碎后用常规重、磁法分选其中的锆石单矿物, 然后通过双目镜手工挑纯, 与标样一起置于环氧树脂样品座中, 然后研磨、抛光, 使锆石内部裸露, 以供显微照相、阴极发光观察及SHRIMP U-Pb同位素测试。

进行实验分析的样品锆石颗粒较小, 粒径约150 μm×70 μm, 以柱状为主, 长宽比1~3。颗粒晶形较好, 柱面、锥面均可见, 无色透明, 部分为浑圆状。在阴极发光图像上, 锆石多显示清晰的震荡式生长环带, 具岩浆结晶锆石的特点, 中心部位常见浑圆状核, 边部浅色次生边常见, 表明锆石形成后受过流体改造, 与强烈糜棱岩化的事实吻合。

阴极发光图像在中国地质科学院矿产资源研究所探针实验室完成; 锆石的Th-U-Pb同位素分析在北京离子探针中心的SHRIMP II按照标准测定流程(Compston *et al.*, 1984, 1992; Williams *et al.*, 1987; Williams, 1998)完成。待分析未知点与标样

表 1 库米什早泥盆世侵入岩全岩化学分析结果

Table 1 Bulk rock chemical analyses of Kumux Early Devonian plutons

样号	中、基性岩石								花岗岩							
	x104-1	x104-2	x104-3	x104-5	x105-1	x106-1	x106-3	x106-4	x104-4	x103-1	x103-2	x107-3	x107-4	x108-1	x108-2	x108-3
$w_B/\%$																
SiO ₂	48.30	49.51	53.20	54.06	43.86	51.19	50.90	50.44	67.35	67.38	77.23	66.59	73.93	73.75	72.68	74.30
TiO ₂	1.19	1.18	0.97	1.18	1.57	0.71	0.88	1.17	0.77	0.81	0.07	0.67	0.27	0.36	0.43	0.22
Al ₂ O ₃	19.59	19.14	22.46	18.22	16.90	9.73	13.25	20.67	14.26	14.79	12.01	15.02	14.27	13.44	13.18	12.88
Fe ₂ O ₃	2.95	3.00	1.64	2.42	3.05	2.21	2.45	2.12	1.83	3.69	0.19	1.12	0.48	1.04	1.04	0.94
FeO	6.41	5.55	3.34	4.51	7.53	5.71	5.68	5.44	3.47	1.63	0.65	4.22	1.37	1.31	1.84	0.84
MnO	0.11	0.11	0.04	0.11	0.16	0.15	0.15	0.08	0.07	0.08	0.02	0.10	0.03	0.04	0.03	0.03
MgO	4.76	4.65	2.18	4.45	7.66	13.82	10.87	3.81	1.72	1.66	0.34	2.61	0.42	0.58	0.82	0.37
CaO	7.30	6.77	6.00	6.59	8.28	10.42	8.64	5.78	3.85	2.59	0.76	1.72	3.18	1.40	1.24	0.80
Na ₂ O	3.53	3.27	4.92	3.62	1.18	1.80	2.55	4.13	3.51	3.42	3.52	2.71	4.26	4.31	3.97	2.89
K ₂ O	2.99	3.50	3.12	2.77	3.89	1.88	2.10	3.63	1.77	3.26	4.37	3.12	0.79	3.24	3.26	5.59
P ₂ O ₅	0.47	0.63	0.56	0.33	0.70	0.38	0.35	0.78	0.24	0.24	0.04	0.18	0.13	0.10	0.11	0.06
H ₂ O ⁺	1.40	1.66	1.11	1.34	3.88	1.10	1.22	1.22	0.84	0.54	0.20	2.10	0.50	0.40	1.21	0.68
CO ₂	0.37	0.37	0.37	0.37	1.21	0.45	0.29	0.37	0.12	0.20	0.20	0.29	0.12	0.20	0.37	0.29
Total	99.37	99.34	99.91	99.97	99.87	99.55	99.33	99.64	99.80	100.29	99.60	100.45	99.75	100.17	100.18	99.89
$w_B/10^{-6}$																
Ba	2 321	2 595	2 486	1 099	1 087	1 144	570	2 257	309	523	297	588	85	444	507	367
Rb	98.6	122	104	97.9	338	53.8	72.7	180	66.6	136	82.4	118	41	102	123	218
Sr	1 451	1 283	1 731	1 013	459	687	627	1 486	490	226	130	252	499	164	113	75.7
Y	26.8	30.6	13.5	39.4	50.7	22.3	33	32.6	45.6	39.6	33.8	28.1	29.8	35.3	41.1	37.8
Zr	126	249	351	198	69.1	123	172	322	249	302	103	197	180	180	207	146
Nb	24.7	15.5	10.6	13.1	14.2	9.22	17.1	19.7	18.1	23.8	9.54	15.2	12.6	4.81	20.3	19
Th	2.92	10.9	24.6	20.5	1.89	8.2	1.64	18.7	12.5	14.1	10.5	11.6	9.82	9.93	15.8	10.7
Pb	22	22.6	24.9	22.9	17.3	20.5	14.9	22.2	15.3	18.1	26.2	17.8	14.1	20.1	18	23.6
Ga	23.8	25	21.5	20.9	24.6	12.8	18.4	24.3	18.3	21	14.9	19.4	15.2	15.6	16	14.9
Zn	94.5	94.2	57.5	72.3	128	66	72.2	88.8	35.8	70.8	22	88.1	23.3	40.1	49.2	35.2
Cu	36.1	27	12.4	26.3	8.95	85.1	53.2	35.3	5.23	172	13.8	41.7	12.8	26.7	49.1	30.3
Ni	21	14.8	5.21	46.8	28.6	286	174	16.6	17.4	18.3	2.74	43.9	6.51	6.2	7.75	5.08
V	182	179	113	141	245	176	184	144	83.1	88.9	11.1	102	28.5	36.5	41.7	22.1
Cr	12.7	7.56	6.99	43.9	71.5	879	881	30.4	44.2	29.7	6.27	81.1	12.1	12.9	15.8	10.6
Hf	3.13	5.51	7.38	4.2	1.97	3.36	4.38	6.79	6.12	7.62	3.31	4.79	4.78	4.81	5.54	4.13
Sc	24.3	21.9	2.88	18	29.8	38.9	31.3	16.5	14.4	13.5	2.68	15.5	23.3	5.73	6.93	4.5
Ta	0.95	0.75	1.06	1.57	1	9.19	1.1	1.41	1.43	2.11	1.37	1.38	1.62	1.14	2.4	1.57
Co	27.3	32.4	12	30	38.9	52.5	42.8	20.4	11	12.6	1.33	16.7	3.13	5.1	5.81	2.57
U	0.84	1.76	1.97	2.82	2.6	2.09	1.57	1.61	2.4	2.82	1.94	2.23	2.37	0.98	1.54	1.02
La	23.8	43	97.9	61.3	21.1	54.7	25	95.1	35.2	41.1	10.8	34.4	22.5	30.9	39.9	23.4
Ce	52.8	81.3	169	119	52.3	105	70.7	171	69.4	84.5	25.3	67.9	43	62.8	79.7	46.5
Pr	7.15	10	17	13.9	8.11	12.7	10.2	19.3	8.28	9.9	3.02	7.68	5.34	7.01	9.1	5.47
Nd	31.9	40.7	54.6	51.3	40.2	49.6	43	70	30.9	37.4	11.6	28.4	19.5	25.5	32.6	19.7
Sm	7.71	8.74	6.81	9.35	10.8	9.06	9.16	12.1	6.84	7.89	3.47	5.65	4.46	5.49	6.88	4.66
Eu	1.75	1.8	1.55	2.22	2.34	2.21	2.17	2.38	1.3	1.28	0.39	1.24	0.57	0.81	0.89	0.45
Gd	6	6.61	3.27	7.05	9.2	6.12	6.75	7.81	6.23	6.61	3.32	4.73	4.09	4.72	6.32	4.51
Tb	0.9	1.03	0.46	1.17	1.53	0.84	1.02	1.12	1.14	1.16	0.74	0.79	0.83	0.91	1.12	0.9
Dy	4.91	5.66	2.26	6.86	9.02	4.35	5.84	5.96	7.28	6.63	5.18	4.52	5.22	5.58	7.01	5.79
Ho	0.97	1.08	0.43	1.3	1.72	0.79	1.16	1.09	1.57	1.38	1.08	0.94	1.07	1.17	1.41	1.21
Er	2.73	3.06	1.35	3.76	4.82	2.11	3.35	3.2	4.63	3.84	3.36	2.69	3.1	3.35	4.13	3.73
Tm	0.37	0.38	0.19	0.54	0.66	0.27	0.48	0.42	0.68	0.58	0.51	0.4	0.44	0.49	0.57	0.55
Yb	2.26	2.61	1.29	3.31	4	1.73	3.12	2.62	4.42	3.51	3.49	2.53	2.69	3.16	3.9	3.55
Lu	0.33	0.37	0.21	0.49	0.58	0.25	0.45	0.35	0.66	0.56	0.5	0.38	0.39	0.46	0.53	0.5

TEM 的点交叉进行分析。应用 RSE 的锆石 SL13 (572 Ma, 238×10^{-6}) 标定样品的 U、Th、Pb 含量, Temrra (417Ma) 进行年龄校正。数据处理采用 Ludwig 的 SQUID1.02 及 ISOPLOT 程序。普通铅根据实测的 ^{204}Pb 进行校正, 同位素比值误差为 1σ , 加权平均年龄具 95% 的置信度。

4 分析结果

4.1 地球化学特征

(1) 主量元素

8 个基性岩样品 SiO_2 含量为 43% ~ 54%, 除了 X105-1 外, 其他 7 个样品属辉长质(或玄武岩质), Al_2O_3 、 MgO 含量变化较大(分别为 9.7% ~ 22%、2.1% ~ 13.8%)。 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 4.0\%$, 其中 $\text{K}_2\text{O} \geq 2.0\%$ 。里特曼指数变化范围较大, 从 1.7 到 30, 其中 6 个样品大于 3.3, 涵盖钙性、钙碱性、碱性、过碱性岩类。在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图 3a)中, 所有样品点位于碱性岩区或碱性岩与亚碱性岩区的界限附近, 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中, 所有样品均落在钾玄岩或高钾系列区域(图 3b)。

8 个花岗岩样品 SiO_2 含量在 66% 到 77% 之间, 里特曼指数为 0.8 至 1.9, 属于广义的钙碱性酸性侵入岩。其他主量元素含量也有相当大的变化范围, 其变化趋势与 SiO_2 含量间没有明显的相关性。

(2) 稀土、微量元素

基性岩的稀土元素总量较高, 为 143×10^{-6} ~ 392×10^{-6} , 球粒陨石标准化配分型式为轻稀土元素强烈富集、重稀土元素相对亏损的右倾型 (La/Yb)_N = 3.6 ~ 24.5 (球粒陨石稀土元素数据根据 Mc-Donough and Sun, 1995)。

轻稀土元素分异明显, 重稀土元素也有分异, 4 个样品没有铈异常, 另 4 个样品显示极微弱的负铈异常(图 4b), 总体样式与北美 Serra Nevada 岩基东带基性岩(Gromet and Silver, 1987) 基本一致。在原始地幔标准化多元素图解(图 5b)上(元素排列按不相容性递减顺序, Hofmann, 1988), 8 个样品显示相似的配分样式: 强不相容、易迁移元素(K、Rb、Ba 等)及轻稀土元素强烈富集, 而强相容、不易迁移的 Ni、Cr 强烈亏损, 不易迁移的不相容元素 Nb 相对亏损。

花岗岩的稀土元素总量比基性岩低, 为 72×10^{-6} ~ 206×10^{-6} , 球粒陨石标准化配分型式为轻稀土元素强烈富集、重稀土元素相对亏损的右倾型 (La/Yb)_N = 2.1 ~ 7.9, 轻稀土元素分异明显, 而重稀土元素分异不明显, 所有样品均显示明显的负铈异常(图 4a)。运用洋脊花岗岩(ORG)标准化花岗岩样品微量元素所得的蜘蛛网图(图 5a, 元素排列按不相容性递减顺序, Hofmann, 1988)显示, 所有花岗岩具有相似的配分样式: 强不相容元素(K、Rb、Ba、Th)富集, 而相容元素, 如 Hf、Zr、Sm、Y、Yb 等则明显亏损, 与智利、牙买加岛弧花岗岩(Pearce et al., 1984)几乎完全一致。

4.2 SHRIMP 分析结果

锆石样品的阴极发光图像及分析点位置见图 6。对 X107 号样品的 18 个锆石颗粒的 19 个分析点进行了分析, 结果见表 2。由于锆石颗粒较小, 除了 1 个颗粒外, 其他颗粒只分析了 1 个点。所有分析点的 Th/U 比值均大于 0.1 (0.11 ~ 0.80), Th、U 含量之间具有良好的正相关关系, 显示岩浆型锆石特征。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

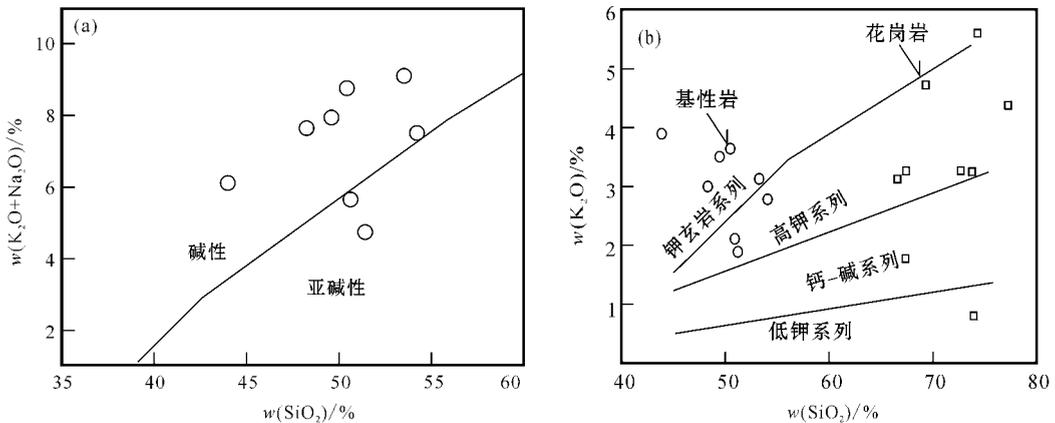


图 3 基性岩的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (a) 和侵入岩的 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (b) 关系图

Fig. 3 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram of basic rocks (a) and $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram of intrusive rocks (b)

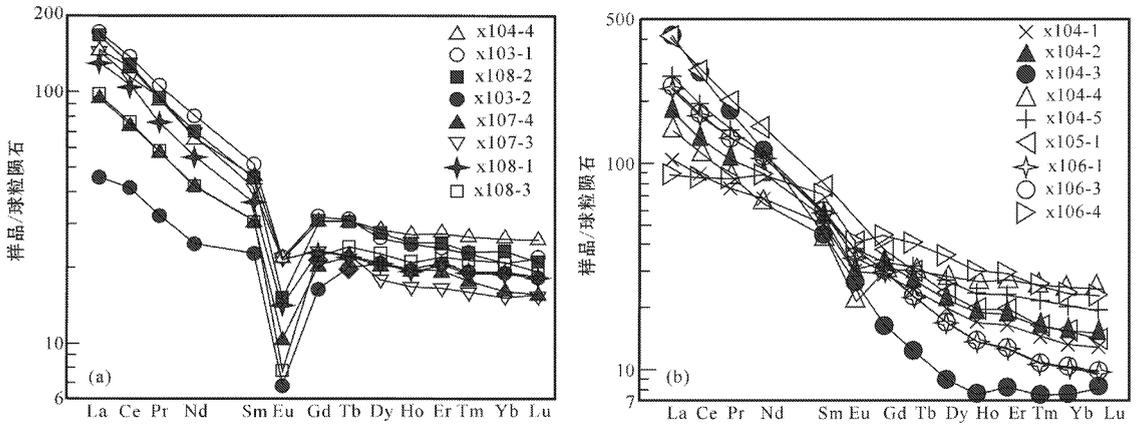


图 4 侵入岩的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of intrusive rocks

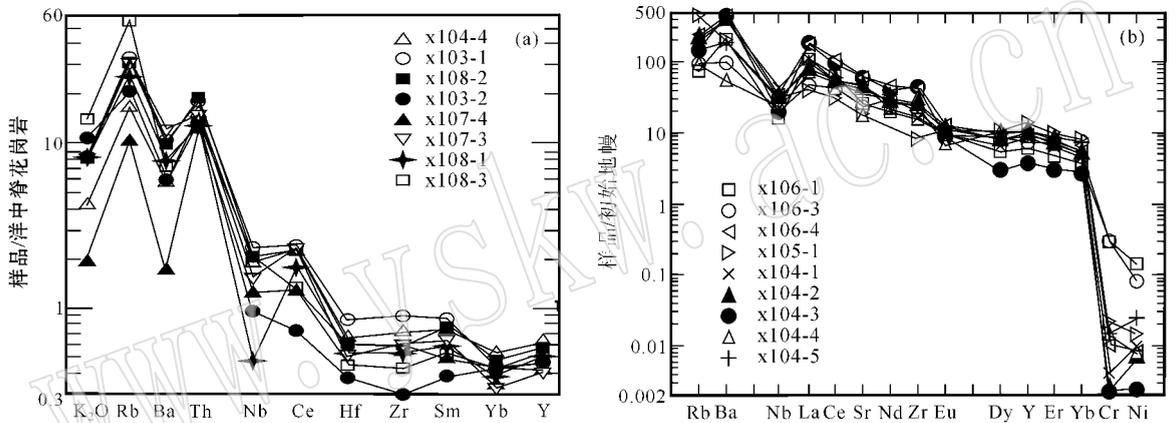


图 5 花岗岩样品微量元素洋中脊花岗岩标准化蛛网图 (a) 和基性岩微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b)

Fig. 5 ORG-normalized trace elements diagram of granite (a) and primitive mantle normalized trace elements diagram of basic rocks (b)

$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 投点均落在谐和线上或其附近 (图 7a), $t_{206/238}$ 介于 376~1 499 Ma 之间。位于锆石残留核位置的两个分析点 (8、13) 给出较老的表面年龄 (750、1 499 Ma), 而绝大部分位于清晰震荡环带上的分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较集中, 其中 12 个分析点在 U-Pb 谐和图上绘出 396 ± 4 Ma 的年龄, 其应该代表花岗岩的结晶年龄。位于残留核与具震荡环带接触部位的 10、12 号分析点给出 442 Ma 左右、没有地质意义的混合年龄。分析结果表明, 库米什花岗岩是前寒武纪地壳重熔形成的, 侵位时代在 396 Ma 左右, 就位后又经历过高温变形。

5 讨论

5.1 库米什早泥盆世侵入岩的岩浆演化过程

锆石阴极发光结构研究揭示, 花岗岩锆石内部具

有浑圆状残留核 (碎屑锆石), 表明该花岗岩可能是 (变质) 沉积岩局部熔融形成的。花岗岩主量元素地球化学特点与该结论吻合; 虽然 SiO_2 含量变化较大, 除了全铁含量与 SiO_2 含量成正比外, 其他元素含量变化没有规律, 与同源岩浆演化形成的岩石完全不同, 其成分特点主要反映源岩的成分, 应属 S 型。

在所有大地构造环境中, 辉长 (玄武) 质岩均被认为是地幔岩局部熔融的产物 (Hess, 1989), 其岩石化学特点可为探讨岩浆演化过程提供线索。库米什辉长质侵入岩与花岗岩成互相交错的侵入接触关系, 其侵入时代比较接近, 存在同化混染的可能。但从常量元素特点看, 混染的可能性不大。 SiO_2 是岩石中含量最高的组分, 若发生同化混染, 首先被均一化的就应该是该组分。但化学分析结果显示, 16 个样品可据 SiO_2 含量分为清晰的两组, 不存在过渡岩石 (图 3b), 比 Si 元素更难迁移的稀土、微量元素则更没有被均一

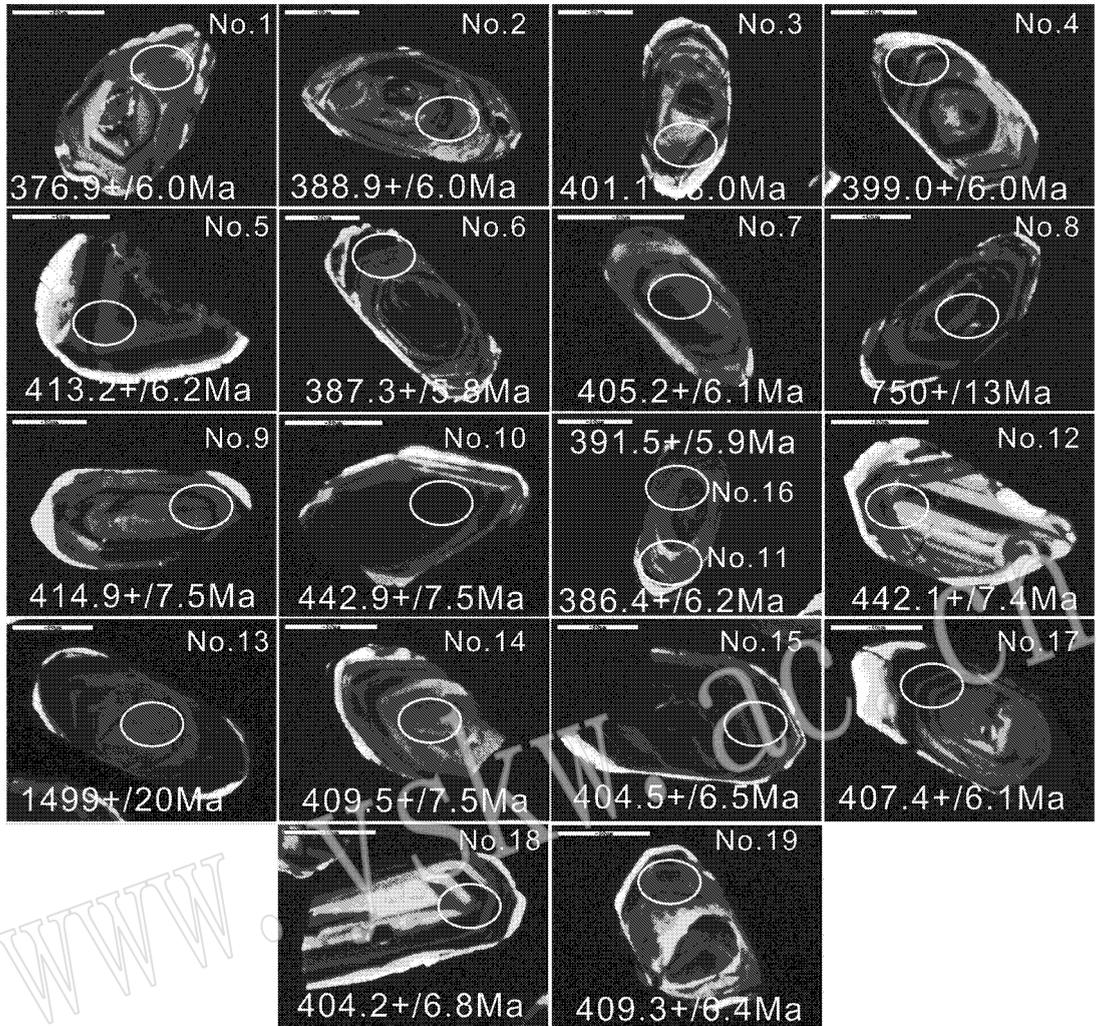


图 6 锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images showing grain shape and zonation features of zircons from granitic gneiss

化改造的可能。基于同样的理由,笔者认为后岩浆阶段的变质、变形也没有明显地改变岩石的化学特点。

初始岩浆结晶分异过程可能在岩石化学中留下痕迹。玄武质岩浆的结晶分异过程主要涉及橄榄石、辉石、斜长石及钛铁氧化物的分异结晶。8个辉长质样品基本没有明显的负钨异常(图4b)。辉石与残余岩浆间的Rb/Sr元素分配系数差别在10倍以上(Hess, 1989)。辉石的结晶分异将造成Rb/Sr比值急剧增高,而8个辉长质样品的Rb/Sr比值都很低。橄榄石与钛铁氧化物的结晶分异将造成SiO₂含量的增高,显然全岩主要元素分析结果没有发现相关变化。因而,库米什辉长质岩石的岩石化学特征主要反映源区及局部熔融特征。

岩石化学分析结果表明,库米什玄武质侵入岩强烈富集LREE、强不相容元素(K、Rb、Ba等)(图4b、

5b)表明源岩应为强烈富集的地幔橄榄岩。极高的Sr含量指示有沉积来源的Sr进入。值得指出的是,库米什基性侵入岩的HREE也有明显的分异现象(图4b)表明在局部熔融过程中有残留石榴石形成。从熔体与残留矿物的元素分配系数看,只有石榴石的形成能造成重稀土元素的明显分异(Hess, 1989)。源区岩石的这种地球化学特点与俯冲带上盘地幔楔比较吻合。一般认为,富含水分的大洋板块岩石被俯冲到一定深度后发生脱水反应,形成富含不相容且易迁移元素的流体,进入上覆地幔楔,交代地幔橄榄岩,形成富集地幔。这类富集地幔发生局部熔融,形成岩浆岩。

从全岩成分看,库米什基性岩的钾含量较高,属于钾玄岩(shoshonite)或高钾玄武岩系列。这类岩石一般在岛弧或陆弧岩浆活动的较晚阶段形成,而且产

表 2 库米什变形花岗岩锆石 U-Th-Pb 高精度离子探针分析结果

Table 2 U-Th-Pb SHRIMP results of Kumux deformed granite

点号	$^{206}\text{Pb}/\%$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{232}\text{Th}/$	$^{238}\text{U}/$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/$	$\pm \%$	errcorr	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
		$\omega_{\text{U}}/10^{-6}$	$\omega_{\text{Th}}/10^{-6}$	^{238}U	^{206}Pb	^{206}Pb		^{235}U		年龄/Ma			
X107-1	0.74	340	61	17.7	0.19	16.61	1.6	0.0562	4.5	0.467	4.8	0.344	376.9 ± 6.0
X107-2	1.13	400	58	21.4	0.15	16.08	1.6	0.0630	4.1	0.540	4.4	0.362	388.9 ± 6.0
X107-3	3.94	254	67	14.1	0.27	15.58	2.1	0.0862	9.8	0.763	10	0.204	401.1 ± 8.0
X107-4	1.93	470	87	25.8	0.19	15.66	1.6	0.0685	5.3	0.603	5.5	0.284	399.0 ± 6.0
X107-5	1.92	537	66	30.6	0.13	15.11	1.6	0.0695	6.7	0.634	6.9	0.225	413.2 ± 6.2
X107-6	1.45	563	69	30.0	0.13	16.15	1.5	0.0658	2.1	0.562	2.6	0.588	387.3 ± 5.8
X107-7	0.92	684	214	38.2	0.32	15.41	1.5	0.0606	4.1	0.542	4.4	0.350	405.2 ± 6.1
X107-8	1.37	569	202	60.4	0.37	8.11	1.8	0.0716	2.3	1.218	3.0	0.616	750 ± 13
X107-9	3.87	345	112	19.8	0.34	15.04	1.9	0.0803	5.1	0.736	5.4	0.346	414.9 ± 7.5
X107-10	6.99	408	46	25.0	0.12	14.06	1.6	0.109	14	1.07	14	0.111	442.9 ± 6.8
X107-11	2.30	419	62	22.3	0.15	16.19	1.7	0.0709	6.8	0.604	7.0	0.235	386.4 ± 6.2
X107-12	6.61	203	46	12.4	0.24	14.09	1.7	0.0969	8.7	0.948	8.9	0.196	442.1 ± 7.4
X107-13	3.34	499	176	112	0.36	3.820	1.5	0.1862	0.62	6.72	1.6	0.926	1.499 ± 20
X107-14	3.00	330	55	18.6	0.17	15.25	1.9	0.0759	8.2	0.686	8.4	0.226	409.5 ± 7.5
X107-15	3.32	306	32	17.2	0.11	15.44	1.7	0.0735	6.3	0.656	6.6	0.252	404.5 ± 6.5
X107-16	2.29	519	108	27.9	0.22	15.97	1.6	0.0720	3.0	0.622	3.4	0.462	391.5 ± 5.9
X107-17	1.71	567	68	31.9	0.12	15.33	1.5	0.0663	2.5	0.596	3.0	0.521	407.4 ± 6.1
X107-18	2.85	326	253	18.1	0.80	15.45	1.7	0.0761	5.5	0.679	5.8	0.301	404.2 ± 6.8
X107-19	2.52	360	59	20.3	0.17	15.26	1.6	0.0718	4.7	0.649	4.9	0.325	409.3 ± 6.4

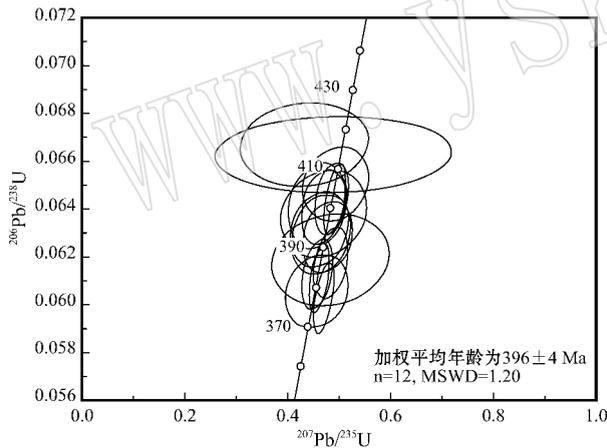


图 7 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 Concordia diagram of SHRIMP U-Pb data for zircons from granitoid gneiss

于陆弧的岩浆一般比产于岛弧的更富钾,东太平洋陆弧火山岩研究结果表明,钾玄岩仅在地壳较薄的北段发育(Hess, 1989)。因而,笔者认为库米什玄武质岩石形成于地壳厚度不大的活动陆缘环境。这一结论与吴文奎等(1990)对库米什地区早、中、晚志留系沉积岩的研究结果吻合。

在辉长岩的辉石斑晶核部发育大量黑云母,表明岩浆具较高含水量,这种特点与晚期岩浆的推论吻

合。而野外观察显示,花岗岩侵位比辉长岩略晚。综合上述讨论内容,库米什侵入岩可能具有如下演化过程:南天山洋向北俯冲于中天山陆块之下,俯冲板块脱水,流体进入上覆地幔楔,引起地幔岩石局部熔融,形成陆弧火山岩。在陆弧岩浆活动的晚期,高钾玄武岩(或钾玄岩)侵入中下地壳,同时长期的岩浆活动加热地壳,使地壳岩石发生局部熔融,形成花岗岩。

本文没有报道同时期的中性(安山质)岩浆岩,但并不等于中天山内不发育安山质岩浆岩。在研究区以西的巴伦台地区,早泥盆世闪长岩比较常见,最近笔者用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法分析了巴伦台南大型变形闪长岩的侵入时代,结果($403 \pm 2.2 \text{ Ma}$, 文稿正准备中)与本区花岗岩时代接近。

5.2 库米什基性岩浆岩与榆树沟蛇绿岩的可能关系

榆树沟蛇绿岩位于库米什以南约 20 km,由于其叠加有麻粒岩相变质作用(王润三等, 1999)而引人注目。王润三等(1999)研究发现该蛇绿岩套由变质橄榄岩、变质超镁铁-镁铁质堆晶岩、变质玄武岩以及变质沉积岩组成。锆石 SHRIMP U-Pb 结果(周鼎武等, 2004)表明,该蛇绿岩发生麻粒岩相变质时代为 390 ± 11 、 $392 \pm 7 \text{ Ma}$, 该结果与库米什以北陆弧型花岗岩的时代($396 \pm 4 \text{ Ma}$) 在误差范围内一致。据此推测,库米什陆弧型岩浆活动是由于榆树沟蛇绿岩套所代表

的洋壳向北俯冲过程形成的地幔局部熔融及玄武岩浆上涌带来的热量引起中、下地壳的局部熔融,分别形成玄武质侵入岩及重熔型花岗岩,并使部分岩石发生麻粒岩相变质。

5.3 大地构造意义

中天山地块内早泥盆世陆弧型侵入岩十分普遍(杨天南等 2006)。目前基本可以认为,中天山存在由南天山洋向北俯冲形成的中生代陆弧。本研究结果显示,库米什以北地区也应该属于该陆弧范围内,而现今的南天山单元普遍认为属塔里木板块的北部被动陆缘环境。前人将中、南天山单元的界线置于库米什以北,而笔者认为,在库米什地区,将中、南天山地质单元的界线置于库米什以南、榆树沟蛇绿岩以北比较合适(图 1)。这一推论与库米什地区发育志留-早泥盆世活动陆缘型沉积岩的观察结果(吴文奎等, 1990)吻合。

致谢:在锆石 SHRIMP U-Pb 分析过程中刘敦一教授提供了诸多方便,王彦斌研究员协助完成 SHRIMP U-Pb 测试,陈振宇博士帮助获取阴极发光图像,匿名审稿人的审查意见为本文增色不少,笔者在此深表感谢。

References

- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1992. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, central Asia [J]. *Tectonophysics*, 220 : 89~115.
- Chen C, Lu H, Jia D, *et al.* 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: an oblique collisional orogeny [J]. *Tectonophysics*, 302 : 23~40.
- Chen Yibing, Hu Aiqin, Zhang Guoxin, *et al.* 1999. Granitic Zircon U-Pb geochronology and its geologic implications, Du-Ku highway, western Tianshan, China [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 44(21): 2 328~2 332 (in Chinese).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale [J]. *Journal of the Geological Society*, London, 149 : 171~184.
- Compston W, Williams I S and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe [J]. *Journal of Geophysical Research*, 89 (Supplement): B325~B534.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. *Tectonophysics*, 287 : 213~231.
- Gromet L P and Silver L T. 1987. REE variations across the Peninsula Ranges batholith: Implications for batholithic Petrogenesis and crustal growth in magma arcs [J]. *Journal of Petrology*, 28 : 75~125.
- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, *et al.* 2004. Zircon U/Pb dating and geochemical features of the Earlier Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: implications for tectonic evolution [J]. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4~11 (in Chinese with English abstract).
- Hess P C. 1989. *Origins of Igneous Rocks* [M]. Cambridge: Harvard University Press.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 90 : 297~314.
- Hopson C, Wen J, Tilton G, *et al.* 1989. Paleozoic plutonism in East Jungger, Bogdashan and eastern Tianshan, NW China [J]. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 70 : 1 403~1 404.
- Hu A, Jahn B M, Zhang G, *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characteristics of basement rocks [J]. *Tectonophysics*, 328(1~2): 15~52.
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, *et al.* 2001. New advance in isotopic geochemical research into Precambrian continental basement of northern Xinjiang [A]. *Basic Research of Metal Mineral Resources of Xinjiang* [C]. Beijing: Science Press, 137~156 (in Chinese).
- Jahn B M, Griffin W L and Windley B. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia [J]. *Tectonophysics*, 328 : Preface, viii~x.
- Jiang Changyi, Mu Yanmei, Bai Kaiyin, *et al.* 1999. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of granitoids in the Southern Tianshan mountains, western China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 : 298~308 (in Chinese).
- Li Jinyi. 1995. Main characteristics and intrusion history of Eastern Jungger ophiolite, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11 : 73~84 (in Chinese).
- Li Jinyi. 2004. Neo-Proterozoic and Paleozoic Tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China [J]. *Geological Reviews*, 50 : 304~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Q G, Liu S W, Han B F, *et al.* 2005. Geochemistry of metasedimentary rocks of the Proterozoic Xingxingxia complex: implications for provenance and tectonic setting of the eastern segment of the central Tianshan tectonic zone, northwestern China [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42 : 287~306.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101 : 635~643.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120 : 223~253.
- Pearce J A, Harris B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Tang Yaoqing and Zhao Min. 1991. Plate tectonic evolution of the Chinese Tianshan [A]. Xiao Xuchang and Tang Yaoqing. Tectonic evolution of the southern margin of the Paleo-Asian composite megasuture [C]. Beijing: Scientific and Technical Publishing House, 109~124 (in Chinese).

Wang Runsan, Wang Juli, Zhou Dingwu, *et al.* 1999. Study on the Yushugou granulite-facies ophiolite, southern Tianshan [J]. *Geologic Sciences*, 34: 166~176 (in Chinese).

Wang Z, Sun S, Li J, *et al.* 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and Geochronological constrains from the ophiolites [J]. *Tectonics*, 22(2): 1014, doi: 10.1029/2002TC001396.

Williams I S. 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe [A]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of Micro-analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.

Williams I S and Claesson S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97, 205~217.

Wu Wenkui, Jiang Changyi and Yang Fu. 1990. Petrologic and mathematic Geology studies on the Silurian sedimentary rocks, south of Kumish, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geological Sciences*, 2: 99~112 (in Chinese).

Wu Wenkui, Jiang Changyi and Yang Fu. 1992. Paleozoic Geological Evolution and Metallogenesis of Kumish Area [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Publish House (in Chinese).

Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China [J]. *GSA Bulletin*, 116(3/4): 419~433.

Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Regional Geology of Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, *et al.* 2006. Early Devonian continental arc in the Central Tianshan (China): evidences from zircon SHRIMP dating and geochemical analyses [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 41~48 (in Chinese).

Yang Tiannan, Li Jinyi, Wen Zhongtian, *et al.* 2004. Structural observations along Houxia-Wuwamen section, middle segment of Chinese Tianshan Range [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 310~318 (in Chinese with English abstract).

Zhou Dingwu, Su Li, Jian Ping, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP dating and its tectonic implications of the Yushugou high-pressure granulite terrane, Southern Tianshan belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1411~1415

(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈义兵 胡霏琴 张国新, 等. 1999. 西天山独库公路花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *科学通报* 44(21): 2328~2332.
- 韩宝福 何国琦 吴泰然, 等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *新疆地质* 22(1): 4~11.
- 胡霏琴 张国新 张前锋, 等. 2001. 新疆北部大陆前寒武纪基底同位素地球化学研究新进展 [A]. 新疆矿产资源的基础研究 [C]. 北京: 科学出版社, 137~156.
- 姜常义 穆艳梅 白开寅, 等. 1999. 南天山花岗岩的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境 [J]. *岩石学报* 15(2): 298~308.
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的主要特征及其侵位历史 [J]. *岩石学报* 11(增刊): 73~84.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代和古生代构造格局及其演变 [J]. *地质论评* 50(3): 304~322.
- 汤耀庆 赵民. 1991. 中国天山板块构造演化 [A]. 肖序常 汤耀庆. 古中亚复合巨型缝合带南缘的构造演化 [C]. 北京: 北京科学技术出版社, 109~122.
- 王润三 王居里 周鼎武. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究 [J]. *地质科学* 34(2): 166~176.
- 吴文奎 姜常义 杨复. 1990. 库米什南部志留系地层及其岩石学与数学地质特征 [J]. *新疆地质科学* 2: 99~112.
- 吴文奎 姜常义 杨复. 1992. 库米什地区古生代地壳演化及成矿规律 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 肖序常 汤耀庆 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及邻区大地构造 [M]. 北京: 地质出版社.
- 新疆地质矿产局. 1990. 新疆地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 杨天南 李锦轶 孙桂华, 等. 2006. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗岩质糜棱岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年证据 [J]. *岩石学报*, 22(01): 41~48.
- 杨天南 李锦轶 文中田, 等. 2004. 中天山地块南北两缘的韧性剪切带 [J]. *地质学报* 78(3): 310~318.
- 周鼎武 苏犁 简平, 等. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义 [J]. *科学通报* 49(14): 1411~1415.