

# 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义\*

田健<sup>1</sup> 廖群安<sup>1\*\*</sup> 樊光明<sup>1</sup> 聂小妹<sup>2</sup> 王富明<sup>1</sup>

TIAN Jian<sup>1</sup>, LIAO QunAn<sup>1\*\*</sup>, FAN GuangMing<sup>1</sup>, NIE XiaoMei<sup>2</sup> and WANG FuMing<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2014-04-01 收稿, 2014-10-08 改回.

Tian J, Liao QA, Fan GM, Nie XM and Wang FM. 2015. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junngar. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5):1471–1484

**Abstract** WUCAICHENG pluton is located in the south of Karamaili in Fuyun County in Xinjiang, which shows a characteristic of zonal distribution from NW-SE and is intruded in Songkaersu Group of the Lower Carboniferous. LA-ICPMS zircon U-Pb age shows that the pluton's  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages are  $341.1 \pm 4.0\text{Ma}$  and  $340.9 \pm 5.1\text{Ma}$ . The rock associations of WUCAICHENG pluton are monzogranite and K-feldspar granite, the dioritic enclaves are universal, the characteristics of I-type granites is mainly displayed that low  $\text{SiO}_2$  content (59.35% ~ 69.51%),  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{A}/\text{CNK} < 1.1$ , a good negative correlation between  $\text{SiO}_2$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$ , the amphibole being main dark mineral. The geochemical characteristics of the pluton shows enrichment in LILE (K, Rb, Ba), depletion in Nb, Ta, P and Ti, relatively high REE contents and negligible Eu anomalies (0.75 ~ 0.95), which is similar with Early Carboniferous post-collisional granites in western Junngar. Granites are characterized by positive  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values (+5.4 ~ +5.5), a relative low initial Sr isotopic ratios ( $I_{\text{Sr}} = 0.70289 \sim 0.70335$ ) and young Nd model ages ( $t_{\text{DM1}} = 650\text{Ma}$ ,  $t_{\text{DM2}} = 650 \sim 680\text{Ma}$ ), so the possible magma source could be the young crust. The petrological and geochemical characteristics indicate that WUCAICHENG pluton belongs to post-collisional granites which include Late Carboniferous granites in the north of Karamaili fault (Huangyangshan and Laoyaquan, etc.). The zircon U-Pb age of WUCAICHENG I-type granites in this paper is the eldest age of post-collisional granites in Karamaili, which manifests that the ocean basin of Karamaili has been closed before the middle stage of Early Carboniferous (Late Devonian?).

**Key words** Karamaili; WUCAICHENG; I-type granites; Post-collision; Eastern Junngar

**摘要** 新疆富蕴县五彩城岩体出露于卡拉麦里断裂以南,呈北西-南东向的带状分布,侵位于下石炭统松喀尔苏组,LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄显示,该岩体形成于早石炭世( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的加权平均年龄为  $341.1 \pm 4.0\text{Ma}$  和  $340.9 \pm 5.1\text{Ma}$ )。岩石组合为二长花岗岩 + 钾长花岗岩,闪长质包体发育。岩石低  $\text{SiO}_2$  (59.35% ~ 69.51%),  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{A}/\text{CNK} < 1.1$ ,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  具有较好的负相关性,暗色矿物主要为角闪石,显示出 I 型花岗岩的特点。岩体富集大离子亲石元素(K、Rb 和 Ba),不同程度的亏损 Nb、Ta、P 和 Ti,  $\Sigma\text{REE}$  较高 ( $126.0 \times 10^{-6} \sim 172.7 \times 10^{-6}$ ),  $\delta\text{Eu}$  不明显 (0.75 ~ 0.95),与西准噶尔地区早石炭世后碰撞花岗岩的特点相似。花岗岩具有正的  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  值 (+5.4 ~ +5.5)、较低的  $I_{\text{Sr}}$  值 (0.70289 ~ 0.70335) 及年轻的 Nd 模式年龄 ( $t_{\text{DM1}} = 650\text{Ma}$ ,  $t_{\text{DM2}} = 650 \sim 680\text{Ma}$ ),表明花岗岩来源于年轻地壳。岩石地球化学显示,该岩体形成于后碰撞环境,与黄羊山、老鸭泉(卡拉麦里断裂以北)等地的晚石炭世 A 型花岗岩的构造属性一致。五彩城 I 型花岗岩的锆石年龄代表了卡拉麦里地区后碰撞花岗岩的最老年龄,表明卡拉麦里有限洋盆在早石炭世中期之前(晚泥盆世?)已经闭合。

**关键词** 卡拉麦里;五彩城;I 型花岗岩;后碰撞;东准噶尔

中图法分类号 P588.121; P597.3

\* 本文受中国地质调查局计划项目(1212011120508)资助。

第一作者简介: 田健,男,1987年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 243293305@qq.com

\*\* 通讯作者: 廖群安,男,教授,主要从事岩石学及岩石地球化学研究, E-mail: qanliao@cug.edu.cn

## 1 引言

新疆北部位于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和中朝板块的连接处,隶属于中亚造山带。准噶尔盆地位于天山与阿勒泰造山带之间(图 1a)。东准噶尔地区发育两条重要的蛇绿岩带,即阿尔曼太蛇绿岩带和卡拉麦里蛇绿岩带,前人研究认为,卡拉麦里洋盆在志留系末期-泥盆系初形成(李锦轶等, 1990, 2009; 黄岗等, 2012),早-中泥盆世为俯冲消减阶段(张海祥等, 2004; 张招崇等, 2006),但是对于卡拉麦里洋盆的闭合时间,却存在不同的认识。王道永和邓江红(1995)认为卡拉麦里洋盆在泥盆系已经闭合,吴润江等(2009)、黄岗等(2012)和吴琪等(2012)认为洋盆在早石炭中期之前闭合,但并未给出洋盆闭合的具体时限;另一些学者则认为洋盆在早石炭世中晚期-晚石炭世期间闭合(Su *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2009),还有一些学者认为洋盆在晚石炭世闭合(Xiao *et al.*, 2011),龙晓平等(2006)则认为洋盆在二叠系才真正闭合。所以,卡拉麦里洋盆闭合时间的限制需要更多可靠的证据。

研究表明,后碰撞构造演化的时限对于造山带的研究具有重要的限定作用(韩宝福等, 2006; 王京彬和徐新, 2006)。韩宝福等(2006)认为东准噶尔后碰撞花岗岩的时限为 330~265Ma 之间,且岩浆活动的高峰期为 330~310Ma 和 305~280Ma 两个时段。但是大量的花岗岩数据集中在晚石炭世-二叠纪,对于早石炭世的花岗岩报道很少(刘家远和袁奎荣, 1996)。近年来,许多学者对于卡拉麦里断裂以北的花岗岩进行了详细的研究,锆石年龄也主要集中在 284~314Ma(苏玉平等, 2006; 李月臣等, 2007; 林锦富等, 2007; 唐红峰等, 2007; 杨高等, 2008, 2009; 李永军等, 2009; Yang *et al.*, 2011; 韩宇捷等, 2012)。但是对于卡拉麦里断裂以南的花岗岩却还未曾报道。本文研究的五彩城岩体位于卡拉麦里断裂以南,岩体的锆石 LA-ICP-MS 年龄为  $341.1 \pm 4.0$  Ma ~  $340.9 \pm 5.1$  Ma,是目前在卡拉麦里地区报道的最老年龄,岩相学、地球化学以及同位素特征显示出后碰撞花岗岩的性质,较肯定地表明卡拉麦里洋盆在早石炭世中期之前,很可能是晚泥盆世时已经闭合。

## 2 岩体地质及岩相学特征

### 2.1 岩体地质特征

五彩城岩体位于卡拉麦里断裂以南的五彩城景区的北侧,岩体地理中心坐标约为东经  $89^{\circ}05'$ ,北纬  $45^{\circ}10'$ 。区内出露的地层有早古生代的奥陶系(?)、志留系和下中泥盆统的一套连续的被动陆缘沉积建造,中泥盆统时的北塔山组、为一套具活动陆缘特征的火山-沉积建造,下石炭统松喀尔苏组代表了后碰撞阶段的开始,至晚石炭世的巴塔玛依内

山组则完全转变为陆内火山-沉积盆地的发育阶段。岩体呈近长条状展布,走向约  $135^{\circ}$ ,出露长度约 14km,宽度约 3km(图 1b 所示),北缘与下石炭统松喀尔苏组的火山-沉积地层成明显的侵入接触,南部边界被北西向的断层破坏。岩体内部相带变化明显,边缘相由细粒钾长花岗岩和花岗斑岩组成,含大量闪长质包体(图 2c),包体呈椭圆状、浑圆状,大小不一,局部可见闪长岩与钾长花岗岩的渐变接触界面(图 2a, b);中心相主要为中-粗粒钾长花岗岩构成,并有涌动侵入的二长花岗岩滴产出。

### 2.2 岩相学特征

据实测矿物含量的 Q-A-P 分类(图 3),五彩城岩体的主体岩石单元为钾长花岗岩和二长花岗岩,包体边缘的浆混岩带为石英二长闪长岩、石英二长岩或二长花岗岩(图 4):

石英二长闪长岩(图 4a, b):细粒结构、斑状结构,斑杂构造,石英(10%~15%)、碱性长石(10%~15%)、斜长石(45%~60%)和角闪石(10%~20%),矿物呈不均匀分布(图 4a),斜长石为长柱状,发育聚片双晶及环带结构,为更长石-中长石,角闪石为半自形-自形,部分蚀变为绿泥石,碱性长石、石英呈他形充填,副矿物为针状磷灰石(图 4b)、磁铁矿、锆石等。

石英二长岩(图 4c):中-细粒结构,块状-斑杂状构造,石英(5%~10%)、碱性长石(30%~40%)、斜长石(25%~40%)和角闪石(10%~15%),斜长石为长柱状,聚片双晶发育;碱性长石发育简单双晶,半自形-他形,石英呈他形充填,角闪石多为半自形。副矿物主要为不透明的磁铁矿、锆石等。

二长花岗岩(图 4d):半自形粒状结构,块状构造,石英(20%~25%)、碱性长石(35%~45%)、斜长石(15%~25%)和角闪石(5%~10%),斜长石呈半自形板状;碱性长石以条纹长石为主;角闪石自形程度中等-差,副矿物包括磷灰石、锆石、磁铁矿等。

钾长花岗岩(图 4e, f):半自形粒状结构,块状构造,碱性长石(45%~50%)、石英(20%~25%)、斜长石(10%~15%)和角闪石(5%左右),斜长石自形程度较高,聚片双晶发育,碱性长石呈半自形-他形,石英呈他形充填,显微文象结构发育。

## 3 分析方法

### 3.1 全岩化学成分

样品的主量元素、微量元素、稀土元素测试由湖北省地质实验研究所完成,其中主量元素中的氧化物测定采用 X 荧光光谱  $\alpha$  系数测定法,  $H_2O^+$  的测定采用重量法,  $CO_2$  的测定采用非水滴定法,分析精度小于 1% ( $H_2O^+$  和  $CO_2$  除外);微量元素、稀土元素测试则通过电感耦合等离子质谱仪完成,分析结果见表 1。

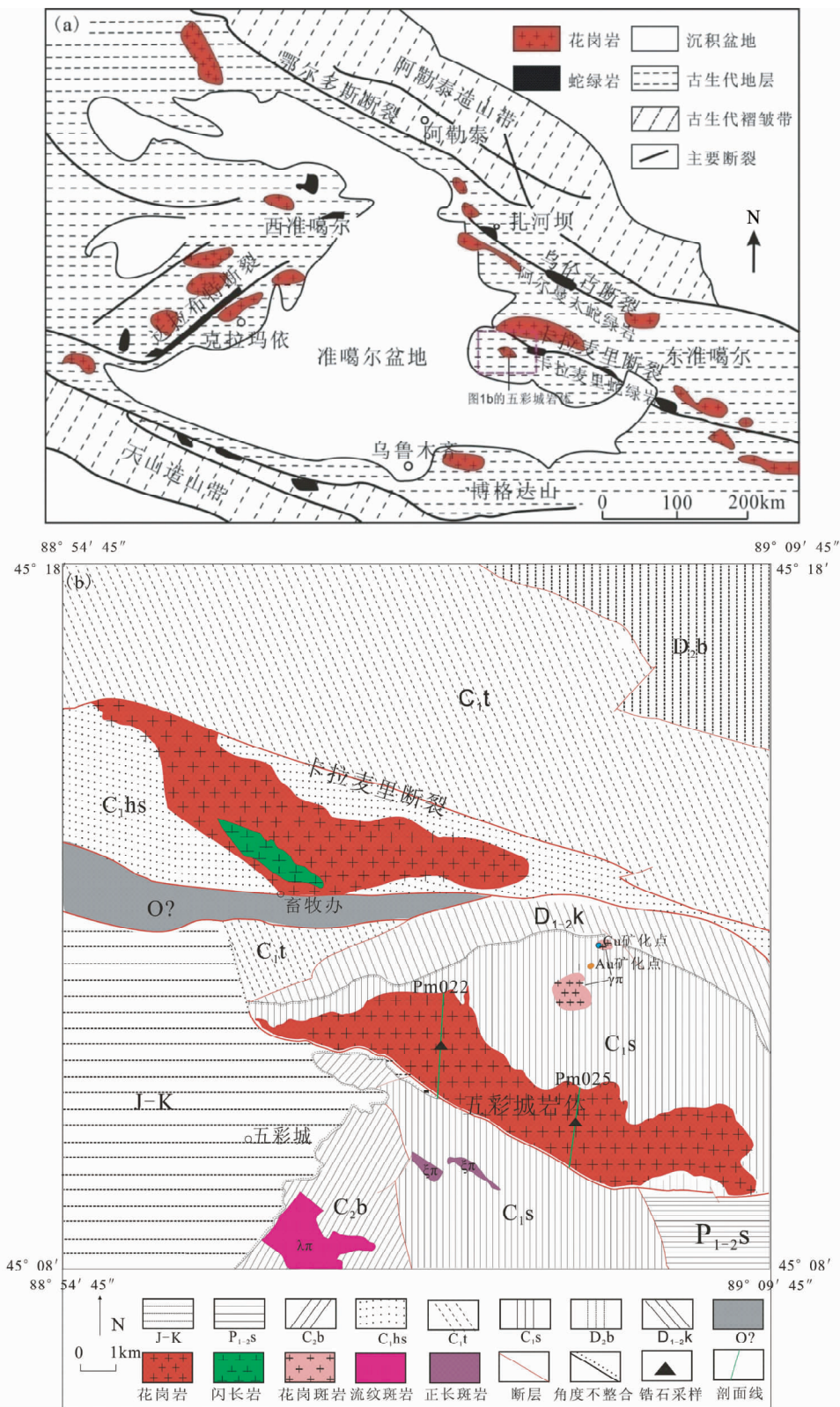


图1 新疆北部准噶尔地区地质简图(a,据 Chen and Jahn, 2004 略修改)和五彩城花岗岩类岩体地质图(b,据樊光明等, 2014<sup>①</sup>修改)

J-K: 侏罗系-白垩系地层; P<sub>1-2</sub>s: 二叠系胜利沟组; C<sub>2</sub>b: 上石炭统巴塔玛依内山组; C<sub>1</sub>t: 下石炭统塔木岗组; C<sub>1</sub>hs: 下石炭统黑山头组; C<sub>1</sub>s: 下

① 樊光明等. 2014. 卡拉麦里 1:5 万区域地质调查研究成果

石炭统松喀尔苏组;D<sub>2</sub>b:中泥盆统北塔山组;D<sub>1,2</sub>k:泥盆系卡拉麦里组;O?:可能为奥陶系地层

Fig. 1 Simplified geological map of the Junggar terrane in northern Xinjiang (a, modified after Chen and Jahn, 2004) and geological map of the Wucaicheng pluton (b)



图2 五彩城花岗岩类岩浆混合及花岗岩中的包体  
(a,b)闪长岩与钾长花岗岩的接触关系;(c)闪长质包体

Fig.2 Magma mixing of Wucaicheng granitic rocks and the dioritic enclaves of granites

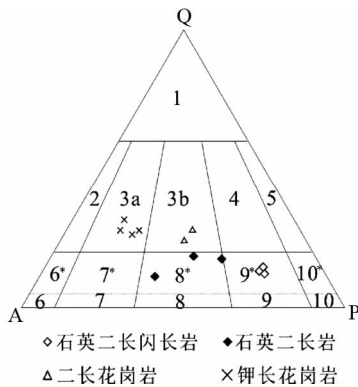


图3 五彩城花岗岩类 QAP 分类图解(据 Streckeisen and LeMaitre, 1979)

图6、图7、图10、图11的图例同此图

Fig.3 QAP classification diagram for Wucaicheng granitic rocks (after Streckeisen and LeMaitre, 1979)

### 3.2 锆石测年

样品无污染碎样和锆石的挑选工作是在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成的。将挑选出的锆石粘贴制成环氧树脂样品靶,经过打磨抛光使锆石露出中心后进行透射光、反射光和阴极发光(CL)显微照相。阴极发光显微照相在中国地质大学采用扫描电镜完成,加速电压为15kV。锆石 U-Pb 同位素定年在 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成的。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,电感耦合等离子质谱(ICP-MS)为 Agilent 7500a。激光斑束直径为 32μm,载气为 He,气流速度为 270mL/min,工作电压为 27.1kV,激光能量密度为 29J/cm<sup>2</sup>。实验过程采用 Nist610、GJ-1 外标和 91500 内标控制的方法,每隔 5~6 个数据点分别用两个 91500 标样校正。采用软件 ICPMSDataCal 对分析数据进行离线处理,以<sup>29</sup>Si 作为内标校正锆石微量元素,详细的仪器操作过程和

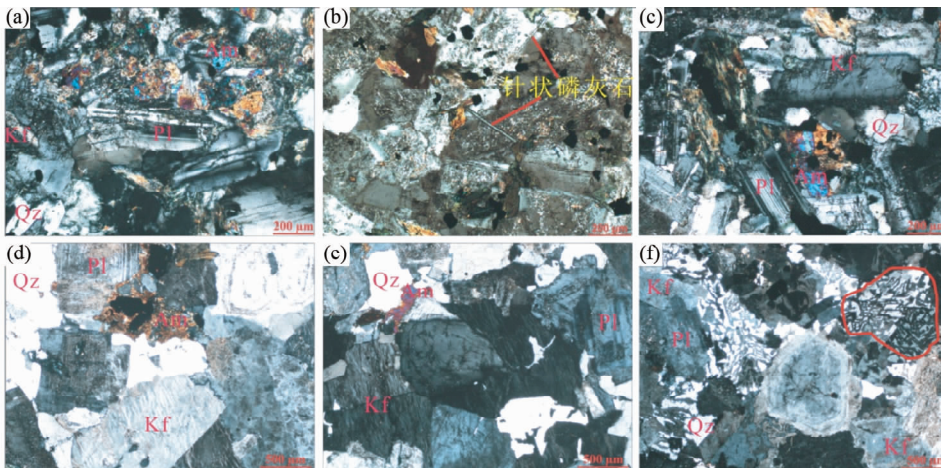


图4 五彩城花岗岩类的岩相学特征

(a)石英二长闪长岩;(b)针状磷灰石;(c)石英二长岩;(d)二长花岗岩;(e)钾长花岗岩;(f)文象结构(红色区域)。Pl-斜长石;Kf-碱性长石;Qz-石英;Am-角闪石

Fig.4 Petrological characteristics for Wucaicheng granitic rocks

表1 五彩城花岗岩类全岩主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素( $\times 10^{-6}$ )数据Table 1 Whole-rock major elements (wt%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) of the Wucaicheng granitic rocks

样品号	025-11-1	025-6-4	022-2-2	022-3-2	025-9-1	025-6-2	025-1-1	022-2-4	022-16-1	022-11-2	025-5-1	022-7-1
岩性	石英二长闪长岩			石英二长岩			二长花岗岩		钾长花岗岩			
SiO <sub>2</sub>	59.35	59.91	60.76	60.64	62.07	63.21	68.98	66.1	69.22	69.51	68.32	68.97
TiO <sub>2</sub>	1.32	1.27	1.15	0.91	1.02	0.78	0.46	0.68	0.47	0.49	0.52	0.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.33	15.9	16.1	16.44	15.73	16.04	14.97	15.64	15.02	14.8	14.96	14.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	3.54	2.52	2.9	3	2.63	1.15	1.97	1.21	1.42	1.98	1.41
FeO	3.62	2.8	3.88	3.35	3.72	2.35	1.88	2.22	1.85	1.55	1.45	1.68
MnO	0.18	0.15	0.15	0.12	0.1	0.13	0.1	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07
MgO	2.55	2.4	2.48	2.52	2.25	1.66	0.86	1.35	0.89	0.89	0.95	0.94
CaO	4.13	3.81	5.22	5.79	4.08	3.7	1.57	3.11	2.07	2.22	1.67	2.47
Na <sub>2</sub> O	4.49	5.12	4.02	3.88	3.99	4.61	4.77	4.39	4.21	4.33	4.41	4.25
K <sub>2</sub> O	2.5	2.88	2.07	2.14	1.66	2.7	3.79	3.21	3.84	3.83	4.08	3.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.48	0.38	0.3	0.18	0.26	0.36	0.12	0.17	0.11	0.11	0.12	0.12
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.64	1.18	1.11	0.83	1.7	1.13	1.04	0.84	0.79	0.56	0.93	0.68
CO <sub>2</sub>	0.05	0.43	0.05	0.09	0.24	0.52	0.14	0.05	0.05	0.05	0.33	0.24
LOI	1.25	1.34	0.72	0.61	1.73	1.38	1.02	0.6	0.58	0.43	1.08	0.76
La	21	20.2	20.1	17.7	17.1	20.4	23.9	18.9	22.4	23.4	19	21.8
Ce	47.1	42.7	42.1	36.8	34.8	42.3	47.6	38.5	44.1	45.6	38.8	44.9
Pr	6.64	6.3	5.63	4.93	4.89	5.75	5.74	4.89	5.13	5.418	4.87	5.28
Nd	29.9	27.8	24.9	21.3	21.9	24.5	22.4	20.6	19.5	21.6	19.4	20.7
Sm	6.88	6.32	5.65	5.01	5.13	5.411	4.31	4.4	3.89	4.24	4.02	4.27
Eu	2.04	1.87	1.61	1.27	1.6	1.51	1.05	1.32	0.99	1.03	0.99	1.06
Gd	6.8	6.3	5.52	4.82	5.15	5.1	4.32	4.28	3.76	4.04	3.96	4.1
Tb	1.12	1.07	0.96	0.85	0.91	0.87	0.71	0.74	0.64	0.69	0.68	0.71
Dy	6.53	6.07	5.53	4.98	5.39	4.98	4.17	4.33	3.84	4.21	4.09	4.21
Ho	1.33	1.26	1.14	1.03	1.12	1.02	0.87	0.91	0.81	0.9	0.87	0.88
Er	3.78	3.65	3.35	2.91	3.24	2.97	2.65	2.64	2.47	2.7	2.59	2.64
Tm	0.57	0.56	0.53	0.46	0.51	0.47	0.43	0.44	0.4	0.44	0.43	0.44
Yb	3.64	3.57	3.32	2.88	3.22	3.09	2.91	2.88	2.71	2.97	2.79	2.88
Lu	0.57	0.55	0.54	0.44	0.51	0.49	0.47	0.46	0.43	0.47	0.44	0.46
Y	34.9	34.2	30.6	27	30	27.7	23.9	24.8	22	24.7	23.1	24.3
ΣREE	173	162	151	132	135	146	145	130	133	142	126	139
Be	1.41	1.85	1.51	1.24	1.38	1.87	1.92	1.54	1.7	2.03	1.81	1.84
Ni	3.87	3.9	4.95	7.93	2.26	2.26	2.48	4.26	2.56	2.4	2.68	2.41
Sc	19	17.1	17.3	17.1	18.2	9.13	6.22	10.5	6.42	6.97	7.09	7.17
V	147	129	142	136	125	68.4	33.5	72.1	39.3	40.4	43.9	39.9
Pb	5.93	9.22	12.66	7.83	36.4	14.5	17.2	9.4	16.9	16	10.2	18
Cr	17.2	22.5	30.3	25.1	18	25	21.9	15.6	16.6	15.2	20.7	12.5
Co	15.6	15.3	14.4	17.1	11.7	9.62	4.71	8.38	5.411	5.98	6.16	5.8
Rb	64.3	96.1	51.8	41.7	61	81.4	123	75.7	114	129	132	111
Cs	3.42	2.57	2.3	1.89	1.87	2.4	2.84	2.33	3.25	2.84	2.6	2.5
Ta	0.68	0.7	0.58	0.51	0.41	0.56	0.82	0.55	0.63	0.78	0.74	0.67
Nb	8.2	8.32	6.83	7.04	5.2	6.96	7.19	6.73	7	8.32	7.42	7.09
Hf	5.15	6.05	4.73	5.05	5.415	5.89	7.56	8.11	7.63	7.8	8.12	7.87
Zr	188	191	163	159	186	187	233	261	229	234	244	236
Th	4.6	5.67	6.49	4.77	5.54	5.31	10.1	7.15	10.3	11.9	10.3	11.6
U	2.05	1.68	2.02	1.51	1.67	1.85	2.8	1.85	1.92	2.27	2.01	2.22
Ba	500	595	375	544	334	447	617	569	652	586	698	560
Sr	453	556	374	342	415	334	213	264	210	188	209	218
Ga	22.9	26.4	21.3	19.8	21.6	21.8	18.4	18.9	18.6	20.6	18.8	17.9
P	2095	1658	1309	785.5	1135	1571	523.7	741.8	480.0	480.0	523.7	523.7
K	20754	23908	17184	17765	13780	22414	31463	26648	31878	31795	33870	30799
Ti	7912	7612	6893	5455	6114	4675	2757	4076	2817	2937	3117	2937

续表 1

Continued Table 1

样品号	025-11-1	025-6-4	022-2-2	022-3-2	025-9-1	025-6-2	025-1-1	022-2-4	022-16-1	022-11-2	025-5-1	022-7-1
岩性	石英二长闪长岩				石英二长岩		二长花岗岩		钾长花岗岩			
Zr + Nb + Ce + Y	278.2	276.3	242.9	229.6	256.0	264.2	311.6	331.2	302.0	312.6	313.0	312.4
(Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O)/CaO	1.69	2.10	1.17	1.04	1.38	1.98	5.45	2.44	3.89	3.68	5.08	3.22
Al	8.65	8.42	8.52	8.70	8.33	8.49	7.93	8.28	7.95	7.84	7.92	7.83
10000Ga/Al	2.65	3.13	2.50	2.28	2.59	2.56	2.32	2.28	2.34	2.63	2.37	2.29
FeO <sup>T</sup>	6.46	5.99	6.15	5.96	6.42	4.72	2.91	3.99	2.94	2.83	3.23	2.95
FeO <sup>T</sup> /MgO	2.53	2.49	2.48	2.36	2.85	2.84	3.39	2.96	3.30	3.18	3.40	3.14
Mg <sup>#</sup>	45.28	45.68	45.83	47.00	42.36	42.47	38.22	41.49	38.84	39.76	38.14	40.07
AR	2.04	2.37	1.80	1.74	1.80	2.18	3.15	2.36	2.78	2.84	3.09	2.71
A/CNK	0.93	0.86	0.88	0.86	1.00	0.93	1.01	0.96	1.01	0.97	1.02	0.95
A/NK	1.62	1.38	1.82	1.89	1.88	1.53	1.25	1.46	1.36	1.31	1.28	1.34
δ	2.99	3.78	2.09	2.05	1.67	2.64	2.82	2.50	2.47	2.51	2.85	2.44
1000R <sub>1</sub>	1618	1378	1819	1890	1882	1527	1253	1463	1356	1314	1282	1344
1000R <sub>2</sub>	2988	3785	2088	2054	1674	2644	2820	2500	2471	2512	2847	2440

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + TFe<sup>2+</sup>); AR = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) / (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO - Na<sub>2</sub>O - K<sub>2</sub>O); A/CNK = 摩尔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); A/NK = 摩尔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); δ = (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)<sup>2</sup> / (SiO<sub>2</sub> - 43)

表 2 五彩城钾长花岗岩锆石 U-Pb 定年数据

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the K-feldspar granitic rocks of Wucaicheng

测点号	Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	谐和度
					<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	
	(× 10 <sup>-6</sup> )				Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Age (Ma)	1sigma	
022-7-1	6.96	65.41	94.15	0.69	0.056	0.0039	0.4219	0.0282	0.0556	0.0009	348.7	5.5	97%
022-7-2	9.35	80.46	128.8	0.62	0.0672	0.0039	0.4857	0.0278	0.0528	0.0009	331.8	5.2	80%
022-7-3	11.96	93.16	172.97	0.54	0.0526	0.0032	0.3832	0.0229	0.053	0.0008	333	4.7	98%
022-7-4	8.38	74.46	123.21	0.6	0.0505	0.0042	0.3684	0.0319	0.0536	0.001	336.6	6.4	94%
022-7-05	12.71	108.92	181.39	0.6	0.0534	0.0031	0.3907	0.0225	0.0533	0.0007	334.7	4.5	99%
022-7-06	11.03	87.14	149.42	0.58	0.0616	0.0036	0.4748	0.0288	0.0555	0.0009	348.3	5.5	87%
022-7-07	48.5	683.52	595.01	1.15	0.0579	0.0018	0.4482	0.0136	0.0558	0.0007	350.3	4.1	92%
022-7-08	6.64	62.29	98.25	0.63	0.0568	0.0038	0.4372	0.0279	0.0558	0.0009	349.9	5.8	94%
022-7-09	5.27	37.77	74.14	0.51	0.0674	0.0085	0.521	0.0674	0.0538	0.0011	338	6.7	77%
022-7-10	11.52	80.55	133.46	0.6	0.1264	0.0068	1.0153	0.0544	0.058	0.001	363.3	5.9	35%
022-7-11	18.82	75.58	134.73	0.56	0.2367	0.0143	2.5752	0.1678	0.0739	0.0018	459.6	10.5	4%
022-7-12	9.46	84.13	135.93	0.62	0.057	0.0032	0.4248	0.0242	0.0537	0.0009	337.4	5.6	93%
022-7-13	13.82	110.35	189.05	0.58	0.089	0.006	0.7018	0.0521	0.0554	0.0009	347.5	5.7	56%
022-7-14	8.67	68.4	99.37	0.69	0.1661	0.0422	2.9134	0.8817	0.1137	0.0093	694.1	53.6	33%
022-7-15	9.68	94.05	126.52	0.74	0.064	0.0067	0.5004	0.0554	0.0553	0.001	347.2	6.2	82%
022-7-16	8.08	39.82	103.17	0.39	0.0545	0.0069	0.4776	0.0653	0.0597	0.0011	373.7	6.5	94%
022-7-17	9.09	73.24	114.93	0.64	0.0837	0.0043	0.6367	0.0315	0.0559	0.001	350.9	6	64%
022-7-18	7.5	64.18	107.65	0.6	0.053	0.0035	0.3945	0.0268	0.0538	0.001	337.6	5.8	99%
022-7-19	13.72	175.91	188.44	0.93	0.0712	0.0043	0.526	0.0318	0.0532	0.0007	334.4	4.1	75%
022-7-20	14.11	119.68	192.96	0.62	0.0565	0.0026	0.4354	0.0201	0.0557	0.0009	349.1	5.3	95%
022-7-21	7.98	88.39	110.32	0.8	0.0549	0.0043	0.4041	0.0305	0.0531	0.0009	333.3	5.6	96%
022-7-22	12.81	148.41	189.2	0.78	0.094	0.0059	0.6155	0.0357	0.0481	0.0009	302.5	5.3	53%
022-7-23	76.67	346.1	877.67	0.39	0.1114	0.0058	0.9404	0.0567	0.0589	0.0012	368.6	7.2	41%
022-7-24	8.82	102.58	124.69	0.82	0.0591	0.0027	0.4376	0.0191	0.0526	0.0008	330.7	4.9	89%
025-5-01	7.11	60	99.5	0.6	0.0569	0.0036	0.4366	0.0283	0.0558	0.0012	349.8	7.4	94%
025-5-02	9.49	87.3	144	0.61	0.0765	0.0045	0.5209	0.0291	0.0501	0.001	315.4	6	70%
025-5-03	6.78	56.2	97.5	0.58	0.0739	0.0056	0.5468	0.0402	0.0551	0.0016	345.7	10	75%
025-5-04	7.51	65.7	110	0.6	0.054	0.0044	0.3909	0.0289	0.0536	0.0012	336.5	7.1	99%
025-5-05	7.09	63.1	105	0.6	0.058	0.0044	0.4139	0.0295	0.0533	0.0012	334.7	7	95%
025-5-06	10.12	110	152	0.72	0.0586	0.0045	0.43	0.034	0.0535	0.0012	336.1	7.4	92%
025-5-07	9.41	85.7	140	0.61	0.0526	0.004	0.3983	0.0316	0.0546	0.0012	342.7	7.5	99%
025-5-08	5.75	50.6	88.7	0.57	0.0689	0.0062	0.4772	0.0379	0.0529	0.0012	332.1	7.5	82%
025-5-09	13.84	130	205	0.63	0.0544	0.0035	0.4019	0.0247	0.0537	0.001	337.1	6.2	98%

续表 2

Continued Table 2

测点号	Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	谐和度
					<sup>206</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb	<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U	
	( $\times 10^{-6}$ )				Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Age (Ma)	1sigma	
025-5-10	8.19	71.5	123	0.58	0.0588	0.0038	0.4376	0.0284	0.0537	0.0012	337.1	7.3	91%
025-5-11	7.38	62.5	93.9	0.67	0.1125	0.0109	0.9372	0.0973	0.0604	0.0016	377.8	9.5	44%
025-5-12	8.54	78.2	127	0.61	0.0633	0.0071	0.4346	0.0411	0.0536	0.0012	336.5	7.6	91%
025-5-13	7.39	63.6	100.4	0.63	0.08	0.0071	0.631	0.053	0.0576	0.0014	361.3	8.3	68%
025-5-14	6.36	54.9	90.3	0.61	0.0653	0.0054	0.5195	0.0452	0.0568	0.0015	356.3	8.9	82%
025-5-15	7.78	71.3	111	0.64	0.0584	0.0042	0.4401	0.0306	0.056	0.0012	351.2	7.2	94%
025-5-16	8.95	89.2	131	0.68	0.0506	0.0031	0.3801	0.0224	0.0549	0.0012	344.8	7.1	94%
025-5-17	7.65	63.9	106	0.6	0.1081	0.0094	0.7691	0.0627	0.0551	0.0013	346	8	49%
025-5-18	7.92	79.5	110	0.72	0.058	0.0045	0.4454	0.0341	0.056	0.0014	351	8.3	93%
025-5-19	9.9	96.9	112	0.86	0.1202	0.0066	0.9104	0.0459	0.0566	0.0012	354.7	7.2	40%
025-5-20	9.03	83.1	131	0.64	0.0582	0.0036	0.4286	0.0253	0.0542	0.0009	340.2	5.2	93%

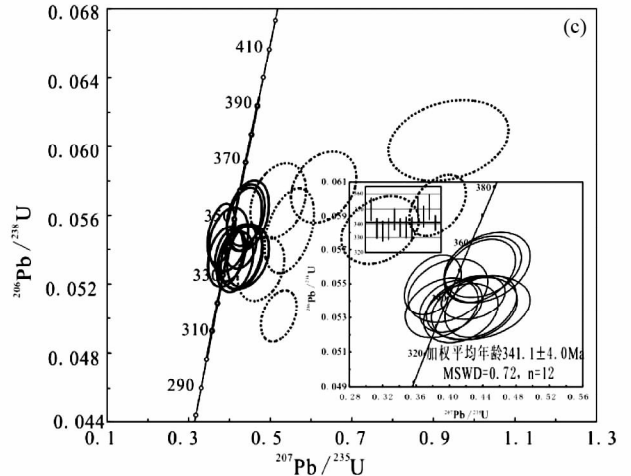
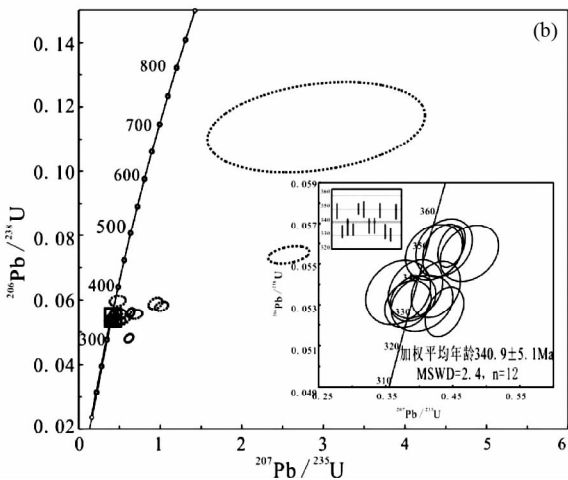
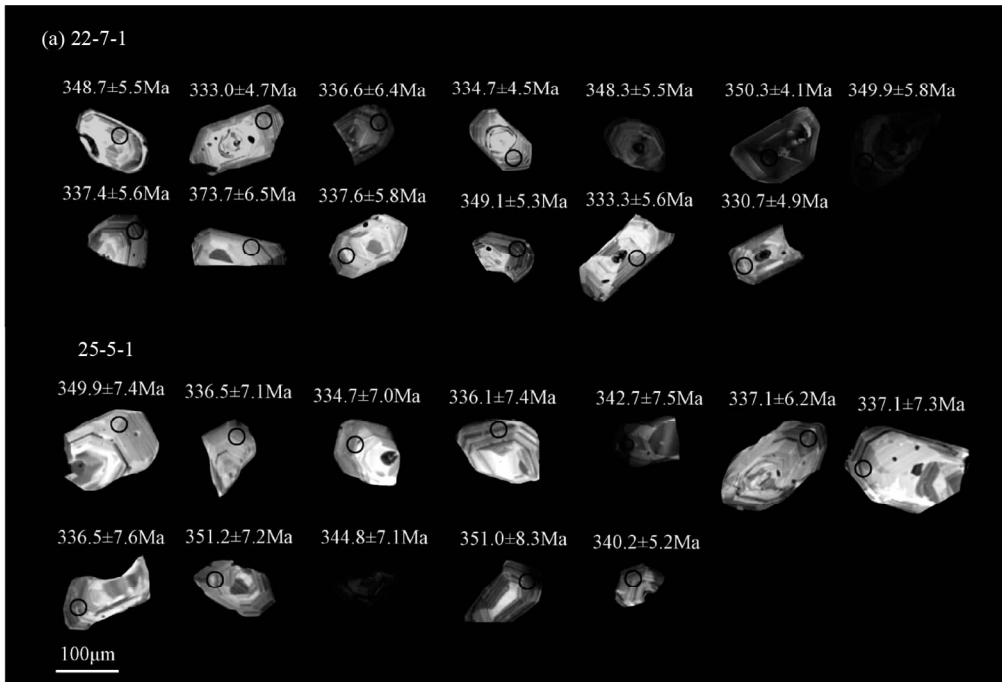


图 5 五彩城钾长花岗岩锆石 CL 图像(a)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(b,c)

虚线框表示计算时排除的数据

Fig. 5 CL imaging of zircons (a) and U-Pb age concordia plots of zircons (b, c) from Wucaicheng granites

定年数据处理方法见 Liu *et al.* (2008, 2010a, b)。锆石 U-Pb 年龄谱和图的绘制和 MSWD 的计算均采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2003)。

### 3.3 Sr、Nd 同位素

原始样品经风干后细碎过 20 目筛,再用玛瑙研钵磨至 200 目以下,供同位素分析测试。全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 MAT-261 热电离同位素质谱仪进行测量,仪器的准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 国际标样进行监测,Sr 同位素的质量分馏用  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$  校正,Nd 同位素质量分馏用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721900$  校正,详细流程见 Gao *et al.* (2004)。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石结果分析

本文对五彩城岩体 2 个钾长花岗岩 (022-7-1、025-5-1) 进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,测试结果见表 2。样品的锆石多为无色长柱状晶形(长 50 ~ 200  $\mu\text{m}$ ),长宽比为 1 : 1 ~ 3 : 1,锆石振荡环带清晰(图 5a),Th 含量  $37.77 \times 10^{-6} \sim 683.5 \times 10^{-6}$ ,U 含量  $74.14 \times 10^{-6} \sim 877.7 \times 10^{-6}$ ,Th/U 在 0.39 ~ 1.15 (表 2),显示出岩浆锆石的特点 (Hoskin and Black, 2000; 吴元保和郑永飞, 2004)。由于岩体的锆石年龄小于 1000Ma,所以采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄。22-7-1 样品共测试 24 个锆石点(表 2),其中 13 个测点位于谐和线上及谐和线附近(图 5b),12 个测试点在误差范围内给出了一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄,为  $340.9 \pm 5.1\text{Ma}$  (MSWD = 2.4),另 1 个测试点(22-7-16)环带清晰,谐和度较高(94%),其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $373.7 \pm 6.5\text{Ma}$ ,代表了早期的岩浆活动;其余 11 个测点谐和度较低(4% ~ 82%),偏离协和线,可能发生了  $^{204}\text{Pb}$  的丢失,所以未参与锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄计算。25-5-1 样品共 20 个测试点(表 2),但由于 8 个测点偏离谐和线(谐和度 40% ~ 82%),所以仅对其余 12 个测点进行分析,结果显示 12 个测点全部位于谐和线上(图 5c),数据质量较高,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $341.1 \pm 4.0\text{Ma}$  (MSWD = 0.72)。

2 个钾长花岗岩锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄在误差范围内基本一致,代表了五彩城岩体花岗岩质岩浆的结晶时代,所以五彩城岩体形成于早石炭世,年龄约为  $340.9 \pm 5.1\text{Ma} \sim 341.1 \pm 4.0\text{Ma}$ 。

### 4.2 岩石地球化学

全岩  $\text{SiO}_2$  含量变化在 59.35% ~ 69.51% 之间,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  值为 5.65% ~ 8.56%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  从 1.08 变化到 2.40,平均为 1.54。里特曼指数( $\delta$ )除 025-6-4 以外均小于 3.3,显

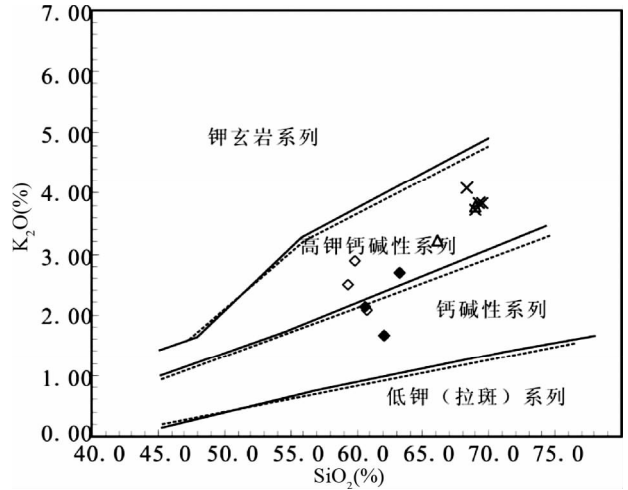


图 6 五彩城花岗岩类  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解(底图据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 6  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  diagram of the Wucaicheng granitic rocks (after Peccerillo and Taylor, 1976)

示出钙碱性的特点,在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图中(图 6),岩石总体表现为中-高钾钙碱性系列。铝饱和指数 ( $A/\text{CNK}$ ) 为 0.86 ~ 1.02,小于 1.1,多数为准铝质,少数为弱过铝质,主量元素特征上与 I 型花岗岩相似。

全岩哈克图解中(图 7),各岩石单元的  $\text{SiO}_2$  与其它氧化物之间具有明显的线性关系,应与岩体中含大量暗色包体和岩相学特征反应出来的岩浆混合现象有关系,反应了在岩浆演化过程中,岩浆混合作用的重要性 (Kwon *et al.*, 1989; Roman *et al.*, 2005)。

微量元素蛛网图中(图 8),所有样品均具相似的分布型式,富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb,不同程度的亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti。

样品的  $\Sigma\text{REE} = 126.0 \times 10^{-6} \sim 172.7 \times 10^{-6}$ ,变化范围窄。不同样品的稀土元素配分型式也十分一致(图 9),具 LREE 富集的右倾配分型式,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.81 \sim 5.92$ ,轻重稀土分馏程度中等,具有弱的负 Eu 异常,  $\delta\text{Eu} = 0.75 \sim 0.95$ ,说明斜长石的分离结晶作用不明显。  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.13 \sim 1.54$ ,重稀土平缓,Dy、Ho 含量相对亏损,  $\text{Y}/\text{Yb} = 8.12 \sim 8.62$ ,接近 10,暗示角闪石可能为源区的残留相(葛小月等, 2002)。

### 4.3 Sr、Nd 同位素分析结果

同位素数据表明(表 3),钾长花岗岩、二长花岗岩具有正的  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  值 (+5.4 ~ +5.5)、较低的  $I_{\text{sr}}$  值 (0.70289 ~ 0.70335) 及年轻的模式年龄 (650Ma),用单阶段与两阶段法计算得到的 Nd 模式年龄十分相近,表明花岗岩来源于年轻地壳。石英二长闪长岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}$  为正值 (+5.2),但  $I_{\text{sr}}$  值更低 (0.70144),反映了其源区可能具有幔源属性。



表 3 五彩城花岗岩类 Sr、Nd 同位素数据

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of the Wucaicheng granitic rocks ( $t = 341 \text{ Ma}$ )

样品号	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_i$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM1}}^{\text{Nd}}$ (Ga)	$t_{\text{DM2}}^{\text{Nd}}$ (Ga)
022-7-3	111	218	1.4804227	0.710531	0.70335	4.27	20.69	0.125143	0.512758	5.416	0.68	0.65
022-5-1	123	213	1.6754391	0.711018	0.70289	4.31	22.37	0.1168294	0.512737	5.411	0.65	0.65
025-6-4	96.1	556	0.5002226	0.703865	0.70144	6.32	27.81	0.137801	0.512773	5.2	0.76	0.67

注: 3 个样品分别为钾长花岗岩、二长花岗岩、石英二长闪长岩。同位素校正公式:  $\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_i = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{样品}} + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}(e^{\lambda t} - 1)$ ;  $\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = \left[ \left( \frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{样品}} / \left( \frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{CHUR}(t)} - 1 \right] \times 10^4$ ;  $\left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{CHUR}(t)} = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 6.54 \times 10^{-12} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 单阶段 Nd 模式年龄( $t_{\text{DM1}}$ )与两阶段 Nd 模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )的计算公式见 Li *et al.* (2003)

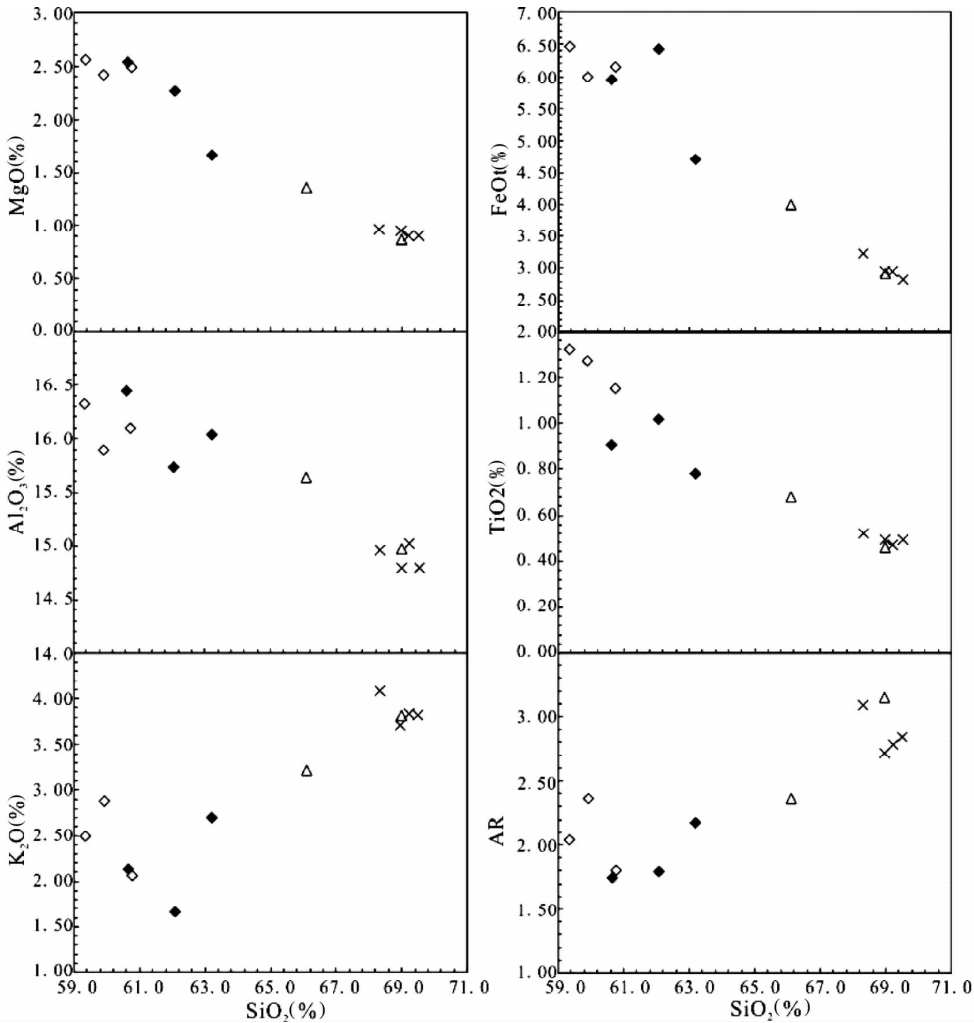


图 7 五彩城花岗岩类主量元素哈克图解

Fig. 7 Harker diagrams of major elements for the Wucaicheng granitic rocks

## 5 讨论

韩宝福(2007)指出后碰撞花岗岩类最突出的特点是岩石类型的多样性,多数造山带的后碰撞花岗岩类以中-高钾钙碱性 I 型花岗岩为主。五彩城岩体中岩石的暗色矿物以角闪石为主,  $\text{SiO}_2$  含量小于 70%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  大于 1, 且  $\text{Na}_2\text{O}$

含量大于 3.2%, 准铝质-弱过铝质,  $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{SiO}_2$  显示出较好的负相关性(图 10a, b), 显示出 I 型花岗岩的特点(Chappell and White, 1974; Chappell, 1999)。  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  图解中, 岩体投影点落在中-高钾钙碱性系列之内,  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$  和  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO-Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  判别图解显示(图 10c, d), 岩体分布于 I, S 型花岗岩与 A 型花岗岩的接触边界附近, 均与后碰撞 I 型花岗岩的特点一致。

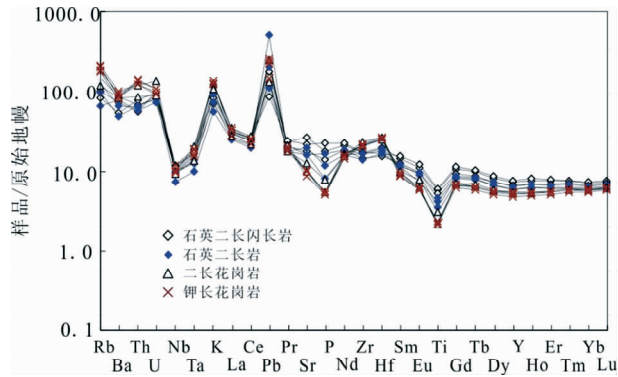


图8 五彩城花岗岩类微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the WUCAICHENG granitic rocks (normalizing data after Sun and McDonough, 1989)

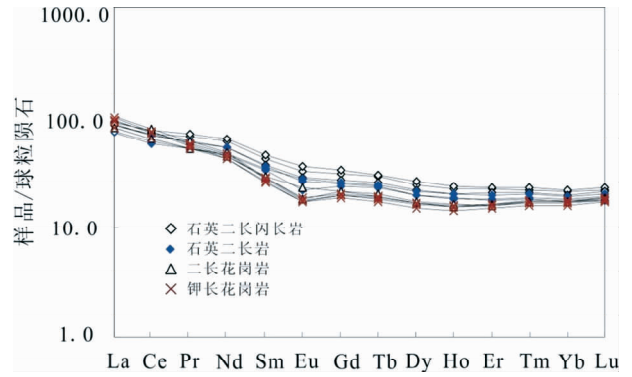


图9 五彩城花岗岩类稀土元素配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of the WUCAICHENG granitic rocks (normalizing data after Sun and McDonough, 1989)

原始地幔标准化的蛛网图解上,岩体富集大离子亲石元素(K、Rb和Ba),不同程度的亏损Nb、Ta、P和Ti(图7),稀土元素配分曲线显示岩体REE含量( $126.0 \times 10^{-6} \sim 172.7 \times 10^{-6}$ )较高, $\delta\text{Eu}$ (0.75~0.95)不明显(图8)。这些特征与西准噶尔地区早石炭世后碰撞花岗岩的特点相似(袁峰等, 2006; 范裕等, 2007; Zhou *et al.*, 2008)。

在花岗岩类形成环境的Rb-Y+Nb判别图(图11a)中,五彩城岩体投点在火山弧与板内的分界线附近的火山弧一侧 Pearce(1996)补充圈定的后碰撞花岗岩叠加区域内; $R_1$ - $R_2$ 判别图解(图11b)中,花岗岩类投点(除部分石英二长闪长岩、石英闪长岩以外)则落入碰撞后隆起(3区)和造山晚期(4区)的界限附近;在FM-C图解中(图11c),五彩城花岗

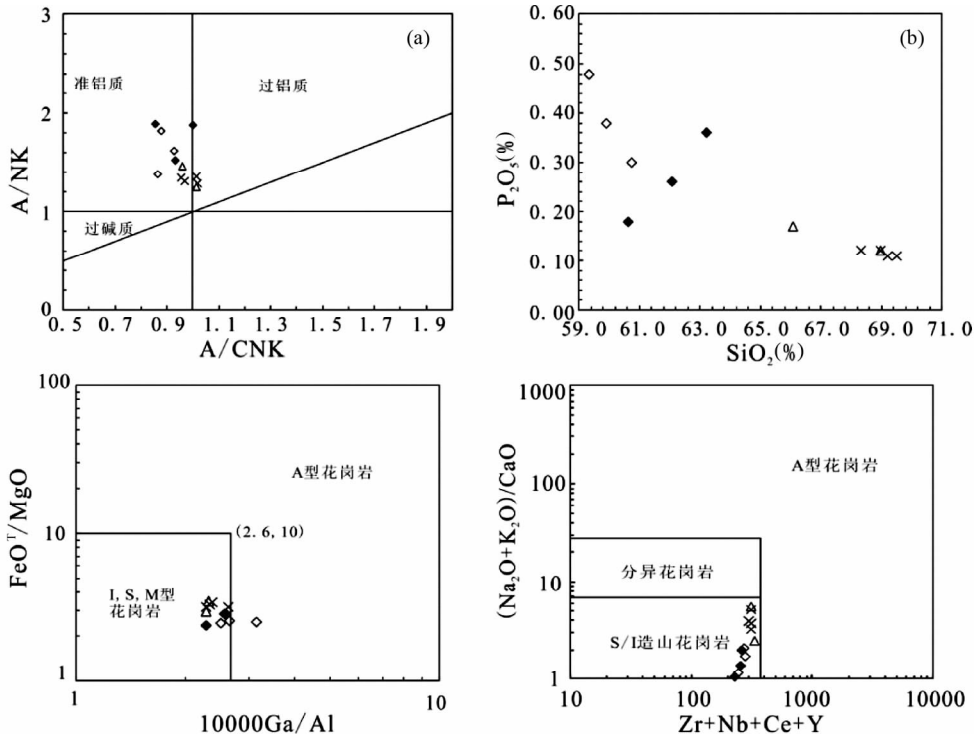


图10 五彩城花岗岩类岩石成因判别

(a) A/NK-A/CNK图解(底图据 Shand, 1927); (b)  $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{SiO}_2$ 图解; (c)  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$ (底图据 Whalen *et al.*, 1987); (d)  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ - $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ (底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 10 Discrimination diagrams for the granitic rocks of WUCAICHENG

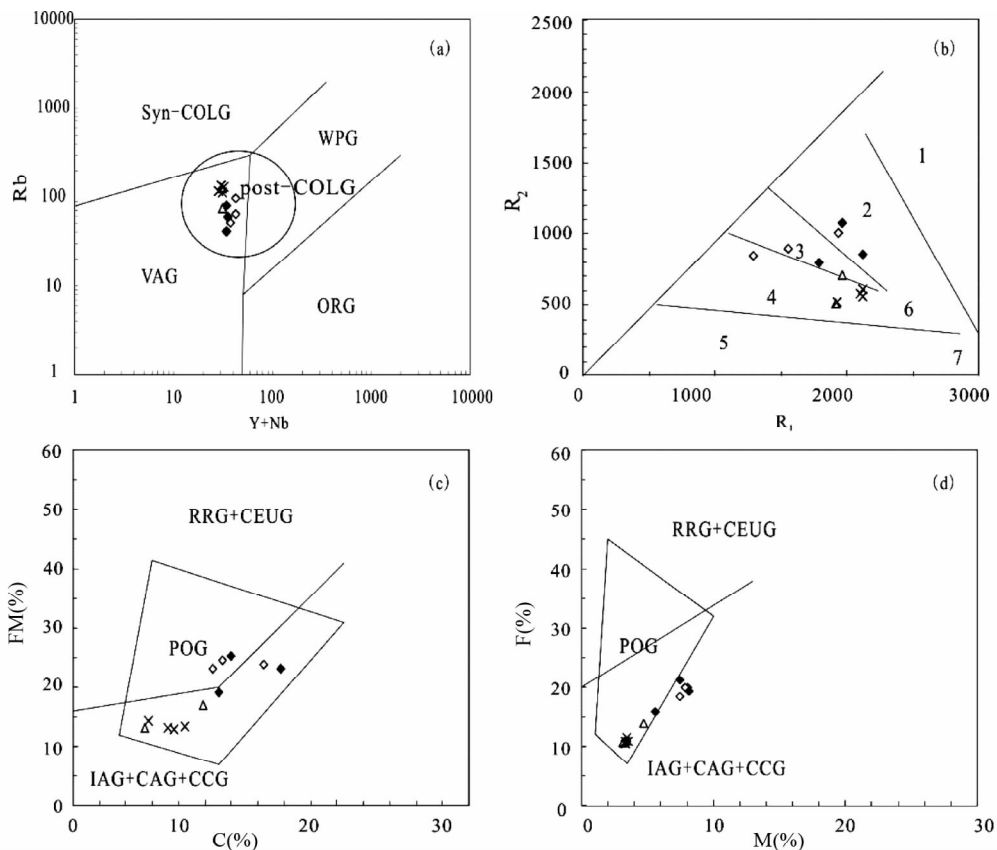


图 11 五彩城花岗岩类构造判别图

(a) Rb-Y + Nb 判别图 (Pearce *et al.*, 1984), ORG-大洋脊花岗岩; WPG-板内花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; post-COLG-后碰撞花岗岩; (b) R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> 判别图 (Batchelor and Bowden, 1985), 1-幔源花岗岩; 2-板块碰撞前消减地区花岗岩; 3-板块碰撞后隆起花岗岩; 4-晚造山期花岗岩; 5-非造山花岗岩; 6-地壳熔融的花岗岩 (同碰撞); 7-造山后期花岗岩; (c) FM-C 图解 (Maniar and Piccoli, 1989); (d) F-M 图解 (Maniar and Piccoli, 1989), IAG-岛弧花岗岩类; CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

Fig. 11 Tectonic setting determinant diagram of the WUCAICHENG granitic rocks

岩类均落入了后造山花岗岩类的区域内; F-M 图解中 (图 11d), 二长花岗岩、钾长花岗岩落入了后造山的区域内, 中性的石英二长闪长岩、石英闪长岩则落在圈定的后造山花岗岩类边界附近。

在卡拉麦里断裂以北的黄羊山、老鸭泉等地, 后碰撞或碰撞后的 A 型花岗岩有大量的报道 (韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2008; 杨高等, 2009; 杨宝凯等, 2011; 韩宇捷等, 2012), 年龄集中在 292 ~ 311Ma, 形成于晚石炭世-二叠纪。本研究获得的 341Ma 左右的后碰撞花岗岩年龄, 是目前在卡拉麦里地区发现的最老的后碰撞花岗岩年龄, 其后碰撞的构造属性为卡拉麦里造山带后碰撞阶段的时间下限提供了可靠的证据, 表明卡拉麦里洋盆在早石炭世中期之前已经闭合。

这一结论得到了本项目在该区获得的地质证据的支持, 本研究中的五彩城花岗岩侵入的围岩为松喀尔苏组, 其下部以一套巨厚的大砾岩明显地角度不整合在下-中泥盆统的卡拉麦里组海相地层之上, 我们在砾岩层中发现了晚泥盆世-

早石炭世的植物化石 *Prelepidondron* sp. (先鳞木); 中部为一套含煤线的砂-粉砂岩, 具陆相沉积的特征; 上部为一套中基性的火山岩, 火山岩的锆石年龄为  $346.8 \pm 3.3$ Ma (另文发表), 表明不整合面上的松喀尔苏组应属早石炭世, 在这之前卡拉麦里已造山隆起。吴润江等 (2009) 在卡拉麦里地区也发现了一套具磨拉石建造特征的地层, 将其归入山梁砾石组, 在其上的中基性火山岩中获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $350\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ , 认为洋盆闭合于早石炭世早期之前。类似的研究成果还有许多, 如: 黄岗等 (2012) 对不整合于卡拉麦里蛇绿岩之上地层中的凝灰岩进行锆石定年, 获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $343.0 \pm 5.0\text{Ma}$ , 认为其代表了卡拉麦里蛇绿岩带之上地层中的凝灰岩进行锆石定年, 获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $343.5 \pm 2.6\text{Ma}$ , 认为以卡拉麦里蛇绿岩带为代表的准噶尔洋在 343Ma 前已关闭; 杨高等 (2011) 在研究卡拉麦里地区下石炭统黑山头组火山岩 (全岩 Rb-Sr 等时年龄为  $339 \pm 4\text{Ma}$ ) 时指出, 卡拉麦里地区早石炭世岩浆活动形成于后碰撞的伸展

背景;汪帮耀等(2011)获得卡拉麦里断裂以北姜巴斯套组双峰式火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $319.8 \pm 2\text{Ma}$ ,表明早石炭世中期到早石炭世末期本区已完成了碰撞后-陆内裂谷的转化。

从区域上看,东准噶尔的卡拉麦里地区与西准噶尔地区的情况非常相似,西准噶尔地区早石炭世后碰撞岩浆活动也十分发育,早石炭世后碰撞花岗岩以 I 型花岗岩为主,年龄集中在  $324 \sim 338\text{Ma}$ (袁峰等, 2006; 韩宝福等, 2006; 范裕等, 2007),晚石炭世-早二叠世则发育大量的 A 型花岗岩(韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; 周涛发等, 2006; 陈家富等, 2010),显示了由早石炭世到晚石炭世花岗岩类型转化的特点。

## 6 结论

(1) 五彩城岩体低  $\text{SiO}_2$  (59.35% ~ 69.51%),  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{A/CNK} < 1.1$ ,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  较好的负相关性,暗色矿物以角闪石为主,显示出 I 型花岗岩的特点。

(2) 五彩城岩体钾长花岗岩的锆石加权平均年龄为  $340.9 \pm 5.1\text{Ma} \sim 341.1 \pm 4.0\text{Ma}$ ,岩石地球化学显示其具有后碰撞花岗岩的构造属性,表明卡拉麦里洋盆在早石炭世之前已经闭合。

(3) 准噶尔地区后碰撞岩浆活动具有一致性,早石炭世与晚石炭世-二叠系花岗岩类型的差异可能反映了碰撞后-陆内裂谷的转变过程。

**致谢** 文章撰写得到了吴元保教授的指导与帮助;锆石 U-Pb 年龄及 Rb、Sr 同位素分析得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜和周炼等老师的帮助;在此一并表示诚挚的感谢。

## References

Chen JF, Han BF and Zhang L. 2010. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and tectonic implications of two generations of Late Paleozoic plutons in northern West Junggar, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2317–2335 (in Chinese with English abstract)

Batchelor RA and Bowden VP. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1–4): 43–55

Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174

Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551

Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691–703

Fan Y, Zhou TF, Yuan F *et al.* 2007. LA-ICP-MS zircon age of Tasite pluton in Sawuer region of west Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1901–1908 (in Chinese with English abstract)

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892–897

Ge XY, Li XH, Chen ZG *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickening. *Chinese Science Bulletin*, 47(11): 962–968

Han BF, Ji JQ, Song B *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract)

Han BF. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64–72 (in Chinese with English abstract)

Han YJ, Tang HF and Gan L. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Laoyaquan A-type granites in East Junggar, North Xinjiang, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 32(2): 193–199 (in Chinese)

Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439

Huang G, Niu G Z, Wang XL *et al.* 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1267–1278 (in Chinese with English abstract)

Kwon ST, Tilton GR, Coleman RG *et al.* 1989. Isotopic studies bearing on the tectonic of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 719–727

Li JY, Xiao XC, Tang YQ *et al.* 1990. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of East Junggar Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305–316 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Yang TN, Li YP *et al.* 2009. Geological features of the Karamaili faulting belt, eastern Junggar region, Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean-continent framework of the Central Asian region. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1817–1826 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Li ZX, Ge WC *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? *Precambrian Research*, 122(1–4): 45–83

Li YC, Yang FQ, Zhao CS *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Beilekuduk pluton in Xinjiang and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2483–2492 (in Chinese with English abstract)

Li YJ, Yang GX, Wu HE *et al.* 2009. The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 17–25 (in Chinese with English abstract)

Lin JF, Yu HX, Yu XQ *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological implication of the Sabei alkali-rich granite from eastern Junggar of Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1876–1884 (in Chinese with English abstract)

Liu JY and Yuan KR. 1996. A discussion on the genesis and tectonic setting of alkali granites in the Ulungur alkali-rich granite belt Xinjiang. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 257–272 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Hu ZC, Gao S *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43

Liu YS, Gao S, Hu ZC *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571

Liu YS, Hu ZC, Zong KQ *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546

Long XP, Sun M, Yuan C *et al.* 2006. Genesis of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar: Constraints on the closure of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 31–40 (in Chinese with English abstract)

- Ludwig KR. 2003. Users manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 25 – 32
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101(5): 635 – 643
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 – 983
- Pearce JA. 1996. Source and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120 – 125
- Peccerillo V and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 – 81
- Roman DC, Cashman KV, Gardner CA *et al.* 2005. Storage and interaction of compositionally heterogeneous magmas from the 1986 eruption of Augustine Volcano, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 68(3): 240 – 254
- Shand SJ. 1927. *Eruptive Rocks*. New York: Wiley & Sons
- Streekeisen A and LeMaitre RW. 1979. A chemical approximation to the model QAPF classification of igneous rocks. *eues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen*, 136: 169 – 206
- Su YP, Tang HF, Liu CQ *et al.* 2006. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175 – 184 (in Chinese with English abstract)
- Su YP, Tang HF and Cong F. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkaline granite body in East Junggar, Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117 – 126 (in Chinese with English abstract)
- Su YP, Zheng JP, Griffin WL *et al.* 2012. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China; Implication for a tectonic transition. *Gondwana Research*, 22(3–4): 1009 – 1029
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Tang HF, Qu WJ, Su YP *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: Constraint from isotopic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989 – 1997 (in Chinese with English abstract)
- Wang BY, Jiang CY, Li YJ *et al.* 2011. Geochemical characteristics and tectonic implications of Karamaili Jiangbasitao Formation volcanic rock in Xinjiang. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(3): 237 – 245 (in Chinese with English abstract)
- Wang DY and Deng JH. 1995. Characteristics and evolution of the plate tectonics in eastern Junggar Xinjiang. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(4): 38 – 45 (in Chinese with English abstract)
- Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 – 419
- Wu RJ, Zhang YY, Tan JY *et al.* 2009. The characteristics of different structure layers and tectonic implications since Late Paleozoic in Kalamaili area, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 102 – 109 (in Chinese with English Abstract)
- Wu Q, Qu X, Chang GH *et al.* 2012. Geochronology of the Hongliuxia ductile shear zone and its constraint on the closure time of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2331 – 2339 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554 – 1569
- Xiao Y, Zhang HF, Shi JA *et al.* 2011. Late Paleozoic magmatic record of East Junggar, NW China and its significance; Implication from zircon U-Pb dating and Hf isotope. *Gondwana Research*, 20(2–3): 532 – 542
- Yang BK, Li YJ, Yan CX, Liu XY, Wu HE and Yang GX. 2011. Confirmation of the Heishantou Formation in Sujiquan belt of the Kalamaili areas in East Junggar. *Xinjiang Geology*, 29(1): 13 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Si GH *et al.* 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Kubusunan granodiorite in the Kalamaili area, eastern Junggar, Xinjiang. *Geology in China*, 35(5): 849 – 858 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HE *et al.* 2009. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3197 – 3207 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HE *et al.* 2011. Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 722 – 736
- Yang GX, Li YJ, Yan J, Wu HE, Yang BK and Yan CX. 2011. Geochemistry characteristics of volcanic rocks of Heishantou Formation in Kalamaili, East Junggar, and tectonic settings implication. *Xinjiang Geology*, 29(3): 257 – 262 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Tan LG *et al.* 2006. Isotopic ages of the I-type granites in West Junggar Sawuer region. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1238 – 1248 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HX, Niu HC, Sato H *et al.* 2004. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 106 – 113 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Yan SH, Chen BL *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb zircon age of subduction granite in the north of East Junggar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1565 – 1574 (in Chinese)
- Zhang ZC, Zhou G, Kusky TM *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the eastern Junggar terrane, Xinjiang, northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution. *Gondwana Research*, 16(2): 201 – 215
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Tan LG and Yue SC. 2006. Geodynamic significance of the A-type granites in the Sawuer region in West Junggar, Xinjiang: Rock geochemical and SHRIMP zircon age evidences. *Science in China (Series D)*, 49(2): 113 – 123
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y *et al.* 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3–4): 191 – 206

## 附中文参考文献

- 陈家富, 韩宝福, 张磊. 2010. 西准噶尔北部晚古生代两期侵入岩的地球化学、Sr-Nd 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2317 – 2335
- 范裕, 周涛发, 袁峰等. 2007. 新疆西准噶尔地区塔斯特岩体锆石 LA-ICPMS 年龄及其意义. *岩石学报*, 23(8): 1901 – 1908
- 葛小月, 李献华, 陈志刚等. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474 – 480
- 韩宝福, 季建清, 李彪等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长 (I) —— 后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077 – 1086
- 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

- 韩宇捷, 唐红峰, 甘林. 2012. 新疆东准噶尔老鸦泉岩体的锆石 U-Pb 年龄和地球化学组成. 矿物学报, 32(2): 193-199
- 黄岗, 牛广智, 王新录等. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限: 来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质通报, 31(8): 1267-1278
- 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆等. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评, 36(4): 305-316
- 李锦轶, 杨天南, 李亚萍等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束. 地质通报, 28(12): 1817-1826
- 李月臣, 杨富全, 赵财胜等. 2007. 新疆贝勒库都克岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 23(10): 2483-2492
- 李永军, 杨高学, 吴宏恩等. 2009. 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义. 岩石矿物学杂志, 28(1): 17-25
- 林锦富, 喻亨祥, 余心起等. 2007. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 岩石学报, 23(8): 1876-1884
- 刘家远, 袁奎荣. 1996. 新疆乌伦古富碱花岗岩带碱性花岗岩成因及其形成构造环境. 高校地质学报, 2(3): 257-272
- 龙晓平, 孙敏, 袁超等. 2006. 东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约. 岩石学报, 22(1): 31-40
- 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强等. 2006. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究. 岩石矿物学杂志, 25(3): 175-184
- 苏玉平, 唐红峰, 丛峰. 2008. 新疆东准噶尔黄羊山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因. 矿物学报, 28(2): 117-126
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平等. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约. 岩石学报, 23(8): 1989-1997
- 汪帮耀, 姜常义, 李永军等. 2011. 新疆卡拉麦里姜巴斯套组火山岩地球化学特征与构造意义. 地球科学与环境学报, 33(3): 237-245
- 王道永, 邓江红. 1995. 东准噶尔地区板块构造特征及演化. 成都理工大学学报, 22(4): 38-45
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23-31
- 吴润江, 张元元, 谭佳奕等. 2009. 新疆卡拉麦里地区晚古生代以来不同构造层特征及大地构造意义. 地学前缘, 16(3): 102-109
- 吴琪, 屈迅, 常国虎等. 2012. 红柳峡韧性剪切带形成时代及其对准噶尔洋盆闭合时限的约束. 岩石学报, 28(8): 2331-2339
- 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
- 杨宝凯, 李永军, 闫存兴, 刘晓宇, 吴宏恩, 杨高学. 2011. 东准卡拉麦里地区苏吉泉一带黑山头组的厘定. 新疆地质, 29(1): 13-16
- 杨高学, 李永军, 司国辉等. 2008. 东准库布苏南岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. 中国地质, 35(5): 849-858
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区黄羊山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 岩石学报, 25(12): 3197-3207
- 杨高学, 李永军, 严镜, 吴宏恩, 杨宝凯, 闫存兴. 2011. 卡拉麦里地区黑山头组火山岩地球化学特征及构造环境分析. 新疆地质, 29(3): 257-262
- 袁峰, 周涛发, 谭绿贵等. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义. 岩石学报, 22(5): 1238-1248
- 张海祥, 牛贺才, Sato H 等. 2004. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据. 高校地质学报, 10(1): 106-113
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林等. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年. 科学通报, 51(13): 1565-1574
- 周涛发, 袁峰, 范裕, 谭绿贵, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 A 型花岗岩的地球动力学意义: 来自岩石地球化学和锆石 SHRIMP 定年的证据. 中国科学(D 辑), 36(1): 39-48