

东天山伊吾二叠纪花岗质杂岩体的锆石定年、地球化学及其构造意义*

汪传胜^{1,2,3} 张遵忠^{1**} 顾连兴^{1,2} 吴昌志² 唐俊华¹ 李中华^{1,2} 冯慧² 雷如雄²

WANG ChuanSheng^{1,2,3}, ZHANG ZunZhong^{1**}, GU LianXing^{1,2}, WU ChangZhi², TANG JunHua¹, LI ZhongHua^{1,2}, FENG Hui² and LEI RuXiong²

1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007

2. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093

3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

1. Eastern China Geoexploration & Development Bureau for Non-Ferrous Metals, Jiangsu Province, Nanjing 210007, China

2. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2009-03-03 收稿, 2010-02-22 改回.

Wang CS, Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Tang JH, Li ZH, Feng H and Lei RX. 2010. Zircon geochronology and geochemical characteristics of the Permian granitic complex at Yiwu, eastern Tianshan: Their tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1045 – 1058

Abstract The Yiwu granitic complex is mainly composed of a monzogranite and an alkali-feldspar granite phases. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating gave ages of 284.6 ± 1.4 Ma and 284.0 ± 1.1 Ma for the monzogranite and alkali-feldspar granite, respectively, indicating their Early-Permian emplacement in accompany with post-collisional compression-extension transition. Petrological, geochemical and isotopic studies suggest that these rocks were evolution products from the same magma. In comparison with the monzogranite, the alkali-feldspar granite is higher in Si, alkali, DI and Rb/Sr, and richer in Th, U, Nb and Ta, but lower in Al, Sr, P, Ti, Sm, Nb-Ta and Zr/Hf. A continuous differentiation trend is exhibited from monzogranite to alkali-feldspar granite. Model ages (t_{DM}) are calculated to be 693 Ma and 763 Ma for the monzogranite and alkali-feldspar granite, respectively. Both rock types are higher in $\varepsilon_{Nd(t)}$ (+4.53 and +4.64, respectively) and lower in $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.703858 and 0.703855, respectively). It is suggested that the magma for the Yiwu granitic complex was produced by partial melting of a Neoproterozoic depleted-mantle-sourced juvenile mafic crust, and the alkali-feldspar granite represents the residue of the monzogranite parental magma after fractionation of plagioclase, apatite, Ti-Fe-oxides, sphene, monazite, allanite, zircon etc.

Key words Granitic complex; Fractional crystallization; Residue magma; Post-collision; Eastern Tianshan

摘要 伊吾花岗质杂岩体主要由二长花岗岩和碱长花岗岩构成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析得到二长花岗岩和碱长花岗岩的侵位年龄分别为 284.6 ± 1.4 Ma 和 284.0 ± 1.1 Ma。结合地质证据, 此年龄表明该杂岩体形成于碰撞之后的二叠纪早期挤压-伸展转折阶段。岩石学、地球化学和同位素等方面的对比研究表明这两种岩石为同一岩浆演化的产物。与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩表现为硅、碱的含量较高, 而铝的含量较低; 富 Th、U、Nb、Ta, 贫 Sr、P、Ti、Sm; DI 和 Rb/Sr 升高, Nb-Ta 和 Zr/Hf 下降, 从二长花岗岩到碱长花岗岩表现出连续分异演化的趋势。计算得到二长花岗岩和碱长花岗岩的模式年龄 (t_{DM}) 分别为 693 Ma 和 763 Ma, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 分别为 +4.53 和 +4.64, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 分别为 0.703858 和 0.703855, 表现出高 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的特征。这些特征表明, 伊吾岩体的岩浆来自新元古代时从亏损地幔分离出来的初生地壳源区。二长花岗岩岩浆是这种初生地壳岩浆演化的产物, 而碱长花岗岩形成于二长花岗岩母岩浆经斜长石、磷灰石、钛铁氧化物、榍石、独居石、褐帘

* 本文受“国土资源部百名优秀青年科技人才计划”、国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411301-4, 2001CB409802)、国家自然科学基金基金项目(40472042, 40672040, 40603008)和西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金(06LCD02)联合资助。

第一作者简介: 汪传胜, 男, 1971 年出生, 博士, 主要从事岩石学和地球化学研究, E-mail: wangcsah@126.com

** 通讯作者: 张遵忠, 男, 1968 年生, 副研究员, 从事火成岩与地球化学研究, E-mail: njuzhang@126.com

石和锆石等矿物分离结晶后的残留岩浆。

关键词 花岗质杂岩体;分离结晶;残留岩浆;后碰撞;东天山

中图法分类号 P588.121;P597.3

成岩过程及构造意义。

1 引言

伊吾岩体主要由二长花岗岩和碱长花岗岩构成,因其地处偏僻,地质研究程度较低,人们尚未对其进行过系统的研究。在东天山和其它地区,二长花岗岩也经常和碱长花岗岩密切伴生,如哈尔里克地区的小铺东岩体和八大石岩体(Gu *et al.*, 1999)、康滇地区摩掌营岩体(郭春丽等,2007)、葡萄牙北部的伊比利亚岩体(Dias *et al.*, 1998),等等。但是,这两种岩石为何密切伴生,目前尚不完全清楚。本文将对伊吾岩体的二长花岗岩和碱长花岗岩进行系统的岩相学、地球化学和同位素年代学研究,以便探讨这两种岩石的成因联系、

2 地质概况

伊吾岩体出露于伊吾县城北,呈不规则的椭圆形侵入石炭系灰色、灰绿色凝灰岩、安山玢岩、凝灰砂岩、石英角斑岩、硬砂岩和砾岩中。这些地层在石炭纪末受到了强烈变形。岩体长约50km,宽约7km,面积约为367km²(图1),长轴方向与区域构造线基本一致,但明显地切割地层。岩体与围岩接触面外倾,倾角50°~60°。围岩因受热力作用形成宽约几十米到二百米不等的角岩化带。此带内尚未发现有价值的接触交代矿床,仅含少量原生黄铁矿、黄铜矿及次生的孔雀

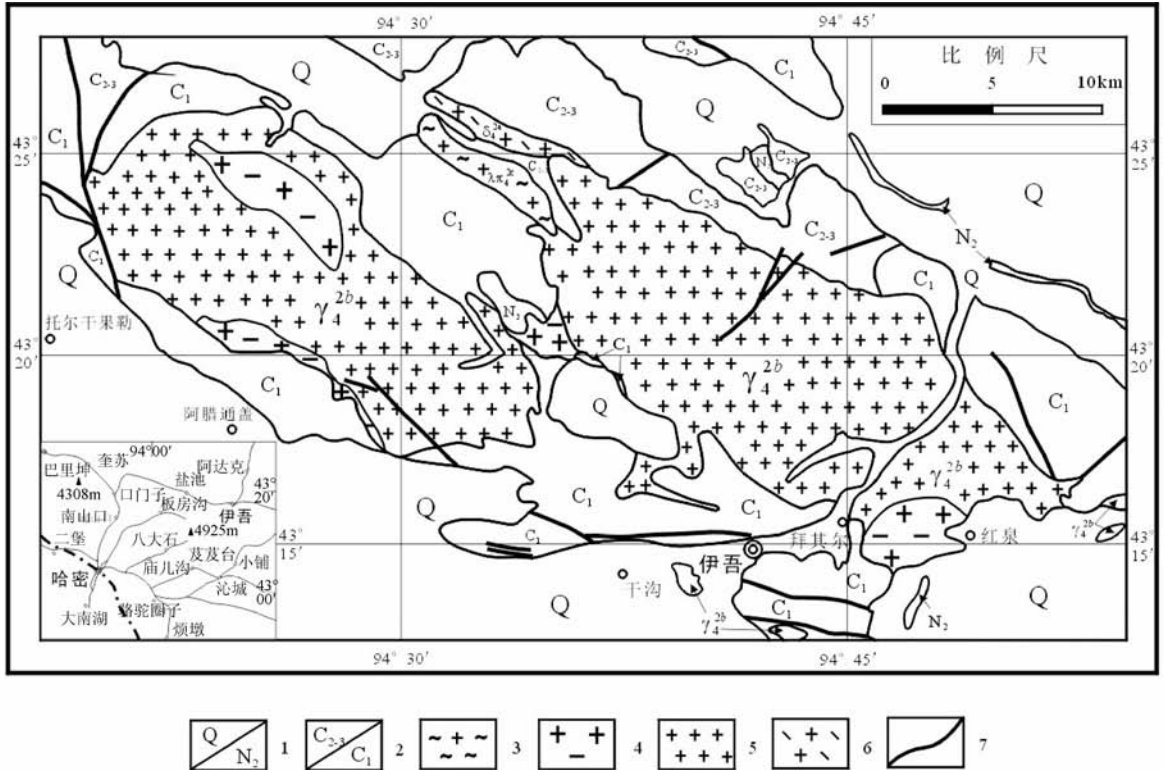


图1 伊吾岩体地质略图(据新疆地质局,1966^①,1967^②和新疆地质矿产局第六地质大队,1984^③修编)

1-第四系和第三系;2-中-上石炭统和下石炭统;3-晚古生代晚期灰黄色石英斑岩;4-晚古生代中期肉红色碱长花岗岩;5-晚古生代中期灰白、浅肉红色二长花岗岩;6-晚古生代早期灰绿、暗绿色闪长岩;7-断裂。各样品的采集位置分别为:X-537,94°49'33"E,43°18'16"N;X-538,94°49'33"E,43°18'11"N;X-540,94°49'24"E,43°18'09"N;X-541,94°49'19"E,43°18'14"N;X-542,94°49'43"E,43°17'57"N;X-543,94°49'34"E,43°17'40"N;X-544,94°47'46"E,43°15'16"N;X-545,94°47'46"E,43°15'14"N;X-546,94°47'38"E,43°15'04"N;X-547,94°47'38"E,43°15'03"N;X-623,94°49'03"E,43°18'10"N;X-627,94°47'08"E,43°14'59"N

Fig. 1 Geological sketch map of the Yiwu plutons

① 新疆地质局. 1966. 地质矿产图淖毛湖幅(1:20万). 王广耀编图

② 新疆地质局. 1967. 地质矿产图伊吾幅(1:20万). 地质测量大队清绘

③ 新疆地质矿产局第六地质大队. 1984. 新疆哈密岩浆岩图(1:50万). 王新花编图

表 1 伊吾岩体中斜长石和钾长石电子探针分析结果 (wt%)

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclases and k-feldspar from the Yiwu plutons (wt%)

岩性 矿物	二长花岗岩								碱长花岗岩								
	斜长石				钾长石				钾长石				斜长石				
点号	X-538 -1	X-538 -2	X-538 -3	X-538 -4	X-538 -5	X-538 -6	X-538 -7	X-538 -8	X-544 -1	X-544 -2	X-544 -3	X-544 -4	X-546 -1	X-546 -2	X-544 -5	X-544 -6	X-546 -3
SiO ₂	65.00	63.62	64.94	64.32	63.61	63.98	64.98	64.62	65.49	66.01	64.79	65.91	65.32	65.15	71.75	70.28	70.73
TiO ₂	0.07	0.01	0.03	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	23.50	23.90	23.34	23.42	23.92	23.60	18.91	18.78	17.85	17.78	17.79	17.65	17.85	18.12	19.93	19.70	19.73
FeO	0.11	0.16	0.15	0.10	0.20	0.19	0.15	0.06	0.00	0.05	0.03	0.10	0.00	0.05	0.05	0.00	0.08
MnO	0.00	0.00	0.06	0.00	0.06	0.04	0.02	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.00
CaO	4.06	4.40	3.59	3.85	4.49	4.19	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.16	0.13
Na ₂ O	8.15	8.38	8.65	8.23	8.22	7.65	0.75	0.86	0.03	0.08	0.06	0.06	0.07	0.26	8.43	10.32	8.38
K ₂ O	0.32	0.37	0.13	0.16	0.17	0.39	15.15	14.59	16.70	16.02	16.96	16.42	16.79	15.38	0.05	0.06	0.02
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
Total	101.2	100.9	100.9	100.1	100.7	100.1	100.0	99.0	100.1	100.0	99.6	100.2	100.0	99.1	100.4	100.5	99.1
Ab	76.8	75.8	80.8	78.6	76.0	74.8	7.0	8.2	0.3	0.7	0.5	0.5	0.6	2.5	99.3	98.8	99.0
An	21.2	21.9	18.5	20.4	23.0	22.7	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.8	0.9
Or	2.0	2.2	0.8	1.0	1.0	2.5	92.8	91.6	99.7	99.3	99.5	99.3	99.4	97.5	0.4	0.3	0.1

注: 矿物化学成分由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 JEOL JXA-8800M 型电子探针仪分析. 测试条件为: 加速电压 15kV, 束流 10nA, 特征峰测量时间 10s, 背景测量时间 5s, 数据采用 ZAF 方法修正. 表 2 中矿物的测试方法与此相同

石薄膜、蓝铜矿和褐铁矿。

按出露面积由大到小的顺序, 伊吾岩体的岩性主要为灰白-浅肉红色二长花岗岩, 其次为肉红色碱长花岗岩, 并有少量石英斑岩和闪长岩 (图 1)。在野外, 可见到碱长花岗岩侵入于二长花岗岩中, 接触界线清晰。在接触带附近, 二长花岗岩受到轻度的钾长石化。这两种岩石总体上均为块状构造, 未受到后期的强烈变形, 仅局部受到剪切变形的影响。

3 岩相学特征

二长花岗岩呈灰色、灰白色至浅肉红色, 似斑状花岗结构; 矿物组成为斜长石 23% ~ 44%, 钾长石 26% ~ 38%, 石英 15% ~ 31%, 角闪石 2% ~ 4%, 黑云母 5% ~ 10%, 副矿物包括磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等, 其总量小于 2%; 斑晶粒径 5 ~ 8mm, 其量不超过 30%, 斑晶主要为浅肉红色钾长石, 局部含斜长石和角闪石。基质粒径 0.2 ~ 2mm。

碱长花岗岩呈肉红色, 中细粒花岗结构; 矿物组成为钾长石 55% ~ 62%, 石英 30% ~ 35%, 斜长石 5% ~ 8%, 黑云母 3% ~ 5%, 少量副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石等。从二长花岗岩到碱长花岗岩, 斜长石含量减少, 钾长石及石英含量增多, 暗色矿物减少。

主要造岩矿物长石、黑云母和角闪石的特征如下:

斜长石: 在二长花岗岩中, 斜长石呈板状自形-半自形晶, 在基质中粒径 0.5 ~ 2.5mm, 斑晶粒径 7mm 左右, 牌号 An₁₈₋₂₃ (表 1), 为更长石, 表面多受到绢云母化; 在碱长花岗岩中, 斜长石的牌号 An_{0.3-0.9} (表 1), 为钠长石, 板柱状半自形-自形晶, 粒径 0.5 ~ 1.5mm, 细密聚片双晶发育, 部分受到

泥化。

钾长石: 二长花岗岩的钾长石主要为条纹长石, 他形厚板状, 粒径 1 ~ 5mm, 镜下可见少量钠长石出溶体; 碱长花岗岩中的钾长石主要为条纹长石, 其次为微斜长石, 半自形-他形, 粒径 0.5 ~ 2mm。与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩中的钾长石钾含量较高而钠含量较低 (表 1)。

黑云母: 二长花岗岩中黑云母多发现于基质中, 呈 0.2 ~ 1mm 的半自形鳞片状, 多色性明显 (Ng = 暗褐色, Np = 黄色), 其电子探针分析结果列于表 2, 在黑云母分类图解 (图 2) 中主要投影在铁质黑云母区域, 少量为镁质黑云母。碱长花岗岩中黑云母呈半自形-他形鳞片状, 粒径 0.2 ~ 0.8 mm, 多色性明显 (Ng = 草绿色或暗褐色, Np = 黄色), 并普遍受到强烈绿泥石化。

角闪石: 二长花岗岩中角闪石呈自形-半自形柱状晶体, 粒径 0.3 ~ 1.2mm, 多色性较明显 (Ng = 深绿色, Np = 黄色或黄绿色), 其电子探针分析结果列于表 2, 在国际角闪石分类命名图解 (IMA-CNMMN, 1997) 中落入铁角闪石区。碱长花岗岩中未见角闪石。

4 地球化学

4.1 主量元素

主量元素、微量元素和同位素样品的采集及分析方法与汪传胜等 (2009) 相同, 为同批次测试样品。所测结果列于表 3, 并借助 MinPet2.0 计算程序得到岩石的 CIPW 标准矿物及主要岩石化学参数。伊吾二长花岗岩 SiO₂ 含量为 65.93% ~ 73.75%, Al₂O₃ 含量为 12.27% ~ 15.25%, K₂O + Na₂O 含

表 2 伊吾二长花岗岩中黑云母和角闪石电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Electron microprobe analyses of biotites and amphiboles from the Yiwu monzogranite(wt%)

矿物 点号	黑云母(X-538)					黑云母(X-540)							矿物 点号	角闪石(X-540)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7		8	9	10	11	12
SiO ₂	36.58	36.59	36.45	36.65	36.34	35.51	34.75	36.79	36.92	36.83	36.38	36.25	SiO ₂	46.02	47.15	46.56	46.37	46.21
TiO ₂	4.02	3.70	3.88	3.79	3.44	2.95	2.79	3.80	4.01	4.21	3.36	3.58	TiO ₂	1.49	1.23	1.33	1.56	1.45
Al ₂ O ₃	13.06	13.43	13.61	13.32	14.11	16.52	13.63	15.36	13.91	14.85	14.28	15.19	Al ₂ O ₃	6.43	5.48	7.57	7.45	5.89
FeO*	22.71	22.46	22.22	23.26	23.85	24.62	25.28	22.46	22.47	22.26	23.41	21.15	FeO*	18.73	18.26	19.00	19.27	19.48
MnO	0.21	0.20	0.22	0.24	0.20	0.35	0.31	0.30	0.37	0.26	0.31	0.24	MnO	0.72	0.75	0.62	0.63	0.77
MgO	10.01	10.26	10.14	10.01	9.09	11.72	10.95	10.43	10.53	10.33	10.68	10.78	MgO	11.27	11.61	10.85	10.52	10.68
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.18	0.01	0.00	0.02	0.04	0.19	CaO	10.96	11.07	10.99	11.11	11.37
Na ₂ O	0.09	0.02	0.09	0.11	0.09	0.09	0.06	0.14	0.07	0.08	0.09	0.11	Na ₂ O	1.59	1.22	1.42	1.50	1.33
K ₂ O	8.99	9.15	9.05	9.15	9.69	6.12	6.13	8.98	8.77	8.86	8.21	7.41	K ₂ O	0.51	0.39	0.40	0.43	0.46
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00								Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00
Cr ₂ O ₃						0.00	0.11	0.02	0.06	0.08	0.00	0.00	Total	97.71	97.18	98.73	98.86	97.63
Total	95.67	95.80	95.66	96.55	96.79	98.01	94.18	98.29	97.10	97.77	96.75	94.90	Si ⁴⁺	7.27	7.46	7.24	7.21	7.32
Si ⁴⁺	5.81	5.79	5.77	5.77	5.71	5.48	5.62	5.66	5.76	5.71	5.70	5.76	Al ³⁺	0.73	0.54	0.76	0.79	0.68
Al ³⁺	2.19	2.21	2.23	2.23	2.29	2.52	2.38	2.35	2.24	2.29	2.30	2.24	Al ³⁺	0.47	0.48	0.63	0.58	0.42
Al ³⁺	0.25	0.29	0.31	0.24	0.33	0.48	0.22	0.44	0.32	0.42	0.33	0.60	Ti ⁴⁺	0.18	0.15	0.16	0.18	0.17
Ti ⁴⁺	0.48	0.44	0.46	0.45	0.41	0.34	0.34	0.44	0.47	0.49	0.40	0.43	Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.83	0.89	0.84	0.97	1.11	0.58	0.74	0.83	0.73	0.66	0.85	0.31	Mg ²⁺	0.17	0.18	0.14	0.15	0.18
Fe ²⁺	2.19	2.08	2.10	2.10	2.02	2.60	2.68	2.06	2.20	2.22	2.21	2.50	Fe ²⁺	2.48	2.42	2.47	2.51	2.58
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	Mn ²⁺	1.51	1.56	1.43	1.39	1.43
Mn ²⁺	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	Mg ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg ²⁺	2.37	2.42	2.39	2.35	2.13	2.70	2.64	2.39	2.45	2.39	2.49	2.55	Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Mn ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	Ca ²⁺	1.86	1.88	1.83	1.85	1.93
Na ⁺	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	Na ⁺	0.14	0.12	0.17	0.15	0.07
K ⁺	1.82	1.85	1.83	1.84	1.94	1.21	1.27	1.76	1.75	1.75	1.64	1.50	Na ⁺	0.34	0.25	0.26	0.31	0.34
FM	0.48	0.46	0.47	0.47	0.49	0.49	0.50	0.46	0.47	0.48	0.47	0.49	K ⁺	0.10	0.08	0.08	0.09	0.09

注:FeO*为全铁,先用郑巧荣(1983)方法计算得到黑云母Fe₂O₃含量,再用MinPet2.0计算其结构式,FM=(Fe³⁺+Fe²⁺)/(Mg²⁺+Fe³⁺+Fe²⁺),为铁镁指数;角闪石分子式中离子系数以23个氧原子计算,其中Fe³⁺与Fe²⁺按Schumacher(1997)方法计算

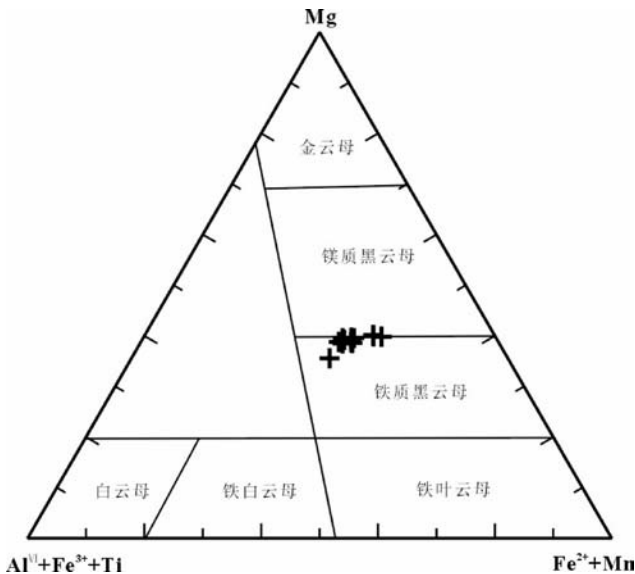


图2 伊吾二长花岗岩中黑云母的分类图解(据 Foster, 1960)
Fig. 2 Classification diagram of biotites from the Yiwu monzogranites (after Foster, 1960)

量为7.45%~8.10%,碱度率A.R为2.40~3.93;碱长花岗岩的SiO₂含量为70.43%~76.17%,Al₂O₃含量为11.87%~13.04%,K₂O+Na₂O的含量为7.94%~8.45%,碱度率A.R为3.82~5.38;与二长花岗岩相比,碱长花岗岩中硅、碱较高,而铝较低。在SiO₂-K₂O图上(图3),两岩体均投影在高钾钙碱性花岗岩区域。二长花岗岩和碱长花岗岩的铁镁指数FM分别为0.62~0.80和0.61~0.82,两者较为接近,但分异指数DI分别为75.7~87.9和85.2~95.0,后者DI明显较高,表明碱长花岗岩经历了进一步的岩浆分异。

经MinPet2.0计算得到伊吾岩体标准矿物石英(Q)、钾长石(Or)、钠长石(Ab)和钙长石(An)的含量,然后采用国际地科联(IUGS)火成岩分类学分会推荐的实际矿物含量QAP分类方案进行投影(图4),可以看出投影点基本分布在二长花岗岩、花岗岩和碱长花岗岩区域。二长花岗岩投影点向左移可能有两个原因:(1)本来岩石中钾长石含量不均匀,有些岩石中钾长石含量较高(实际矿物含量中钾长石含量为26%~38%),局部存在普通花岗岩;(2)二长花岗岩赋存于黑云母中的钾,在CIPW计算时均纳入了钾长石(CIPW计算

表3 伊吾岩体主量元素含量(wt%)、CIPW标准矿物及主要岩石化学参数

Table 3 Major element contents (wt%), CIPW normative minerals and main petrochemical parameter for the Yiwu plutons

岩性	二长花岗岩						碱长花岗岩			
	X-537	X-538	X-540	X-541	X-542	X-543	X-544	X-545	X-546	X-547
SiO ₂	69.86	71.30	68.33	73.75	68.25	65.93	76.17	74.65	70.43	72.29
TiO ₂	0.32	0.33	0.46	0.22	0.47	0.53	0.10	0.16	0.33	0.25
Al ₂ O ₃	13.75	13.29	14.41	12.27	15.00	15.25	11.87	11.93	12.98	13.04
Fe ₂ O ₃	0.83	0.77	1.00	0.52	1.00	1.06	0.33	0.94	1.28	1.03
FeO	2.81	2.18	2.95	2.83	2.69	3.08	1.34	2.42	2.82	2.09
MnO	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.08	0.02	0.06	0.06	0.04
MgO	0.74	0.78	1.12	0.46	1.12	1.41	0.20	0.41	1.40	0.59
CaO	1.89	1.91	2.63	1.07	2.51	3.15	0.43	0.66	1.05	1.26
Na ₂ O	3.92	3.89	4.34	3.13	4.17	4.36	3.84	3.66	4.08	3.75
K ₂ O	4.18	3.95	3.11	4.80	3.57	3.22	4.60	4.28	4.13	4.37
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.15	0.06	0.15	0.18	0.04	0.06	0.11	0.08
LOI	0.52	0.79	0.96	0.19	0.67	0.93	0.60	0.50	1.28	0.54
Total	98.99	99.35	99.53	99.36	99.66	99.16	99.54	99.69	99.96	99.35
Q	25.00	28.04	23.15	32.60	22.34	18.81	34.65	33.80	25.52	29.55
Or	25.11	23.71	18.66	28.63	21.33	19.39	27.50	25.51	24.76	26.16
Ab	33.65	33.36	37.21	26.68	35.60	37.51	32.80	31.17	34.95	32.08
An	7.65	7.20	10.77	5.00	11.70	12.71	1.55	2.95	4.63	5.86
C	0.00	0.00	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.19	0.11	0.01
Di(Wo)	0.53	0.76	0.66	0.00	0.00	0.89	0.16	0.00	0.00	0.00
Di(En)	0.17	0.31	0.27	0.00	0.00	0.41	0.03	0.00	0.00	0.00
Di(Fs)	0.38	0.46	0.39	0.00	0.00	0.47	0.13	0.00	0.00	0.00
Hy(En)	1.71	1.67	2.57	1.16	2.83	3.18	0.47	1.03	3.55	1.49
Hy(Fs)	3.74	2.51	3.62	4.53	3.50	3.65	1.94	3.54	3.73	2.68
Mt	1.22	1.13	1.47	0.76	1.46	1.56	0.48	1.37	1.88	1.51
Il	0.62	0.64	0.89	0.42	0.90	1.02	0.19	0.31	0.64	0.48
Ap	0.22	0.22	0.33	0.13	0.33	0.40	0.09	0.13	0.24	0.18
A/CNK	0.95	0.94	0.94	1.00	0.98	0.93	0.98	1.01	0.99	0.99
NK/A	0.80	0.80	0.73	0.84	0.71	0.70	0.95	0.89	0.86	0.84
ALK	8.10	7.83	7.45	7.93	7.74	7.58	8.45	7.94	8.21	8.12
A. R	3.15	3.12	2.55	3.93	2.58	2.40	5.38	4.42	3.82	3.63
FM	0.73	0.67	0.66	0.80	0.64	0.62	0.82	0.82	0.61	0.74
DI	83.8	85.1	79.0	87.9	79.3	75.7	95.0	90.5	85.2	87.8

注: Q-石英; Ab-钠长石; Or-钾长石; An-钙长石; C-刚玉; Di(Wo, En, Fs)-分别指透辉石中硅灰石、顽火辉石和正铁辉石的组份; Hy(En, Fs)-分别指紫苏辉石中顽火辉石和正铁辉石的组份; Mt-磁铁矿; Il-钛铁矿; Ap-磷灰石. 铝饱和指数 $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$, mol; 碱性指数 $NK/A = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$, mol; 全碱含量 $ALK = Na_2O + K_2O$ (wt%); 碱度率 $A. R = (Al_2O_3 + CaO + ALK) / (Al_2O_3 + CaO - ALK)$ (Wright, 1969); 铁镁指数 $FM = (Fe^{3+} + Fe^{2+}) / (Mg^{2+} + Fe^{3+} + Fe^{2+})$; DI 为分异指数

中没有 Bi 这一项)。二长花岗岩铝饱和指数 A/CNK 值为 0.93 ~ 1.00, 碱性指数 NK/A 为 0.70 ~ 0.84; 碱长花岗岩 A/CNK 值为 0.98 ~ 1.01, NK/A 为 0.84 ~ 0.95; 两岩体均投影在亚碱性准铝质区域(图 5), 符合同熔型花岗岩的化学成分

特征(徐克勤等, 1989)。

从氧化物协变图解(图 6)可看出, 二长花岗岩与碱长花岗岩统一构成连续分异演化趋势, 化学成分上相互过渡, 其 K₂O 的含量与 SiO₂ 的含量呈正相关, Al₂O₃、CaO、

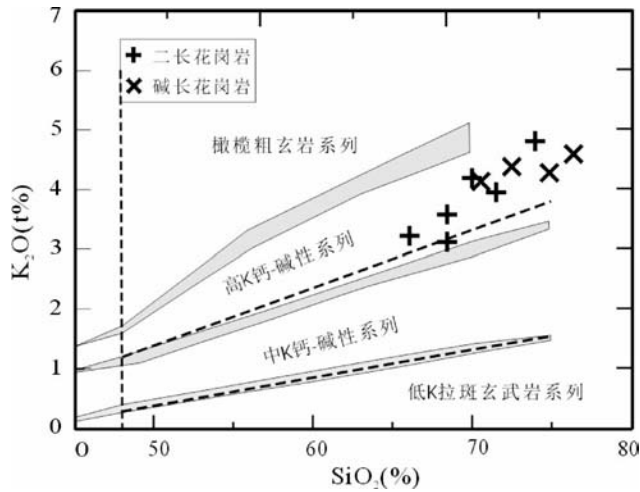


图3 SiO₂-K₂O 亚碱性火成岩分类 (据 Peccerillo *et al.*, 1976; Le Maitre *et al.*, 1989)

Fig. 3 SiO₂ vs. K₂O diagram for division of sub-alkaline igneous rocks (after Peccerillo *et al.*, 1976; Le Maitre *et al.*, 1989)

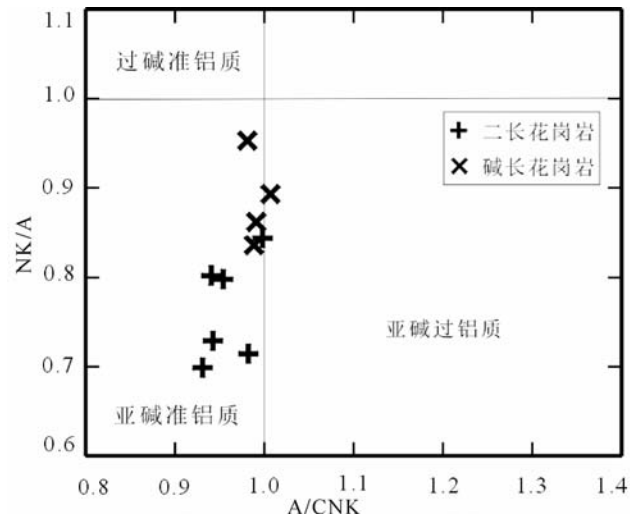


图5 伊吾岩体 A/CNK - NK/A 图解

Fig. 5 A/CNK vs. NK/A diagram for the Yiwu plutons

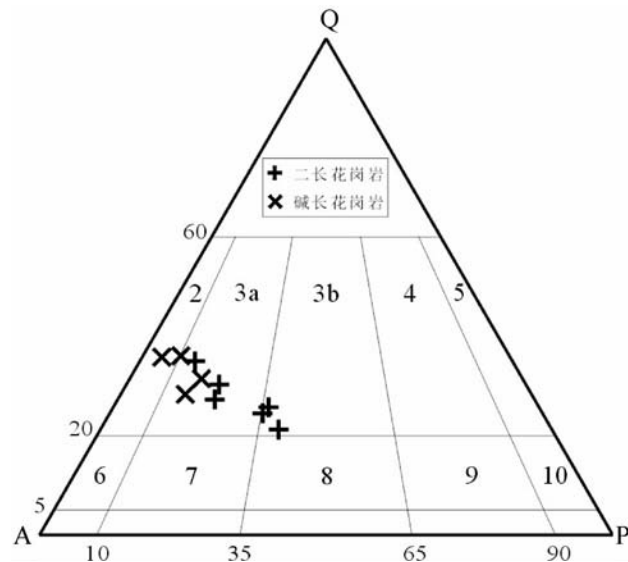


图4 伊吾岩体 QAP 分类图解

(1) Q-石英, A-碱性长石, P-斜长石, 2-碱性花岗岩和碱性长石花岗岩, 3a-花岗岩, 3b-二长花岗岩, 4-花岗闪长岩, 5-斜长花岗岩 (英云闪长岩), 6-石英碱长花岗岩, 7-石英正长岩, 8-石英二长岩, 9-石英二长闪长岩, 10-石英闪长岩; (2) 按 Or/An 比例分配 Ab, 即 $A = Or \times T, P = An \times T, T = (Or + Ab + An) / (Or + An)$, 为了投影于 Q-A-P 图解上, 已将 Q, A, P 三个组分含量% 重新换算为 100%

Fig. 4 QAP classification diagram for the Yiwu plutons

Na₂O、FeO^T (将 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 全部换算成 Fe²⁺)、MgO、TiO₂ 和 P₂O₅ 的含量与 SiO₂ 的含量呈负相关, 表明岩浆中镁铁矿物、斜长石、磷灰石等矿物的分离结晶对岩系演化起着重要作用。

4.2 稀土元素

由表 4 和图 7 可知, 二长花岗岩 Σ REE、 Σ LREE 和 Σ HREE 的含量分别为 $137 \times 10^{-6} \sim 189 \times 10^{-6}$ 、 $127 \times 10^{-6} \sim 168 \times 10^{-6}$ 和 $10.2 \times 10^{-6} \sim 20.8 \times 10^{-6}$; $(La/Sm)_{CN}$ 、 $(Gd/Yb)_{CN}$ 和 $(La/Yb)_{CN}$ 分别为 3.7 ~ 5.8、1.0 ~ 1.4 和 6.8 ~ 13.6; δ_{Eu} 为 0.45 ~ 0.70。碱长花岗岩 Σ REE、 Σ LREE 和 Σ HREE 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 $84.6 \times 10^{-6} \sim 145 \times 10^{-6}$ 、 $70.7 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$ 和 $13.9 \times 10^{-6} \sim 14.8 \times 10^{-6}$; $(La/Sm)_{CN}$ 、 $(Gd/Yb)_{CN}$ 和 $(La/Yb)_{CN}$ 分别为 4.1 ~ 5.1、0.6 ~ 1.2 和 3.7 ~ 9.2; δ_{Eu} 为 0.29 ~ 0.61。总体上, 两岩体均表现出稀土总量较低, 富轻稀土, 贫重稀土, 轻稀土分馏强于重稀土分馏, 配分曲线为右倾型, 铕为中等负异常, 这些特征与我国华南同熔型花岗岩相似 (徐克勤等, 1989)。与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩的 Σ REE、 Σ LREE 和 $(La/Yb)_{CN}$ 均明显较低, Eu 的负异常更显著。

4.3 微量元素

由表 4 和图 8 可知, 二长花岗岩和碱长花岗岩均富含 Rb 和 Ba 等大离子亲石元素 (LILE) 和 Th、U、Hf 和 Zr 等高场强元素 (HFSE), 而贫 Ta、Nb、Sr 和 Ti 等元素。二长花岗岩中富集元素 Rb 和 Ba 含量分别为 $114 \times 10^{-6} \sim 158 \times 10^{-6}$ 和 $179 \times 10^{-6} \sim 581 \times 10^{-6}$; Th、U、Hf 和 Zr 的含量 ($\times 10^{-6}$) 分别为 $14.12 \times 10^{-6} \sim 44.59 \times 10^{-6}$ 、 $2.54 \times 10^{-6} \sim 4.38 \times 10^{-6}$ 、 $4.98 \times 10^{-6} \sim 8.54 \times 10^{-6}$ 和 $154 \times 10^{-6} \sim 356 \times 10^{-6}$; 亏损元素 Ta、Nb 和 Sr 含量分别为 $1.03 \times 10^{-6} \sim 1.64 \times 10^{-6}$ 、 $6.88 \times 10^{-6} \sim 12.7 \times 10^{-6}$ 和 $108 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$; Nb/Ta 和 Zr/Hf 分别为 6.7 ~ 9.4 和 30.9 ~ 41.7, Rb/Sr 为 0.4 ~ 1.4。碱长花岗岩中富集元素 Rb 和 Ba 的含量分别为 $131 \times 10^{-6} \sim 165 \times 10^{-6}$ 和 $180 \times 10^{-6} \sim 626 \times 10^{-6}$; Th、U、Hf 和 Zr 的含量

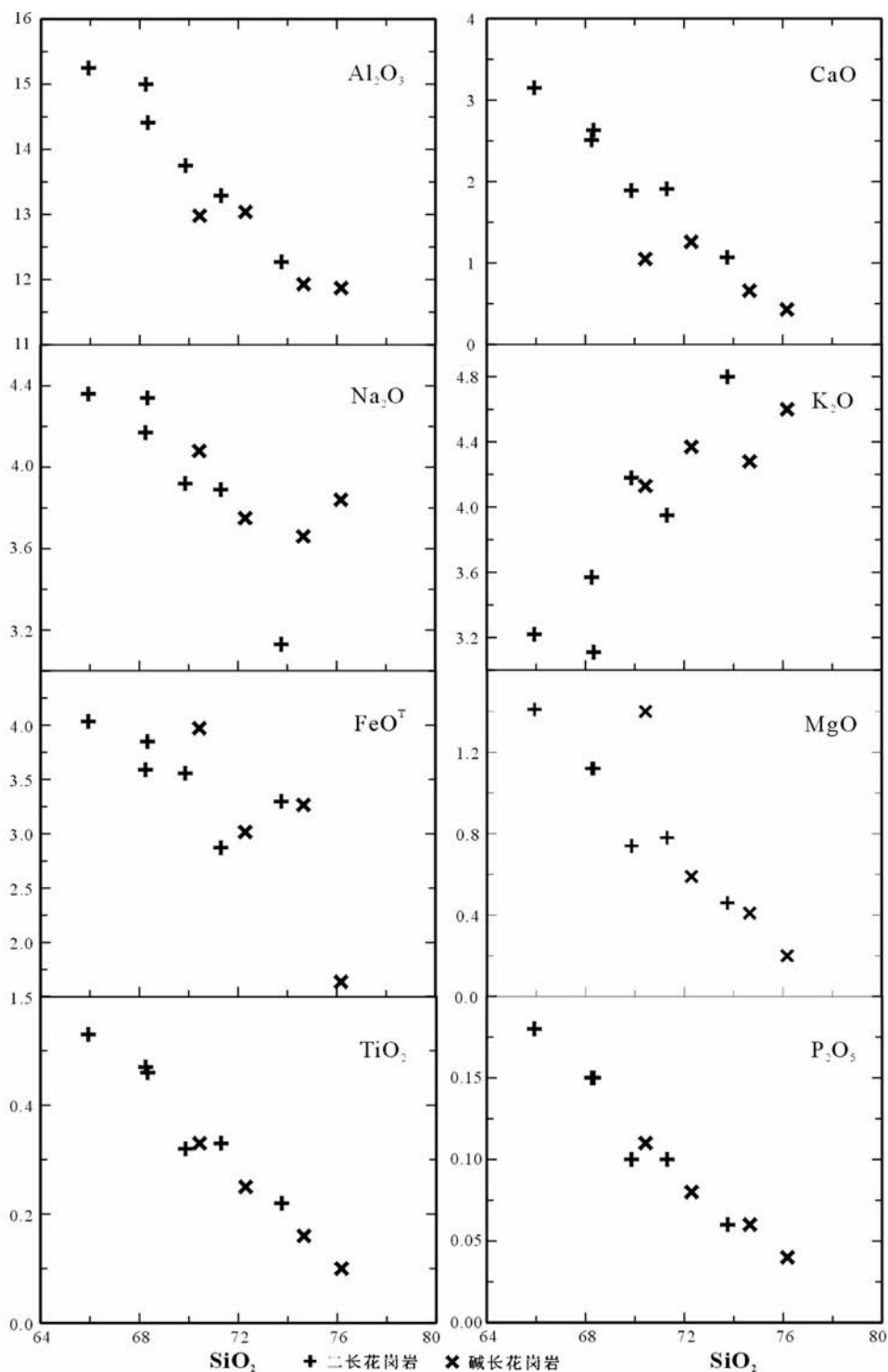


图6 伊吾岩体主要氧化物含量(%)与 SiO_2 (%)协变图解

Fig.6 Variation diagram of the main oxides (%) vs SiO_2 (%) for the Yiwu plutons

分别为 $16.43 \times 10^{-6} \sim 24.85 \times 10^{-6}$ 、 $2.88 \times 10^{-6} \sim 4.12 \times 10^{-6}$ 、 $3.60 \times 10^{-6} \sim 6.24 \times 10^{-6}$ 和 $83.9 \times 10^{-6} \sim 199 \times 10^{-6}$ ；亏损元素 Ta、Nb 和 Sr 的含量分别为 $1.58 \times 10^{-6} \sim 3.27 \times 10^{-6}$ 、 $12.6 \times 10^{-6} \sim 18.4 \times 10^{-6}$ 和 $56.3 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$ ；Nb/Ta 和 Zr/Hf 分别为 5.2 ~ 8.0 和 23.3 ~ 33.1，Rb/Sr 为

0.9 ~ 2.4。两岩体各种微量元素的含量比较接近，原始地幔标准化曲线亦非常相似，但与二长花岗岩相比，碱长花岗岩中 Sr、P、Ti 和 Sm 的含量略低，Th、U、Nb 和 Ta 的含量略高；Nb/Ta 和 Zr/Hf 均下降，Rb/Sr 升高。

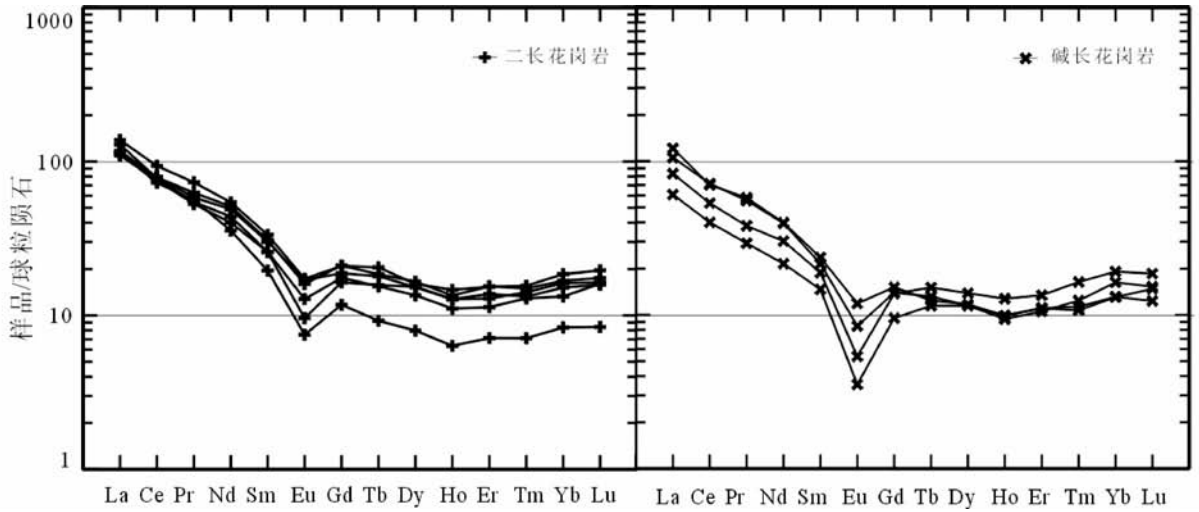


图7 伊吾岩体球粒陨石标准化稀土配分模式(标准化数据引自 Boynton, 1984)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns for the Yiwu Plutons (chondrite values from Boynton, 1984)

表4 伊吾岩体稀土元素和微量元素分析数据($\times 10^{-6}$)

Table 4 Rare earth and trace element contents from the Yiwu Plutons ($\times 10^{-6}$)

岩性 样品号	二长花岗岩						碱长花岗岩			
	X-537	X-538	X-540	X-541	X-542	X-543	X-544	X-545	X-546	X-547
La	39.92	33.96	42.75	35.28	36.26	34.80	18.80	25.72	37.52	32.70
Ce	62.93	61.10	75.62	58.77	63.68	64.29	32.31	43.11	56.54	57.89
Pr	6.66	6.46	8.93	6.86	7.64	7.13	3.57	4.63	7.04	6.76
Nd	26.30	24.04	32.55	21.36	30.66	29.36	12.94	18.09	23.86	23.66
Sm	5.05	5.03	6.51	3.82	6.01	5.86	2.86	3.68	4.61	4.20
Eu	0.94	0.71	1.27	0.55	1.18	1.25	0.26	0.40	0.87	0.62
Gd	4.54	4.25	5.42	3.04	5.46	4.86	2.47	3.56	3.92	3.61
Tb	0.73	0.75	0.97	0.44	0.88	0.85	0.54	0.72	0.59	0.62
Dy	4.35	4.95	5.15	2.56	5.34	4.91	3.70	4.46	3.78	3.71
Ho	0.80	0.92	1.05	0.46	0.97	0.91	0.68	0.91	0.71	0.71
Er	2.37	2.70	3.22	1.50	3.24	2.90	2.21	2.82	2.33	2.32
Tm	0.42	0.46	0.50	0.23	0.48	0.43	0.40	0.53	0.37	0.35
Yb	2.78	3.39	3.88	1.75	3.51	3.17	3.40	4.00	2.74	2.73
Lu	0.52	0.53	0.63	0.27	0.56	0.51	0.49	0.60	0.40	0.48
Σ REE	158	149	188	137	166	161	84.6	113	145	140
Σ LREE	142	131	168	127	145	143	70.7	95.6	130	126
Σ HREE	16.5	17.9	20.8	10.2	20.4	18.5	13.9	17.6	14.8	14.5
(La/Sm) _{CN}	5.0	4.2	4.1	5.8	3.8	3.7	4.1	4.4	5.1	4.9
(Gd/Yb) _{CN}	1.3	1.0	1.1	1.4	1.3	1.2	0.6	0.7	1.2	1.1
(La/Yb) _{CN}	9.7	6.8	7.4	13.6	7.0	7.4	3.7	4.3	9.2	8.1
δ Eu	0.59	0.45	0.64	0.48	0.62	0.70	0.29	0.33	0.61	0.48
Rb	158	153	121	153	121	114	130	165	149	140
Ba	521	338	581	179	547	541	180	226	626	402
Th	23.34	19.00	19.66	44.59	14.75	14.12	16.43	21.12	18.33	24.85
U	2.96	3.77	4.38	3.50	2.55	2.54	2.88	3.16	3.22	4.12
Ta	1.30	1.47	1.64	1.03	1.35	1.34	3.27	3.02	1.58	1.62
Nb	10.22	12.35	11.50	6.88	12.68	11.56	16.94	18.44	12.62	13.01
Sr	192	165	272	108	242	274	56.3	68.5	154.6	152.7
Hf	7.24	6.23	8.54	4.98	7.96	7.85	3.60	5.05	6.24	5.13
Zr	244	219	356	154	310	310	83.9	145	199	169
Y	23.84	25.30	32.34	13.91	30.02	25.49	21.00	29.46	22.45	21.47
Zr/Hf	33.7	35.2	41.7	30.9	39.0	39.4	23.3	28.8	31.8	33.1
Nb/Ta	7.9	8.4	7.0	6.7	9.4	8.6	5.2	6.1	8.0	8.0
Rb/Sr	0.8	0.9	0.4	1.4	0.5	0.4	2.3	2.4	1.0	0.9
Rb/Ba	0.3	0.5	0.2	0.9	0.2	0.2	0.7	0.7	0.2	0.3

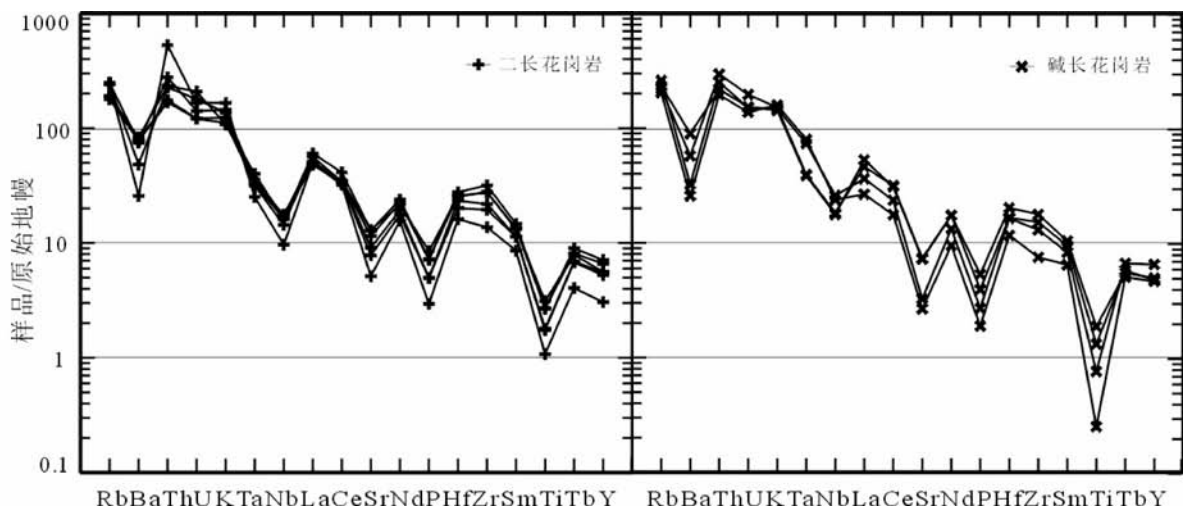
图8 伊吾岩体微量元素原始地幔标准化曲线(原始地幔数据引自 McDonough *et al.*, 1992)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized patterns of trace elements for the Yiwu Plutons (primitive mantle values after McDonough *et al.*, 1992)

表5 伊吾二长花岗岩(X-623)和碱长花岗岩(X-627)中锆石 U-Pb 分析结果

Table 5 U-Pb isotope analyses of zircons from the Yiwu monzogranite (X-623) and alkali-feldspar granite (X-627)

点号	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	^{206}Pb	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)		^{204}Pb	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	(Ma)	1 σ	(Ma)	1 σ
X-623-1	2.08	160	387	0.41	34	0.05161	0.00072	0.31906	0.00346	0.04483	0.00023	281.2	2.7	282.7	1.4
X-623-2	2.90	1000	2864	0.35	196	0.05168	0.00054	0.31913	0.00189	0.04477	0.00021	281.2	1.5	282.4	1.3
X-623-3	1.92	1469	3876	0.38	421	0.05081	0.00051	0.31858	0.00170	0.04547	0.00021	280.8	1.3	286.6	1.3
X-623-4	1.85	182	494	0.37	55	0.05126	0.00065	0.31606	0.00295	0.04471	0.00022	278.9	2.3	281.9	1.4
X-623-5	1.34	519	1412	0.37	224	0.05099	0.00055	0.31549	0.00209	0.04487	0.00021	278.4	1.6	282.9	1.3
X-623-6	<1.03	90	224	0.40	41	0.05211	0.00113	0.32062	0.00625	0.04462	0.00029	282.4	4.8	281.4	1.8
X-623-7	1.17	178	372	0.48	62	0.05089	0.00081	0.31775	0.00418	0.04527	0.00025	280.2	3.2	285.4	1.5
X-623-8	3.43	1045	2651	0.39	159	0.05340	0.00055	0.33583	0.00191	0.04560	0.00021	294.0	1.5	287.4	1.3
X-623-9	<1.10	109	214	0.51	38	0.05367	0.00114	0.33551	0.00638	0.04533	0.00029	293.8	4.9	285.8	1.8
X-623-10	1.13	115	222	0.52	37	0.05108	0.00115	0.32156	0.00657	0.04564	0.00031	283.1	5.1	287.7	1.9
X-623-11	3.50	88	204	0.43	11	0.05145	0.00145	0.31788	0.00839	0.04479	0.00035	280.3	6.5	282.5	2.2
X-623-12	<1.05	249	619	0.40	122	0.05253	0.00066	0.32842	0.00296	0.04533	0.00022	288.4	2.3	285.8	1.4
X-623-13	<1.07	319	909	0.35	180	0.05147	0.00061	0.32717	0.00264	0.04609	0.00022	287.4	2.0	290.5	1.4
X-623-14	<1.04	194	474	0.41	92	0.05117	0.00100	0.32260	0.00557	0.04571	0.00028	283.9	4.3	288.1	1.7
X-623-15	1.84	92	157	0.58	18	0.05459	0.00146	0.33883	0.00843	0.04500	0.00034	296.3	6.4	283.7	2.1
X-623-16	2.37	476	1253	0.38	110	0.05371	0.00059	0.33341	0.00229	0.04501	0.00021	292.2	1.7	283.8	1.3
X-623-17	2.43	749	1947	0.38	161	0.05289	0.00060	0.32450	0.00241	0.04448	0.00021	285.4	1.9	280.6	1.3
X-627-1	1.66	244	601	0.41	71	0.05299	0.00075	0.33171	0.00364	0.0454	0.00024	290.9	2.8	286.2	1.5
X-627-2	1.52	36	82	0.43	10	0.05383	0.00178	0.33336	0.01043	0.04491	0.00038	292.1	8.0	283.2	2.4
X-627-3	1.62	147	238	0.62	28	0.05481	0.00166	0.33633	0.00955	0.0445	0.00037	294.4	7.3	280.7	2.3
X-627-4	0.97	168	405	0.41	81	0.05445	0.00084	0.33702	0.00424	0.04489	0.00025	294.9	3.2	283.1	1.5
X-627-5	1.23	264	329	0.80	52	0.05387	0.00097	0.33697	0.00519	0.04536	0.00027	294.9	3.9	286.0	1.7
X-627-6	0.86	130	352	0.37	79	0.05671	0.00103	0.35381	0.0055	0.04524	0.00027	307.6	4.1	285.3	1.7
X-627-7	0.82	213	448	0.48	104	0.05391	0.00084	0.33191	0.00419	0.04465	0.00025	291.0	3.2	281.6	1.5
X-627-8	1.33	208	413	0.50	60	0.05811	0.00128	0.36187	0.00718	0.04516	0.00031	313.6	5.4	284.7	1.9
X-627-9	1.06	259	616	0.42	111	0.05479	0.0008	0.34072	0.00392	0.0451	0.00024	297.7	3.0	284.4	1.5
X-627-10	0.93	170	252	0.68	51	0.05501	0.00117	0.34017	0.00644	0.04484	0.00029	297.3	4.9	282.8	1.8

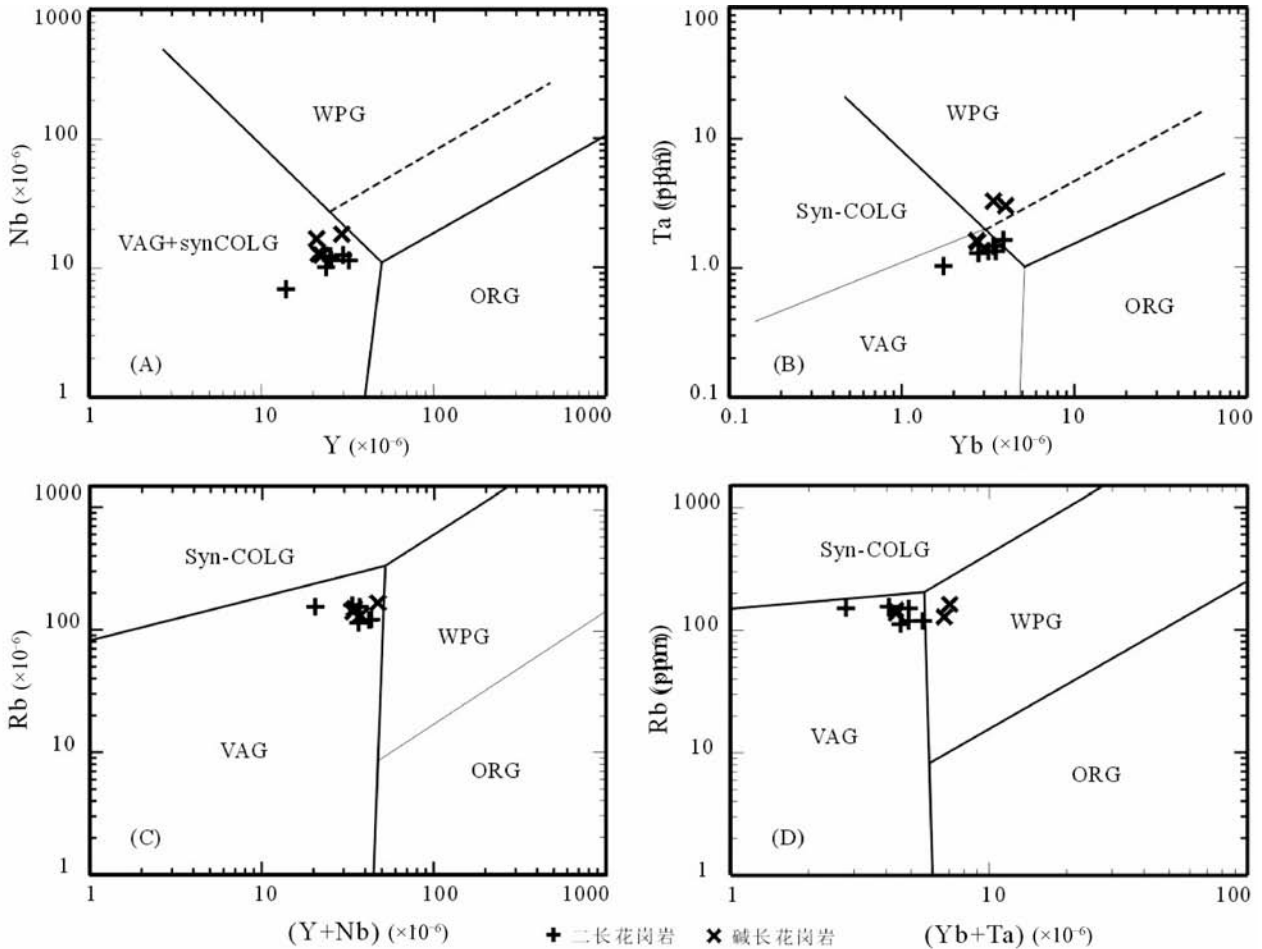


图9 伊吾岩体环境判别图解(据 Pearce *et al.*, 1984)

VAG-火山弧花岗岩;Syn-COLG-同碰撞花岗岩;WPG-板内花岗岩;ORG-洋脊花岗岩. 断线表示产生异常 ORG 的边界线

Fig.9 Tectonic setting discrimination diagram for the Yiwu Plutons (after Pearce *et al.*, 1984)

在微量元素构造环境判别图解上(图9),两个岩体投影点密集分布在一起,基本投影在火山弧花岗岩区域,其中有两个碱长花岗岩样品投影在板内花岗岩区域。

5 同位素特征

5.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试及结果

从阴极发光照片(图10和图11)上可看出两个岩体中的锆石均具清晰的韵律环带结构,表明锆石为岩浆成因(吴元保和郑永飞,2004)。从表5中可看出二长花岗岩中的锆石U和Th的含量分别为 $157 \times 10^{-6} \sim 3876 \times 10^{-6}$ 和 $88 \times 10^{-6} \sim 1469 \times 10^{-6}$,Th/U比值介于0.35~0.58之间;碱长花岗岩中的锆石U和Th的含量分别为 $82 \times 10^{-6} \sim 616 \times 10^{-6}$ 和 $36 \times 10^{-6} \sim 264 \times 10^{-6}$,Th/U比值介于0.37~0.80之间;同样指示其岩浆成因(一般Th/U>0.4, Rubatto and Gebauer, 2000)。

当 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \geq 200$ (年轻锆石)或 ≥ 3000 (年老锆石)时,对锆石中的普通Pb可不进行校正(梁细荣等,2000),本

文中二长花岗岩和碱长花岗岩中的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为11~421和10~111,不符合这个条件,所以对锆石的 ^{204}Pb 进行了校正。一般来说,形成于前寒武纪的锆石,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 定年,而对较年轻的锆石则用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄更为合适(Compston *et al.*, 1992)。因本文所研究的两岩体形成于显生宙,故采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 计算其侵位年龄。二长花岗岩中的锆石样品均落在U-Pb年龄谐和线上(图12),碱长花岗岩中的锆石样品略有偏离,分布在谐和线的右侧(图13),但二者均在其误差允许的范围内。用Isoplot2计算程序得到二长花岗岩和碱长花岗岩中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $284.6 \pm 1.4\text{Ma}$ 和 $284.0 \pm 1.1\text{Ma}$ (图12和图13),显示两岩体的形成年龄非常接近,均在早二叠世结晶而成。

5.2 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素特征

一般假定所有的岩石样品最初都来自于地幔,模式年龄表示岩石样品从地幔中分离出来的时间。当分馏因子 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 落在在-0.5~-0.3之间时,用单阶段模式计算岩体的模式年龄 t_{DM} 是合适的(李献华,1996)。表6中二长花岗岩和碱

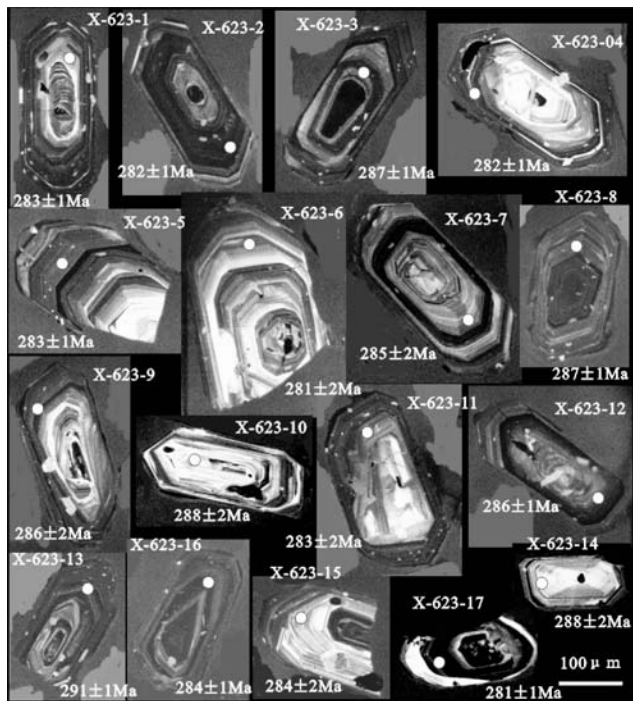


图 10 伊吾二长花岗岩(X-623)中锆石样品阴极发光照片
Fig. 10 Cathode luminescence images of zircons in the sample X-623 from the Yiwu monzogranite

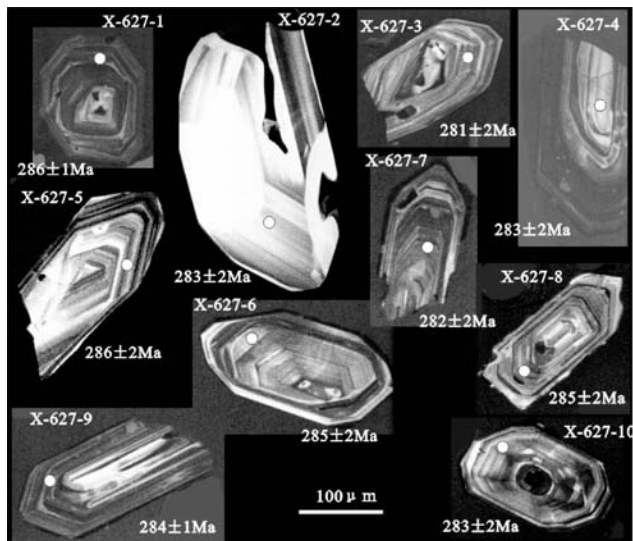


图 11 伊吾碱长花岗岩(X-627)中锆石样品阴极发光照片
Fig. 11 Cathode luminescence images of zircons in the sample X-627 from the Yiwu alkali-feldspar granite

长花岗岩的分馏因子 $f_{Sm/Nd}$ 分别为 -0.38 和 -0.31 , 计算得到的模式年龄 t_{DM} 分别为 693 Ma 和 763 Ma, 两者比较接近, 表明其源岩均在新元古代从地幔中分离出来。二长花岗岩和碱长花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为 $+4.53$ 和 $+4.64$, $\epsilon_{Nd}(0)$ 分别为 $+1.79$ 和 $+2.46$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 分别为 0.703858 和

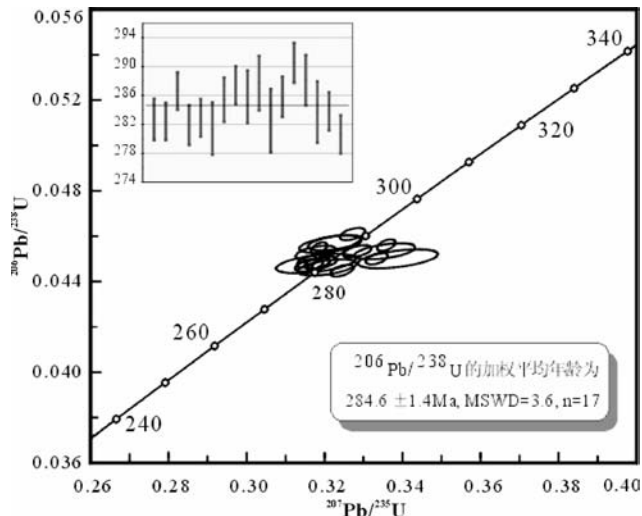


图 12 伊吾二长花岗岩(X-623)中锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 12 Concordia diagrams of U-Pb determinations in the sample X-623 from the Yiwu monzogranite

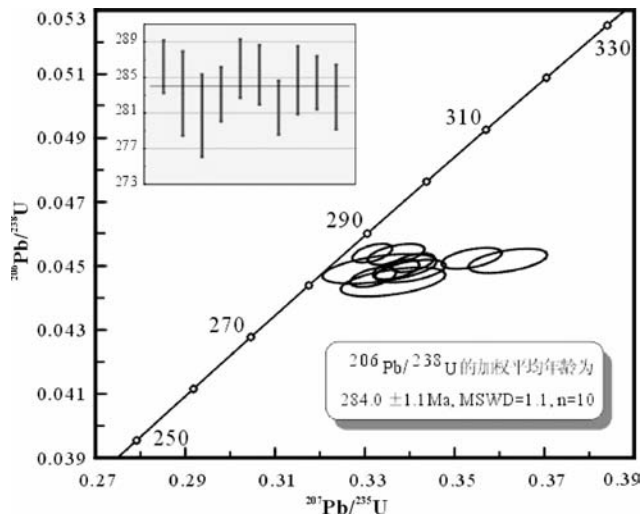


图 13 伊吾碱长花岗岩(X-627)中锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 13 Concordia diagrams of U-Pb determinations in the sample X-627 from the Yiwu alkali-feldspar granite

0.703855 ; 两种岩体正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、较低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 及其 t_{DM} 值表明其岩浆均来源于新元古的初生陆壳, 而这种初生陆壳则来源于亏损地幔 (Macera *et al.*, 1994; 贺伯初等, 1994; 赵振华等, 1996; 韩宝福等, 1999)。

6 讨论

通过对伊吾岩体高精度 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得二长花岗岩和碱长花岗岩年龄分别为 284.6 ± 1.4 Ma 和 284.0 ± 1.1 Ma, 显示两岩体结晶时间相近, 均形成在早二叠纪。二长花岗岩和碱长花岗岩均具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+4.53$

表6 伊吾二长花岗岩(X-538)和碱长花岗岩(X-544) Sr-Nd 同位素数据及参数

Table 6 Sr-Nd data and parameters from the Yiwu monzogranite (X-538) and alkali-feldspar granite (X-544)

样品号	岩体名称	SiO ₂ (wt%)	Rb (×10 ⁻⁶)	Sr (×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (2σ)	Sm (×10 ⁻⁶)	Nd (×10 ⁻⁶)
X-538	伊吾	53.16	168.20	142.60	3.392538	0.717596 ± 12	4.80	23.91
X-544	伊吾	65.72	142.03	54.21	7.574330	0.734462 ± 13	2.67	11.84

样品号	岩性	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (2σ)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	f _{Sm/Nd}	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)	t _{DM} (Ma)
X-538	二长花岗岩	0.121282	0.512730 ± 12	0.703858	-0.38	+1.79	+4.53	693
X-544	碱长花岗岩	0.136525	0.512764 ± 12	0.703855	-0.31	+2.46	+4.64	763

注: *t* 为岩体结晶年龄, 其中二长花岗岩和碱长花岗岩的结晶年龄 *t* 分别为 284.6Ma 和 284.0Ma。(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.51315, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.2137; λ_{Sm} = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹, λ_{Rb} = 1.42 × 10⁻¹¹ a⁻¹

和 +4.64)、较低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.703858 和 0.703855), 以及新元古代的模式年龄 (*t*_{DM} 分别为 693Ma 和 763Ma)。这些数值表明, 这两个岩体的岩浆均来源于新元古代的初生陆壳, 而这种初生陆壳则来源于亏损地幔 (Macera *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1997; Chen and Jahn, 2002; 韩宝福等, 1999), 由于上述三种同位素值非常接近, 暗示两岩体的物质来源相同。

野外可见, 伊吾碱长花岗岩侵入于二长花岗岩中。从二长花岗岩到碱长花岗岩, 暗色矿物和斜长石含量减少, 且斜长石的成分由更长石变为钠长石, 同时, 钾长石及石英含量增多。在主要元素氧化物协变图上, 二长花岗岩和碱长花岗岩呈现较连续的线性演化关系, 部分化学组分有所重叠 (图 6)。两种岩体的 K₂O 含量均与 SiO₂ 的含量呈正相关, 而 Al₂O₃、CaO、Na₂O、FeOT、MgO、TiO₂ 和 P₂O₅ 的含量与 SiO₂ 的含量呈负相关; 与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩的硅、碱含量偏高, 而铝的含量偏低, 分异指数 DI 升高。这些特征表明, 岩浆中镁铁矿物、斜长石、磷灰石等矿物的分离结晶在岩浆演化过程中起着重要作用。

从分离结晶的角度出发, 可以解释这两种岩石类型之间的一系列地球化学变化。碱长花岗岩的稀土配分曲线尽管与二长花岗岩的稀土配分曲线在形态上相似 (图 7), 但碱长花岗岩 ΣREE、ΣLREE 和 (La/Yb)_{CN} 较低, Eu 的负异常更为显著。独居石、褐帘石、榍石和磷灰石的分离结晶会引起残余岩浆中轻稀土亏损 (Mittlefehldt and Miller, 1983; Chesner and Ettliger, 1989), 而轻稀土的亏损将直接导致残余岩浆中稀土总量和轻/重稀土比值的降低; 斜长石是 Eu 的最重要寄主, 因此斜长石的分离结晶, 必然引起残余岩浆中 Eu 负异常的显著增强。此外, 褐帘石和磷灰石的分离结晶可能对 Eu 负异常的加剧也起了一定作用 (Boynton, 1984)。

碱长花岗岩和二长花岗岩的微量元素蛛网图相似 (图 8), 但与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩中 Sr、P 和 Ti 的含量较低, Th、U、Nb 和 Ta 的含量较高; Nb/Ta 和 Zr/Hf 均下降, Rb/Sr 升高。这些变化也表明了分离结晶在岩浆演化过程中的重要作用。斜长石、磷灰石和钛铁氧化物的分离结晶, 会使残余岩浆中 Sr、P 和 Ti 的含量降低 (Roedder and Bodnar,

1997)。高场强元素 Nb、Ta 较难进入早结晶的各种矿物的晶格, 并且, 这两种元素在岩浆中的溶解度随碱度的增加而加大 (Linnen and Keppler, 1997, 2002)。与二长花岗岩相比, 碱长花岗岩的碱度率较高, 所以后者中 Nb 和 Ta 的含量也较高。Nb/Ta 比值的降低可能与流体作用使 Ta 在岩浆中保持稳定有关 (Cerny *et al.*, 1986; Dostal and Chatterjee, 2000)。锆石的分离结晶当然是晚期岩浆中 Zr/Hf 比值下降的首要原因, 然而 Hf 与 Zr 络合物的稳定性差异也是不可忽视的因素; 目前普遍认为, Hf 比起 Zr 来, 其络合物的稳定存在可以持续到更低的温度下 (Cerny *et al.*, 1985; Dostal and Chatterjee, 1995)。在碱长花岗岩中, Sr 的降低、Rb 和 Rb/Sr 比值的升高显然是与岩浆中斜长石不断分离出去而钾长石含量不断升高有关 (Mittlefehldt and Miller, 1983)。

伊吾岩体产于马瑞士等 (1993) 所称的库兰喀孜干岛弧南侧, 该区古板块的碰撞发生在晚石炭世 (李锦轶等, 2002; 舒良树和王玉净, 2003; 李锦轶, 2004)。伊吾杂岩体所侵入的最晚地层为强烈变形的上石炭统, 因此, 该杂岩体二叠纪年龄的测定及其未变形特征, 表明其为东天山大陆碰撞之后挤压-伸展转折阶段 (顾连兴等, 2006) 的产物。在这一阶段, 紧随碰撞的岩石圈拆沉、热的地幔物质上涌, 使新元古代的初生地壳发生部分熔融 (刘红涛等, 2002; 顾连兴等, 2007), 部分熔融所形成的岩浆经演化后形成二长花岗岩岩浆, 该岩浆经分离结晶后形成碱长花岗岩岩浆。

伊吾杂岩体在微量元素构造环境判别图解 (图 9) 上主要投影于火山弧花岗岩区域, 显示出岛弧型花岗岩特征。这种不一致性可能由两种原因所造成: (1) Pearce *et al.* (1984) 的图解在研制过程中, 所选用的岛弧型花岗岩可能有相当一部分实际上是碰撞后花岗岩; (2) 伊吾岩体的岩浆虽然定位于碰撞后环境下, 但其岩浆源区曾受到过俯冲带地质作用的强烈影响。伊吾岩体的实例表明, 花岗岩类的化学成分特征与构造环境之间并不存在简单的对应关系 (Pearce, 1996; Arculus, 1997; 韩宝福, 2007)。

7 结论

伊吾杂岩体的岩石学、地球化学、同位素示踪和年代学

研究表明,该岩体中二长花岗岩和碱长花岗岩的侵位年龄分别为 284.6 ± 1.4 Ma 和 284.0 ± 1.1 Ma, 它们均形成于碰撞之后的二叠纪早期挤压-伸展转折阶段, 其岩浆来自新元古代时从亏损地幔分离出来的初生地壳源区。二长花岗岩浆是这种初生地壳岩浆演化的产物, 而碱长花岗岩则形成于二长花岗岩母岩浆经斜长石、磷灰石、钛铁氧化物、榍石、独居石、褐帘石和锆石等矿物分离结晶后的残留岩浆。

References

- Arculus RJ. 1997. The significance of source versus process in the tectonic controls of magma genesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 32: 1–12
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P. (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63–114
- Cerny P, Meintzer RE and Anderson AJ. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; Selected examples of data and mechanisms. *Can. Mineral.*, 23: 381–421
- Cerny P, Goad BE, Hawthorne FC and Chapman R. 1986. Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatitic aureole, southeastern Manitoba. *Am. Mineral.*, 71: 501–517
- Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geol. Mag.*, 139: 1–13
- Chesner CA and Ettlinger AD. 1989. Composition of volcanic allanite from the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia. *Am. Mineral.*, 74: 750–758
- Compston W, Williams IS, Kirschvink JL *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J. Geol. Sci. London*, 149: 1–84
- Dias G, Leterrier J, Mendes A *et al.* 1998. U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Lithos*, 45: 349–369
- Dostal J and Chatterjee AK. 1995. Origin of topaz-bearing and related peraluminous granites of the Late Devonian Davis Lake pluton, Nova Scotia, Canada; Crustal versus fluid fractionation. *Chemical Geology*, 123: 67–88
- Dostal J and Chatterjee AK. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada). *Chemical Geology*, 163: 207–218
- Foster MD. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U. S. Geol. Survey. Prof. Paper.*, 354–B
- Gu LX, Hu SX, Chu Q, Yu CS and Xiao XJ. 1999. pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 316–329
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS *et al.* 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103–1120 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Tang JH, San JZ, Wang CS and Zhang GH. 2007. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan-Jing'erquan area, eastern Tianshan; Indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 286–2880 (in Chinese with English abstract)
- Guo CL, Wang DH, Chen YC *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon ages and major element, trace element and Nd-Sr isotope geochemical studies of a Neoproterozoic granitic complex in western Sichuan; Petrogenesis and tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2457–2470 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China; Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chem. Geol.*, 138: 135–159
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar basin. *Science in China (Series D)*, 29(1): 16–21 (in Chinese)
- Han BF. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64–72 (in Chinese with English abstract)
- He BC, Tan KR and Wu QH. 1994. Ages and Sr, Nd isotopic evidences of mantle source magmatite in the Bu's gold deposit, Jiminal County, northern Xinjiang. *Geotectonia et Metallogenesis*, 18(3): 219–228 (in Chinese with English abstract)
- IMA-CNMMN. 1997. Nomenclature of amphiboles. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219–246
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J *et al.* 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell
- Li JY, Wang KZ, Li WQ *et al.* 2002. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 295–301 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of Eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50(3): 304–322 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics; Suitability and limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97–104 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Li XH, Liu YK, Zhu BQ and Zhang HX. 2000. U-Pb isotopic dating of young zircons by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma mass spectrometry (LAM-ICPMS). *Geochemica*, 29(1): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- Linnen RL and Keppler H. 1997. Columbite solubility in granitic melts; Consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 128: 213–227
- Linnen RL and Keppler H. 2002. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(18): 3293–3301
- Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2003. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of north China craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433–448 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. *Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Eastern Tianshan Mountains*. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1–255 (in Chinese with English abstract)
- Macera P, Del Moro A, Bargossi GM, Campana R and Rottura A. 1994. Polygenetic nature of the Cimad'Asta intrusive complex, Southern Alps, Italy; Inferences from petrological, geochemical and isotopic (Sr and Nd) data. *Lithos*, 32: 47–62
- McDonough WF, Sun S, Ringwood AE, Jagoutz E and Hofmann AW. 1992. Potassium, rubidium and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56(3): 1001–1012
- Mittlefehldt DW and Miller CF. 1983. Geochemistry of the sweetwater wash pluton California; Implications for "anomalous" trace element behavior during differentiation of felsic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 109–124.
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956–983
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120–125
- Pecceirillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63–81

- Roedder E and Bodnar RJ. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 657 – 698
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps. *Cathodoluminescence in Geoscience*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 373 – 400
- Schumacher JC. 1997. Estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} from electron microprobe analyses. In: IMA-CNMMN (eds). *Nomenclature of Amphiboles-Appendix 2*. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219 – 246
- Shu LS and Wang YJ. 2003. Late Devonian-Early Carboniferous radiolarian fossils from siliceous rocks of the Kalamaili ophiolite, Xinjiang. *Geological Review*, 49(4): 408 – 412 (in Chinese with English abstract)
- Wang CS, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Tang JH and Tang XQ. 2009. Petrogenesis and geological implications of the Permian high-K calc-alkaline granites in Harlik Mountains of eastern Tianshan, NW China. *Acta Petrologica sinica*, 25(6): 1499 – 1511 (in Chinese with English abstract)
- Wright JB. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370 – 384
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis research of zircon in mineralogy and its restriction to the U-Pb age. *China Science Bulletin*, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)
- Xu KQ, Zhu JC, Liu CS, Shen WZ and Xu SJ. 1989. Genetic series and material sources of granitoids in south China. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 3: 1 – 18 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR and Masuda A. 1996. Study on petrogenesis of alkali-rich intrusive rocks of Ulungur, Xinjiang. *Geochimica*, 25(3): 205 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Zheng QR. 1983. Calculating of Fe^{3+} and Fe^{2+} of mineral from electron microprobe analyses. *Acta Mineralogica Sinica*, 55 – 62 (in Chinese)
- 附中文参考文献**
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜等. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5): 1103 – 1120
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 唐俊华, 三金柱, 汪传胜, 张光辉. 2007. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质成矿热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应. *岩石学报*, 23(11): 2869 – 2880
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川等. 2007. 川西新元古代花岗岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究: 岩石成因与构造意义. *岩石学报*, 23(10): 2457 – 2470
- 韩宝福, 何国琦, 王式光. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动, 底垫作用及准噶尔盆地基底性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16 – 21
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. *地学前缘*, 14(3): 64 – 72
- 贺伯初, 谭克仁, 吴玺虹. 1994. 北疆吉木乃布氏金矿幔源岩浆时代及 Sr, Nd 同位素证据. *大地构造与成矿学*, 18(3): 219 – 238
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅等. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. *新疆地质*, 20(4): 295 – 301
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. *地质论评*, 50(3): 304 – 322
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. *地质科学*, 31(1): 97 – 104
- 梁细荣, 李献华, 刘永康, 朱炳泉, 张海祥. 2000. 激光探针等离子体质谱法 (LAM-ICPMS) 用于年轻锆石 U-Pb 定年. *地球化学*, 29(1): 1 – 5
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. *岩石学报*, 18(4): 433 – 448
- 马瑞士, 王锡银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架与地壳演化. 北京: 地质出版社, 1 – 225
- 舒良树, 王玉净. 2003. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石. *地质论评*, 49(4): 408 – 412
- 汪传胜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 唐俊华, 汤晓茜. 2009. 东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义. *岩石学报*, 25(6): 1499 – 1511
- 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. *科学通报*, 49(16): 1589 – 1604
- 徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲, 徐士进. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. *南京大学学报(地球科学版)*, 3: 1 – 18
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 增田彰正. 1996. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨. *地球化学*, 25(3): 205 – 220
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} . *矿物学报*, 55 – 62