doi:10.3799/dqkx.2010.075

# 东准库布苏南岩体和包体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义

# 杨高学<sup>1</sup>,李永军<sup>1</sup>,司国辉<sup>1</sup>,吴宏恩<sup>2</sup>,张永智<sup>2</sup>,金 朝<sup>1</sup>

1.长安大学地球科学与资源学院,西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西西安 710054
 2.新疆维吾尔族自治区有色地质矿产勘查院,新疆乌鲁木齐 830000

摘要:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,库布苏南花岗闪长岩形成时代为  $287 \pm 2 \text{ Ma,MSWD} = 0.15$ ,包体年龄为  $286 \pm 3 \text{ Ma,MSWD} = 0.22$ ,在误差范围内完全一致,这就排除了暗色包体是来源于深部变质岩熔融残留体或浅部围岩捕虏体的可能性,同时也排除了基性岩浆在花岗质岩浆固结后才侵入的可能,为岩浆混合作用的存在提供最有力的证据. 地球化学研究表明,包体富集基性组分 Ti、Zr、Nb、Hf 等高场强元素以及稀土元素,包体表现为与寄主岩石既相互联系又受其制约,库布苏南花岗闪长岩体具有低<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 初始比值和高正  $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,表明花岗岩的来源有地幔物质参与,包体是过冷的镁铁质岩浆混入到中酸性岩浆中经快速冷凝的结果. 库布苏南花岗闪长岩形成的时代略晚于东准噶尔乌伦古河碱性花岗岩和卡拉麦里碱性花岗岩的形成时代(300 Ma 左右),均为准噶尔周边地区后碰撞伸展构造背景下岩浆活动的产物,其形成和演化标志了准噶尔地区后碰撞幔源岩浆底侵作用导致大陆地壳垂向生长的过程.

关键词:LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年;岩浆混合作用;闪长质包体;地球化学;地质年代;东准噶尔. 中图分类号:P591 文章编号:1000-2383(2010)04-0597-14 收稿日期:2009-06-05

# LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Kubusunan Granodiorite and the Enclaves from Kalamaili Area in Eastern Junggar, Xinjiang, and Its Geological Implications

YANG Gao-xue<sup>1</sup>, LI Yong-jun<sup>1</sup>, SI Guo-hui<sup>1</sup>, WU Hong-en<sup>2</sup>, ZHANG Yong-zhi<sup>2</sup>, JIN Zhao<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences & Resources, Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Xinjiang Institute of Geological Exploration for Non-ferrous Resources, Urumqi 830000, China

Abstract: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Kubusunan granodiorite and its enclaves in the Kalamaili area of the eastern Junggar indicates that the isotopic age of the granodiorite is  $287 \pm 2$  Ma (MSWD=0.15), and that of its enclaves is  $286 \pm 3$  Ma (MSWD=0.22). The fact that they are the same in error range, showing that granodiorite and enclaves were formed at the same age, ruling out the possibility that the dark microgranule enclaves came from the solid metamorphic rock melt remaining in deep crust, or xenoliths from wall rock in the upper crust, at the same time, ruling out the possibility that the basic magma invaded solidified ganite magma. It presents strong evidence for the crust and mantle magma hybrid. Petrological and geochemical studies reveal the relationship between the enclaves and the host rock and it is found that they are related and restricted with each other. The enclaves are rich in basic ingredients HFSE(such as Ti, Zr, Nb and Hf) and REE, Kubusunan granodiorite characteristics of low <sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr initial values and high  $\epsilon_{Nd}(t)$  values, indicating that granites originated partly from mantle magma. The large number of microgranular dioritic enclaves is direct evidence of crust-mantle magma hybrid. Kubusunan granodiorite was formed later than the Ulungur river and Kalamaili alkali granite (300 Ma $\pm$ ) resulting from post-collision magma activity surrounding eastern Junggar.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; hybrid origin; dioritic microgranular enclaves; geochemistry; geochronology; eastern Junggar.

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(No. QD200508).

作者简介:杨高学(1980-),男,在读博士,主要从事区域地质调查等方面研究. E-mail: mllygx@126.com

新疆北部天山一准噶尔一阿尔泰地区以其完整 的后碰撞演化历史(从主碰撞、后碰撞到板内环境)、 强烈的后碰撞构造一岩浆一成矿活动,成为研究后 碰撞构造一成矿的理想地区,受到众多地质学家的 关注(涂光炽,1993; Han et al., 1997; 胡霭琴等, 1997:马瑞士等, 1997:韩宝福等, 1999, 2004a, 2004b, 2006; 李锦轶和肖序常, 1999; Hu et al., 2000;李锦轶,2004;李宗怀等,2004;杨牧等,2005; Zhu et al., 2005, 2006, 2007; 高俊等, 2006; 苏玉 平等,2006;肖文交等,2006;李华明等,2009;唐功建 等,2009;李永军等,2010),而东准噶尔卡拉麦里地 区与锡矿相关的碱性花岗岩带是研究的热点(Han et al., 1997;韩宝福等, 1999, 2006;李宗怀等, 2004;苏玉平等,2006;肖文交等,2006).近年来,积 累了大量同位素年龄资料:刘家远和袁奎荣(1996) 测得贝尔库都克岩体 Rb-Sr 等时线年龄为 287 Ma 和单颗粒锆石年龄为 313 Ma,黄羊山岩体钠铁闪石 K-Ar 同位素年龄为 304 Ma 和锆石 U-Pb 年龄为 318 Ma;汤好书等(2006)测得贝尔库都克锡矿石脉 中白云母的 K-Ar 同位素年龄为  $296\pm3$  Ma;孙桂华 等(2005)测得哈尔里克闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄值为 316±3 Ma;林锦富等(2007)测得东准噶 尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 313±2 Ma;唐红峰等(2007a)测得萨北碱性 A 型花 岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 306±3 Ma 和

萨惹什克锡矿石辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 307±11 Ma;苏玉平等(2006)测得卡拉麦里地区苏 吉泉铝质 A 型花岗岩<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U加权平均年龄为 304±2 Ma,黄羊山岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 300~305 Ma;唐红峰等(2007b)测得卡拉麦里斜长 花岗岩的锆石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 373 Ma; 韩宝福等(2006)研究认为,东准噶尔后碰撞深成岩 浆活动发生在 330~265 Ma,主要集中发生在 330~ 310 Ma 和 305~280 Ma两个时段. 笔者在进行"新 疆青河、奇台县红柳沟一苏吉泉一带 1:5 万区域地 质矿产调查"项目时,对该区岩体及包体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得了可靠年龄资料,为 东准噶尔后碰撞阶段的时限约束提供科学依据,在 此基础上,结合地球化学资料,探讨东准噶尔后碰撞 岩浆活动的起源及演化特征.

# 1 地质背景及岩石特征

新疆东准噶尔卡拉麦里地区位于西伯利亚和塔 里木两个板块之间,是东准噶尔古生代造山带的一 部分,是中亚构造框架内一个非常重要的构造单元. 一条北西向延伸的蛇绿混杂岩带沿卡拉麦里深大断 裂断续分布,其形成时代为早泥盆世(李锦轶等, 1990;李锦轶,1995).研究区出露的地层(从老到新)





Fig. 1 Geological sketch of Kubusunan intrusion in Kalamaili tectonic belt, eastern Junggar 1. 第四系; 2. 侏罗系; 3. 石炭系姜巴斯套组; 4. 石炭系黑山头组; 5. 花岗闪长岩; 6. 碱长花岗岩; 7. 花岗岩带; 8. 超动接触关系; 9. 脉动接触关系; 10. 侵入接触; 11. 断裂及编号; 12. 构造带; 13. 样品位置及同位素年龄; 14. 构造区带界线; 15. 国界; Ⅰ. 阿尔泰构造带; Ⅰ. 阿尔曼太构造带; Ⅱ1. 卡拉麦里构造带; Ⅱ2. 准噶尔盆地; Ⅲ3. 将军庙构造带; ①额尔齐斯断裂; ②阿尔曼太断裂; ③卡拉麦里断裂 第4期

有志留统红柳沟组(凝灰质砂岩、泥岩以及凝灰岩和 灰岩夹层),下泥盆统托让格库都克组(主要为玄武 岩和安山玄武岩),中泥盆统卡拉麦里组(砾岩和砂 岩),中泥盆统蕴都喀拉组(砂岩、粉砂岩和泥岩),下 石炭统黑山头组(凝灰岩、粉砂岩和砂岩),姜巴斯套 组(凝灰质砂岩夹安山岩和玄武岩、凝灰岩),巴塔玛 依内山(安山岩和玄武岩).它们之间基本上全部为 断层接触,有的地方被第四系覆盖.区内断裂发育, 分为3个断裂组:北西向、东西向和北东向断裂.北 西向断裂切割东西向断裂,但其被北东向断裂限制. 区内侵入岩发育,富碱花岗岩类出露面积约 1100 km<sup>2</sup>,由不同期次、大小不等的岩体组成,如黄 羊山碱性花岗岩体、贝勒库都克等黑云母花岗岩体 和库布苏南花岗岩体(图1).它们多为岩基状分布, 具有高硅、富碱和高分异的特点.

库布苏南花岗闪长岩位于卡拉麦里深大断裂带 的东北侧(图1),呈条带状分布,北北西走向,与主 构造线相一致,出露面积约55km<sup>2</sup>,接触面倾向围 岩,局部与围岩接触处粒度变细,围岩也有不同程度 的热变质,具球状风化特征.在野外调查和室内研究 的基础上,将该侵入体解体为灰白色似斑状花岗闪 长岩和浅肉红色似斑状碱长花岗岩,其中以前者为 主,两者脉动侵入接触关系明显.

岩体主体为花岗闪长岩,具中细粒结构、块状构 造;主要矿物组成为斜长石(40%~50%)、钾长石 (25%~30%)、石英(20%~25%)、角闪石(5%~ 10%)和黑云母(1%~5%). 斜长石:粒径为 0.3~ 2.4 mm,半自形宽板状,可见聚片双晶,测得部分斜 长石 An 为 31; 钾长石: 粒径为 0.8~1.2 mm, 呈他 形粒状,为正长石、微斜长石和条纹长石等碱性长 石,常与石英形成共结平衡,形成各种不规则交生结 构;石英:粒径为 0.5~1.3 mm,他形粒状,呈填隙物 充填或呈蠕虫状分布于钾长石中,特别见较大的石 英包裹各种形态的钾长石;角闪石:粒径大小为 0.5~1.2 mm 左右, 自形一半自形长柱状, 多呈聚 集态不均匀分布于浅色矿物间;黑云母:粒径为 0.2~1.2 mm,鳞片状,呈集合体聚集态充填于长 石、石英间,此外还有榍石和锆石及很少量填隙的萤 石,见针状磷灰石、钛铁矿等副矿物.似斑状碱长花 岗岩在矿物种类和粒径上与花岗闪长岩相似,不同 之处在矿物含量,斜长石为 $1\% \sim 3\%$ ,角闪石为  $1\% \sim 5\%$ ,而钾长石( $55\% \sim 70\%$ )含量特别高.

库布苏南岩体中包体发育,形状各异,有球状、 椭球状、透镜状、纺锤状、扁豆状和长条状等,大多数

为卵圆形或椭球形.大小变化较大,大至几米,小至 几厘米甚至更小;色率较深,包体边缘有截然和弥散 2种,大多数为弥散过渡关系,这反映了包体形成时 2个端员之间热力学状态的差异(Vernon, 1991); 包体的暗色矿物定向排列及"拖尾"等流线性形态, 表明包体被"包裹"时呈塑性状态(Vernon, 1991;Giorgio et al., 1998),包体核心区几乎没有石英存 在.包体以微细粒结构为主,块状构造,受寄主岩的 同化混染,发育似斑状结构,斑晶主要为斜长石  $(5\% \sim 10\%)$ 、角闪石 $(1\% \sim 5\%)$ 和石英(1%). 这些 斑晶在寄主花岗岩石中都有对应的矿物,而且两者在 形态、成分、光性上都有一致性,尤其在包体与寄主岩 的接触界线上常见斑晶横跨两侧;有的长石棱角圆 化,表明它们并非原地结晶形成的,而是来自寄主花 岗岩浆形成的捕虏晶(Didier and Barbarin, 1991);斜 长石的异常环带结构发育,具更长石环边的钾长石巨 晶,表明其形成环境是动荡的.基质为斜长石(50%~ 70%)、角闪石(5%~30%)、石英(1%~10%)和黑云 母(1%~5%)的等粒集合体,斜长石颗粒自形程度 好,具有强烈的绢云母化;角闪石和黑云母具有刀刃 状和锯齿状的边缘,呈小颗粒分布于长英质矿物之 间;此外,微细粒角闪石的港湾状边缘常被黑云母充 填,这些可能都是岩浆混合熔蚀造成的.

# 2 样品的采集、制样及分析方法

用于实验分析的 2 个样品采集于新鲜的岩石: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的寄主岩样品(编号: IV 25-1)为库布苏南花岗闪长岩的主体花岗闪长岩; 闪长质微细粒包体样品(编号: IV 25-2)采自距寄主 岩石样品(编号: IV 25-1)约 1 km 的东南侧花岗闪长 岩中(图 1),公里网坐标分别为: X = 5 018 216,Y =16 270 569; X = 5 017 962, Y = 16 271 251.

首先,使用常规的重液浮悬和电磁分离方法挑 选出锆石,然后在双目镜下根据锆石颜色、自形程 度、形态和透明度等特征初步分类,挑选出具有代表 性的锆石,将锆石样品分别用双面胶粘在载玻片上, 放上 PVC 环,再将环氧树脂和固化剂充分混合后注 入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品座从载玻片 上剥离,并对其进行抛光,直到样品露出一个光洁的 平面,进行锆石显微(反射光和透射光)照相;然后用 体积百分比为 3%的 HNO。清洗样品并镀金,作成 样品靶.激光剥蚀电感偶合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位 U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国

家重点实验室完成.实验采用的ICP-MS为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a,激光剥蚀系统 为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 200M,该系 统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(波长 193 nm)与 MicroLas 公司的光 学系统组成. 激光剥蚀斑束直径为 30 µm, 激光剥蚀 样品的深度为  $20 \sim 40 \, \mu m$ . 实验中采用 He 作为剥蚀 物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人 工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进 行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用 一个质量峰一点的跳峰方式,每完成  $4\sim5$  个待测样 品测定,插入测标样一次.在所测锆石样品 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM 610. 锆石年龄采用 标准锆石 91500 作为外部标准物质. 元素含量采用 NIST SRNI610 作为外标.由于 SiO<sub>2</sub> 在锆石中的含 量较恒定,选择<sup>29</sup>Si作为内标来消除激光能量在点 分析过程中以及分析点之间的漂移,对于大多数元 素单点分析的相对标准偏差为 5%~15%. 详细分 析步骤和数据处理方法参见相关文献(Horn et al., 2000; Ballard et al., 2001; Koler et al., 2002;柳小 明等, 2002;何世平等, 2008).采用 Glitter(ver40, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值及元 素含量进行计算.并按照 Andersen Tom 的方法 (Andersen, 2002),用LA-ICP-MS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正.年龄计算及 谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成(Ludwig, 1991).

# 3 锆石特征及分析结果

从样品(IV 25-1, IV 25-2)中选取的锆石为浅黄 色一无色透明,呈正方双锥状、钮柱状及半截锥状自 形晶体.晶体长:0.06~0.42 mm,宽:0.02~ 0.15 mm,柱状长宽比为2:1~4:1,阴极发光图像 表现出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构, 属于岩浆结晶产物(吴元保和郑永飞,2004)(图2).

从样品测得的同位素比值和年龄数据(表1)可



图 2 花岗闪长岩( IV 25-1)和微细粒包体( IV 25-2)中典型锆石的 CL 图象和年龄值

Fig. 2 Representative zircon CL images and ages of the granodiorite (№25-1) and the microgranular enclave (№25-2) 圈表示 U-Pb 分析点位置,左上角数字表示点号,右下角数字表示<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 表面年龄

P-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
5-1)和包体(N25-2)LA-ICP
库布苏南花岗闪长岩(N2)
表 1

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of the Kubusunan granodiorite (N 25-1) and the microgranular enclave (N 25-2)

											8		2							
				同位湯	素比值						E	位素年	춵(Ma)				同位湯	景含量(加	g/g)	
样品编号	$^{207}\mathrm{Pb}_{\prime}$	/ <sup>206</sup> Pb	$^{207}\mathrm{Pb}$	/ <sup>235</sup> U	$^{206}\mathrm{Pb}_{\prime}$	/238 U	$^{208} Pb/$	<sup>232</sup> Th	$^{207}\mathrm{Pb}/^2$	$^{06} \mathrm{Pb}$	$^{207}\mathrm{Pb}/^2$	35 U	$^{206}\mathrm{Pb}/^{23}$	n,	$^{208}\mathrm{Pb}/^{232}$	Th	DL *	1 L	ŢŢ	Th/U
	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	2	пт	C	
IV 25-1-01	0.0596	0.0010	0.3714	0.0057	0.0452	0.0004	0.0138	0.0002	591	20	321	4	285	2	277	ŝ	16.3	120.9	262.4	0.5
IV 25-1-02	0.0638	0.0009	0.3413	0.0042	0.0388	0.0003	0.0120	0.0001	736	14	298	0	245	2	241	63	23.0	197.4	410.8	0.5
IV 25-1-03	0.0533	0.0008	0.3386	0.0041	0.0460	0.0003	0.0132	0.0001	343	15	296	0	290	2	265	63	14.7	89.7	297.9	0.3
IV 25-1-04	0.0582	0.0012	0.3818	0.0070	0.0476	0.0004	0.0147	0.0001	538	45	328	വ	300	5	296	2	23.1	218.3	337.9	0.7
IV 25-1-05	0.0718	0.0020	0.4116	0.0108	0.0416	0.0004	0.0126	0.0001	980	58	350	8	263	2	253	2	24.5	202.5	346.6	0.6
IV 25-1-06	0.0565	0.0014	0.3403	0.0080	0.0437	0.0004	0.0132	0.0002	471	36	297	9	276	5	265	4	15.9	25.1	69.1	0.4
IV 25-1-07	0.0566	0.0013	0.3546	0.0077	0.0454	0.0004	0.0158	0.0002	475	33	308	9	286	53	316	4	14.7	111.9	232.2	0.5
IV 25-1-08	0.0553	0.0010	0.3291	0.0054	0.0432	0.0003	0.0132	0.0002	423	23	289	4	272	2	266	<i>ლ</i>	20.5	234.5	255.5	0.9
IV 25-1-09	0.0535	0.0013	0.3200	0.0075	0.0434	0.0004	0.0136	0.0001	351	57	282	9	274	5	273	~1	14.7	103.5	261.2	0.4
IV 25-1-10	0.0589	0.0009	0.3944	0.0052	0.0486	0.0004	0.0164	0.0002	563	16	338	4	306	2	329	60	16.3	132.8	281.7	0.5
IV 25-1-11	0.0645	0.0010	0.3891	0.0053	0.0438	0.0003	0.0170	0.0002	757	16	334	4	276	2	341	<i>ი</i> 2	28.0	219.4	431.1	0.5
IV 25-1-12	0.0557	0.0014	0.3716	0.0091	0.0484	0.0004	0.0151	0.0001	441	59	321	7	304	5	302	63	16.9	27.3	74.4	0.4
IV 25-1-13	0.0596	0.0011	0.4237	0.0069	0.0516	0.0004	0.0119	0.0001	588	22	359	22	324	ŝ	238	63	18.1	104.2	252.1	0.4
IV 25-1-14	0.0545	0.0010	0.3968	0.0066	0.0528	0.0004	0.0168	0.0002	390	23	339	ى ئ	332	3	337	4	33.5	272.1	558.2	0.5
IV 25-1-15	0.0607	0.0009	0.4399	0.0058	0.0526	0.0004	0.0191	0.0002	627	16	370	4	330	7	383	4	17.4	141.8	272.0	0.5
IV 25-1-17	0.0537	0.0010	0.3551	0.0062	0.0480	0.0004	0.0151	0.0002	358	25	309	2 L	302	2	303	0	17.5	111.2	265.9	0.4
IV 25-1-18	0.0709	0.0008	0, 4218	0.0039	0.0432	0,0003	0.0217	0.0002	953	6	357	ŝ	272	2	435	ŝ	18.1	120.6	264.8	0.5
IV 25-1-19	0.0538	0.0007	0.3551	0.0040	0.0479	0.0004	0.0158	0.0001	361	13	309	3	302	2	317	<i>ი</i>	16.3	120.9	262.4	0.5
IV 25-1-20	0.0535	0.0008	0.3785	0.0050	0.0513	0.0004	0.0161	0.0002	351	17	326	4	322	2	322	3	23.0	197.4	410.8	0.5
IV 25-2-01	0.0679	0.0010	0.4723	0.0062	0.0504	0.0004	0.0161	0.0001	740	56	372	8	315	ŝ	308	63	15.0	24.2	64.6	0.4
IV 25-2-03	0.0756	0.0012	0.4794	0.0067	0.0460	0.0004	0.0119	0.0001	1085	16	398	ß	290	57	239	63	35.3	372.2	494.9	0.8
IV 25-2-04	0.1533	0.0018	0.9347	0.0083	0.0442	0.0003	0.0236	0.0002	462	66	267	15	245	53	242	~1	36.3	392.7	575.7	0.7
IV 25-2-06	0.0597	0.0007	0.3968	0.0039	0.0482	0.0004	0.0120	0.0001	592	10	339	0	304	\$	241	63	64.5	882.7	950.3	0.9
IV 25-2-07	0.0549	0.0007	0.4097	0.0041	0.0541	0.0004	0.0152	0.0001	408	11	349	3	340	2	304	53	27.0	224.4	427.5	0.5
IV 25-2-08	0.0540	0.0007	0.3321	0.0036	0.0446	0.0003	0.0119	0.0001	373	12	291	с <b>л</b>	281	52	239	67	15.5	24.5	66.9	0.4
IV 25-2-09	0.1240	0.0016	0.9194	0.0095	0.0538	0.0004	0.0185	0.0001	1 654	47	557	10	328	33	305	2	24.3	227.7	381.3	0.6
IV 25-2-10	0.2003	0.0026	1.2576	0.0132	0.0455	0.0004	0.0330	0.0003	$1 \ 007$	98	327	20	240	3	230	4	46.1	511.3	598.3	0.9
IV 25-2-13	0.1229	0.0015	0.8109	0.0080	0.0479	0.0004	0.0204	0.0001	$1\ 228$	60	416	10	285	\$	271	63	32.4	223.8	488.7	0.5
IV 25-2-14	0.0510	0.0009	0.3608	0.0060	0.0513	0.0004	0.0128	0.0001	243	24	313	4	322	3	257	<del>ന</del>	15.1	23.6	65.1	0.4
IV 25-2-16	0.0492	0.0007	0.3185	0.0038	0.0470	0.0004	0.0123	0.0001	155	14	281	<del>ന</del>	296	62	246	2	17.3	24.4	69.9	0.4
IV 25-2-17	0.0531	0.0007	0.3359	0.0036	0.0458	0,0003	0.0114	0,0001	335	12	294	0	289	~7	230	-	109.8	2 303.1	1568.1	1.5
IV 25-2-18	0.1014	0.0011	0.5473	0.0045	0.0391	0.0003	0.0100	0.0001	1 649	7	443	с С	247	53	201	н	59.0	562.9	711.3	0.8
IV 25-2-19	0.0472	0.0005	0.3043	0.0029	0.0467	0.0003	0.0115	0.0001	59	11	270	2	294	2	231	H	19.1	159.6	277.3	0.6
IV 25-2-20	0.0526	0.0006	0.3612	0.0033	0.0498	0.0004	0.0125	0.0001	310	10	313	2	313	2	251	2	76.9	1 211.5	1 172.5	1.0



图 3 花岗闪长岩(W25-1)和微细粒包体(W25-2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a,c)和直方图(b,d)

Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams (a,c) and histograms of weighted average ages (b,d) of the granodiorite (JV 25-1) and microgranular enclave (JV 25-2)

见,锆石具有较高的 Th/U 比值( $0.3 \sim 1.5$ ,多数 >0.7),属于典型岩浆成因锆石的范围(Pidgeon *et* al., 1998; Claesson et al., 2000; Gao et al., 2002). 样品的 34 个测点的 Th 含量变化范围为 23.6~  $2 303.1 \,\mu g/g$ , U 含量变化范围为 64.6 ~  $1568.1 \mu g/g$ ,且Th、U含量呈现出较好的正相关关 系,与典型岩浆锆石特征一致.寄主岩花岗闪长岩锆 石微区有效数据点共 19个,除5号和 18 号外的 17 个样点<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 比值非常接近,为 0.053 3~ 0.0645(表1),表明该类锆石为同期岩浆结晶成因. 由于<sup>235</sup> U 的衰变比<sup>238</sup> U 快 6.3 倍,放射成因的<sup>207</sup> Pb 在地球早期历史中更为丰富,而显生宙以来<sup>207</sup> Pb 生 成率很低,这种变化是由于显生宙锆石的<sup>207</sup> Pb 计数 速率低,造成<sup>207</sup> Pb 测定的误差较大,使得<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 和<sup>207</sup> Pb/<sup>235</sup> U比值可信度降低.因此,对于显生宙锆 石,一般采用<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄 (Compston *et al.*, 1992).<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄约 245~332 Ma,大部分集中 在 263~306 Ma,最大误差为 3 Ma. 几乎所有数据点 集中分布在谐和曲线附近,花岗闪长岩样品的加权平 均<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为 287 ± 2 Ma, MSWD=0.15(95% 置信度)(图 3a,3b). 包体样品锆石微区有效数据点共 15 个,<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄范围在 240~340 Ma,大部分集 中在 281~315 Ma,最大的年龄误差为 3 Ma. 几乎所 有数据点集中分布在谐和曲线附近,包体样品的加权 平均<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为 286 $\pm$ 3 Ma, MSWD = 0. 22 (95%置信度)(图 3c,3d),在误差范围内完全一致,按 照最新的国际地质年表中石炭纪和二叠纪划分方案 (Gradstain *et al.*,2004),均属于早二叠世,前者代表 花岗闪长岩侵入年龄,后者代表暗色微粒包体的形成 年龄,表明两者是同时期形成的.

# 4 地球化学特征

#### 4.1 测试方法

主量元素在宜昌地质矿产研究所用 XFS X 射 线荧光光谱和 GFAAS 原子吸收光谱法分析,其  $H_2O^+$ 和  $H_2O^-$ (包括烧失量)均小于 2.5%,氧化物 总量介于 99.41%~99.64%,精度符合标准.微量 元素、稀土元素在宜昌地质矿产研究所采用 ICP-MS 法分析,符合 DZ-0130-94 标准.测试结果分别 见表 2 和表 3.

#### 4.2 主量元素及标准矿物组成

在化学成分上,库布苏南岩体投在二长花岗岩、 花岗闪长岩和闪长岩范围内,主体为二长花岗岩,其 中所含包体为闪长质(图 4).寄主花岗岩 SiO<sub>2</sub> 含量 平均达 66.99%,而包体 SiO<sub>2</sub> 介于 55.13% ~ 61.43%之间.寄主岩中 A/CNK=0.94~1.05,A/ NK=1.45~1.63,对应于准铝质花岗岩,包体的 A/ CNK与寄主岩特征基本相类似,只是变化范围较

#### 表 2 库布苏南岩体暗色微粒包体与寄主岩主量元素含量(%)及 CIPW 标准矿物含量(%)

Table 2 Major element compositions (%) and CIPW minerals of enclaves and host rock of the Kubusunan

		5	-												
序号	类型	样品	$\mathrm{SiO}_2$	${\rm TiO}_2$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	$\mathrm{Na}_2\mathrm{O}$	$\mathrm{K}_2\mathrm{O}$	$P_2  \mathrm{O}_5$	烧失	总量
1	寄主岩	D386	68.55	0.48	14.85	0.38	3.20	0.06	1.26	2.57	3.87	3.57	0.11	0.69	99.59
2	寄主岩	W-27-1	67.75	0.44	15.40	0.90	2.66	0.06	1.45	3.23	4.11	3.10	0.12	0.41	99.64
3	寄主岩	VI-40-1	67.34	0.30	16.69	0.11	2.78	0.04	0.91	2.98	4.19	3.31	0.06	0.90	99.61
4	寄主岩	W-25-1	67.06	0.50	15.26	0.86	2.87	0.07	1.63	3.41	3.96	3.31	0.13	0.57	99.62
5	寄主岩	IV-23-1	64.24	0.59	16.38	0.72	3.56	0.07	1.90	3.90	4.36	2.67	0.14	1.00	99.53
6	包体	W-25-2	61.43	0.79	16.91	0.86	4.25	0.09	2.63	4.61	4.22	2.21	0.22	1.22	99.44
7	包体	IV-23-2	55.85	0.89	16.95	1.62	5.18	0.17	4.23	6.00	5.18	1.66	0.23	1.44	99.41
8	包体	D388	55.13	0.86	16.92	2.73	4.55	0.15	4.75	7.11	4.38	1.88	0.16	0.81	99.43
序号	类型	样品	Q		Or	Ab	An	С	)	Hy	Mt	Il		Di	Ap
1	寄主岩	D386	23.34	21	. 35	33.07	12.22	0.1	18	8.12	0.56	0.91	L 0.	. 00	0.25
2	寄主岩	W-27-1	22.01	18	3.48	35.01	14.49	0.0	00	6.79	1.32	0.85	5 0	. 79	0.26
3	寄主岩	VI-40-1	20.91	19	9.83	35.88	14.65	0.9	91	6.97	0.16	0.57	7 0	. 00	0.16
4	寄主岩	W-25-1	20.87	19	9.77	33.79	14.18	0.0	00	7.11	1.26	0.96	6 1	. 79	1.26
5	寄主岩	IV-23-1	16.06	16	5.03	37.4	17.45	0.0	00	9.43	1.06	1.13	3 1	. 12	1.06
6	包体	W-25-2	12.93	13	3.31	36.31	21.03	0.0	00	12.37	1.27	1.52	2 0	. 78	0.50
7	包体	IV - 23 - 2	0.00	10	0.02	44.69	18.44	0.0	00	13.13	2.40	1.73	8 8	. 66	0.50
8	包体	D388	1.21	11	. 28	37.54	21.21	0.0	00	11.79	4.01	1.65	5 10	.96	0.35

#### 表 3 库布苏南岩体暗色微粒包体与寄主岩微量和稀土元素含量(µg/g)

Table 3 Trace and REE element compositions ( $\mu g/g$ ) of enclaves and host rock of the Kubusunan

					•						
序号	类型	样品	Ba	Rb	Sr	Υ	Zr	Nb	Th	Ga	Ni
1	寄主岩	D386	432.47	134.07	253.02	30.71	155.01	8.84	15.22	19.22	7.70
2	寄主岩	W-27-1	406.23	102.40	349.30	17.94	149.31	7.31	12.41	17.21	9.18
3	寄主岩	VI-40-1	488.01	104.41	302.24	22.25	86.53	5.86	12.01	18.09	8.04
4	寄主岩	W-25-1	416.04	108.07	326.31	20.13	112.04	7.86	8.76	19.23	11.21
5	寄主岩	IV-23-1	410.25	81.30	308.08	20.41	123.49	6.16	11.30	20.44	11.93
6	包体	IV-25-2	468.09	58.60	383.42	24.09	149.21	8.35	5.08	19.42	12.08
7	包体	IV-23-2	178.49	97.40	343.05	31.81	141.35	8.83	8.66	28.31	19.12
8	包体	D388	478.20	58.70	408.02	36.53	85.09	7.35	5.74	42.80	34.33
序号	类型	样品	Cr	Hf	Sc	Ta	Со	Li	Be	В	W
1	寄主岩	D386	38.52	5.08	7.82	1.79	8.31	42.31	3.08	12.92	1.20
2	寄主岩	W-27-1	10.71	4.64	6.47	0.98	9.26	53.08	2.58	14.07	1.32
3	寄主岩	VI-40-1	15.42	3.00	4.38	0.51	6.12	31.51	2.73	13.83	1.56
4	寄主岩	W-25-1	21.52	3.82	7.32	0.81	10.61	54.44	2.72	12.14	1.43
5	寄主岩	IV-23-1	48.13	4.31	8.68	0.53	11.82	27.32	2.60	18.43	1.10
6	包体	IV-25-2	26.23	4.32	10.71	1.22	15.31	54.71	2.20	13.61	1.02
7	包体	IV - 23 - 2	46.81	4.20	19.82	0.70	22.60	39.82	3.84	28.83	3.22
8	包体	D388	87.72	2.45	21.33	0.65	25.31	27.5	1.55	23.21	0.34
序号	类型	样品	Sn	Mo	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
1	寄主岩	D386	18.02	0.85	23.81	48.91	6.46	23.60	5.16	0.95	5.34
2	寄主岩	IV-27-1	8.20	0.76	16.32	32.93	4.37	16.01	3.49	0.91	3.55
3	寄主岩	VI-40-1	11.03	1.23	18.91	38.82	4.95	17.62	3.97	1.15	4.03
4	寄主岩	W-25-1	9.16	0.64	16.14	33.30	4.50	17.19	3.63	0.94	3.77
5	寄主岩	IV-23-1	10.50	0.86	16.43	35.61	4.83	17.92	3.86	1.11	3.90
6	包体	IV - 25 - 2	5.60	0.72	17.83	37.41	5.22	20.81	4.74	1.34	4.57
7	包体	IV-23-2	22.03	0.66	20.01	49.84	7.67	29.14	6.17	1.04	6.05
8	包体	D388	14.01	0.10	20.22	52.90	6.88	29.13	6.74	2.21	6.73
序号	类型	样品	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma$	ðEu
1	寄主岩	D386	0.97	5.24	1.10	3.28	0.63	4.17	0.61	160.03	0.55
2	寄主岩	W-27-1	0.60	3.08	0.65	1.95	0.36	2.48	0.37	104.43	0.78
3	寄主岩	VI-40-1	0.71	3.86	0.80	2.35	0.44	3.04	0.44	123.31	0.87
4	寄主岩	W-25-1	0.66	3.46	0.71	2.17	0.41	2.83	0.41	110.09	0.77
5	寄主岩	IV - 23 - 1	0.68	3.55	0.72	2.17	0.38	2.64	0.38	114.13	0.87
6	包体	W - 25 - 2	0.82	4.28	0.88	2.55	0.45	2.97	0.43	128.03	0.87
7	包体	IV - 23 - 2	1.03	5.28	1.08	3.25	0.63	4.30	0.63	167.35	0.49
8	包体	D388	1.22	7.04	1.46	4.98	0.66	4.11	0.69	181.27	0.98

603



图 4 库布苏南岩体及包体 QAP 图解

Fig. 4 Q-A-P diagram of microgranular enclaves and host rock of the Kubusunan

Q.石英;A.碱性长石;P.斜长石;la.石英岩;lb.富石英花岗岩;2.碱长花岗岩;3a.正长花岗岩;3b.二长花岗岩;4.花岗闪长岩;5.石英闪长岩 (斜长花岗岩、奥长花岗岩);6.碱长正长岩;6\*.石英碱长正长岩;7\*. 石英正长岩;7.正长岩;8\*.石英二长岩;8.二长岩;9.二长闪长岩/二 长辉长岩;9\*.石英二长闪长岩/石英二长辉长岩;10.闪长岩/辉长岩/ 斜长岩;10\*.石英闪长岩/石英辉长岩/石英斜长岩





Fig. 5 A/CNK-A/NK diagram of microgranular enclaves and host rock of the Kubusunan

大,包体比其寄主岩石有稍富铝的特征. A/NK 和 N/K 两个指数,包体与寄主岩石则有明显的差异: 寄主岩石 A/NK = 1.  $45 \sim 1.62$ , N/K = 1. $65 \sim$ 2.48,包体 A/NK = 1. $64 \sim 1.83$ , N/K = 2.90  $\sim$ 4.74,表明包体分别比其寄主岩富铝、富钠. 根据 A/ NK-A/CNK 图解(图 5),寄主花岗岩和微粒包体均 为准铝质过铝质. 在包体中,铁、镁含量也明显高于 寄主岩.

暗色微粒包体与寄主岩的成分变化规律是:随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、TFeO、MnO、

 $M_{gO}$ 、CaO和  $P_{2}O_{5}$ 都呈线性递减关系,而  $K_{2}O$ 则 有明显的增长, Na<sub>2</sub>O基本稳定. 从岩石和包体的 CIPW标准矿物(表 2)可以看出,包体中An含量较 高(18.44%~21.21%),而在寄主岩中较低 (12.22%~17.45%,平均14.60%); Ab和 Or则在 寄主花岗岩中较高. 此外,包体中磁铁矿(Mt)、透辉 石(Di)、磷灰石(Ap)含量明显高于寄主花岗岩.

#### 4.3 微量元素、稀土元素地球化学特征

对比寄主岩和包体的微量元素、稀土元素特征 发现,Zr、Sr、Nb、Yb 在包体中丰度较高,Rb、Ba 和 Th 则相对较贫,但总体上,Rb、Ba 和 Th 在两者中 含量均很高,Hf 与主岩基本持平,总体上原始地幔 标准化蛛网图解的形态是类似的(图 6a).包体的稀 土元素总量( $\Sigma$  REE = 128~181 µg/g)略高于寄主 花岗岩( $\Sigma$  REE = 104~160 µg/g),REE 配分曲线 呈"V"字形近似平行,LREE 为右倾型,而 HREE 为中部下凹的平坦型(图 6b).包体中  $\delta$ Eu 值和寄主 岩没有明显的区别, $\delta$ Eu 值变化范围较大,包体  $\delta$ Eu=0.49~0.98,寄主岩  $\delta$ Eu=0.55~0.87,这表 明两者的岩浆本身存在非均一性,可能曾经有斜长 石和角闪石的结晶分离.

## 5 讨论

岩体内部暗色微粒包体极其发育,以闪长质为 主,具岩浆成因的细粒半自形粒状结构、块状构造. 包体由岩浆混合作用形成已经得到了众多学者的认 同(Didier, 1987; Barbarin, 1988; Allen, 1991; Barbarin and Didier, 1992; Elburg, 1996; Silva et al., 2000):在两端元混合过程中,处于过冷状态的 基性镁铁质岩浆侵入到偏酸性的花岗闪长岩浆中, 与早期结晶的矿物如斜长石发生交代而形成钾长石 的交代边,由于淬冷结晶发育与寄主岩石完全不同 的针一柱状磷灰石(Barbarin, 1988; Barbarin and Didier, 1992)(图 7). 针状磷灰石是快速冷却的标 志性矿物,说明形成闪长质微粒包体的基性岩浆与 寄主酸性岩浆有较大温度差,结晶过程中有快速的 放热作用. 接触过渡边缘区寄主岩石中见斜长石斑 晶内部自形的环带,其外缘发育多层他形环边,表明 斜长石有多次生长.斜长石中发育异常环带结构表 明了结晶环境的动荡变化. 包体中存在相对大颗粒 的角闪石,表明在混合作用发生之前,一些镁铁质矿 物已经开始结晶(Zorpi et al., 1989), 而长英质矿 物是在混合作用后期,当包体残余岩浆和花岗闪长



图 6 包体和寄主花岗岩原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b)



原始地幔标准值引自 Sun and McDonough(1989);球粒陨石标准化值来自 Taylor and McLennan(1985)



图 7 微细粒包体中钾长石冷凝边和针一柱状磷灰石

Fig. 7 Potassium feldspar metasomatic ring and needle-cylindrical apatite in microgranular enclaves, Kalamaili area of the eastern Junggar

质岩浆结晶速率相同时形成的(Barbarin, 1988; Vernon, 1991).此外,混合过程中,在未达到部分平 衡状态之前,基性岩浆和花岗闪长质岩浆由于化学 扩散发生成分上的相互交换,从而使包体受到花岗 闪长质岩浆的改造和同化.

寄主岩及其微粒包体研究表明,与寄主花岗岩 相比,包体以基性组分富集、高场强元素 Ti、Zr、Nb、 Hf 含量较高以及富集稀土元素为特征.包体中 Sr 的含量较高,2个包体样(表3中序号6和8)的 Eu 负异常与寄主岩石相差不大,这种元素的变异特征 表明,形成暗色微粒包体和寄主花岗岩的源岩岩浆 在侵位过程中可能发生了矿物相的结晶分异作用. 在分离结晶过程中,包体和花岗质岩浆间 Sr 的强烈 分异引起的 Eu 异常变化很小,表明在结晶析出斜 长石的同时,Eu 的另外一个载体矿物钾长石主要富 集于残留熔体相中,从而使得结晶相和熔体相之间 Eu 异常差别不明显.另外一个包体样(表3中序号 7)的 Eu 负异常较寄主岩石明显,可能是由于花岗 闪长岩中斜长石含量较高,也可能是由于 Eu 亏损 型矿物磷灰石和黑云母等在包体中相对富集引起 的.对于稀土元素,总体上寄主岩石和包体的 REE 配分曲线呈近似平行的右倾"V"字形,但包体的稀 土总量略高于寄主岩石,并且与寄主岩石之间呈连 续过渡关系,在图 6b 中,REE 配分曲线中重稀土部 分异常,表现为7号和8号包体样及1号寄主岩石 样的重稀土含量较高,主要归因于角闪石、单斜辉石 和黑云母等镁铁矿物,以及富稀土元素的副矿物的 聚集,而矿物的聚集和岩浆的成分变化密切相关,岩 浆混合作用可以导致同期次的岩浆成分有较大的差 异,岩浆混合程度的不同,形成的岩石地球化学特征 有区别,而图 6b 中"不协调"的曲线特征,很可能就 是岩浆混合程度不同的客观反映.

**库布苏南花岗闪长岩属于准铝质花岗岩**,A/ CNK=0.94~1.05,A/NK=1.45~1.63(均为摩尔 比值),具有低的<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 初始比值和高正的  $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(洪大卫等,2000),与黄羊山碱性花岗岩体相近 ( $\varepsilon_{Nd}(t) = 5.2 \sim 7.1$ ,  $I_{sr}$ 多数为 0.703 1~0.704 1) (林锦富等,2007),而低于卡拉麦里斜长花岗岩 ( $\varepsilon_{Nd}(t) = 9.42$ )(唐红峰等,2007),并与区内发育的 基性超基性杂岩、玄武岩具有相同或相近的同位素 特点( $\varepsilon_{Nd}(t) = 7.2 \sim 9.8$ ,  $I_{sr} = 0.703 \approx 0.705 1$ )(刘 希军等,2007).这些事实说明花岗岩的形成有地幔 物质参与,而大量发育的暗色微粒闪长质包体是壳 幔岩浆混合作用的最直接证据,包体是基性源岩部 分熔融作用形成的残余体.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,寄主花 岗岩和包体锆石 U-Pb 年龄是一致的,排除了暗色 包体来源于深部固体变质岩石熔融残留体或浅部围 岩捕虏体的可能性,因为不论花岗质岩浆的源岩是 熔融残留体还是围岩捕虏体,其形成年龄均应早于 花岗岩浆的形成年龄,同时,也排除了基性岩浆在花 岗质岩浆固结后才侵入的可能,为岩浆混合作用的 存在提供了有力证据.另外,库布苏南花岗闪长岩形 成的时代属于东准噶尔后碰撞深成岩浆活动的范围 (330~265 Ma)(韩宝福等,2006),略晚于东准噶尔 乌伦古河碱性花岗岩(王式洸等,1994; Han et al., 1997)和卡拉麦里碱性花岗岩(顾连兴等,1990;毕承 思等,1994;卢秋霞和刘显凡,1994)的形成时间 (300 Ma 左右),均为准噶尔周边地区后碰撞岩浆活 动的产物(Han et al., 1997). 与库布苏南花岗闪长 岩为代表的卡拉麦里断裂北侧的花岗闪长岩、石英 闪长岩、碱性花岗岩、钾长花岗岩等的形成时间相 近,均应该是同一期岩浆活动的产物.

大量研究认为,东准噶尔地区在晚石炭世一早 二叠世处于后碰撞拉张环境(Han et al., 1997;韩 宝福等,1999,2004a,2004b,2006;洪大卫等, 2000),而 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果 (287 Ma)为早二叠世,表明库布苏南花岗闪长岩体 是在后碰撞拉张的构造背景下幔源岩浆发生底垫作 用形成的.由于幔源岩浆底垫作用,下地壳温度升 高,岩浆熔融形成酸性壳源岩浆;部分幔源岩浆沿着 地壳中的深断裂带上涌,发生不同程度壳幔混合,其 中闪长质微细粒包体就是基性的幔源岩浆和酸性的 壳源岩浆不同程度混合的记录者. 苏南花岗闪长岩年龄为 287±2 Ma,MSWD=0.15, 包体年龄为 286±3 Ma,MSWD=0.22,在误差范围 内完全一致,均属于早二叠世.

(2)库布苏南花岗闪长岩体是岩浆混合成因的, 其中闪长质微细粒包体是基性幔源岩浆和酸性壳源 岩浆不同程度混合的记录者.

(3)东准噶尔地区在晚石炭世一早二叠世处于 后碰撞拉张环境.

致谢:在野外得到了新疆有色地质矿产勘查院 的大力支持,在此表示感谢;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室 第五春荣博士、柳小明博士等的帮助,在此表示感 谢;在论文写作过程中,长安大学丁仨平博士在数据 成图中给予了帮助,审稿人提出了宝贵的修改建议, 在此表示真诚的感谢.

#### References

- Allen, C. M., 1991. Local equilibrium of mafic enclaves and granitoids of the Turtle pluton, Southeast California: mineral, chemical and isotopic evidence. Am. Mineral., 76:574-588.
- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analysis that do not report <sup>204</sup> Pb. *Chemical Geology*, 192 (1 - 2): 59 - 79. doi: 10. 1016/S0009 - 2541(02) 00195-X
- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S., et al., 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICPMS and SHRIMP. *Geology*, 29(5):383-386. doi:10. 1130/0091-7613(2001)029<0383;TAOPIR>2.0. co
- Barbarin, B., 1988. Field evidence for successive mixing and mingling between the Piloard diorite and the Saint-Julien-La-Vetre monzogranite (Nord-Forez, Massif Central, France). Can. J. Earth Sci., 25:49-59.
- Barbarin, B., Didier, J., 1992. Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interactions between coexisting felsic and mafic magmas. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 83:145-153.
- Bi, C. S., Shen, X. Y., Xu, Q. S., 1994. Isotope geology of the Beilekuduke tin metallogenic belt in Xinjiang. Geosciences of Xinjiang, No. 5. Geological Publishing House, Beijing, 106-119 (in Chinese with English abstract).
- Claesson, S., Vetrin, V., Bayanova, T., et al., 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51(1-2):95-108. doi:10.1016/S0024-4937(99)00076-6

## 6 结论

(1) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得库布

- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., et al., 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian timescale. *Journal of Geological Society*, *London*, 149(2): 171-184.
- Didier, J., 1987. Contribution of enclaves studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas. *Geol. Rundsch.*, 76(1):41-50.
- Didier, J., Barbarin, B., 1991. Macroscopic features of mafic microgranular enclaves. In: Didier, J., Barbarin, B., eds., Enclaves and granite petrology. Elsevier, Amsterdam, 253-261.
- Elburg, M. A., 1996. Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton Granodiorite, Lachlan fold belt, Australia. *Lithos*,38(1-2):1-22. doi:10.1016/0024-4937(96) 00003-5
- Gao, J., Long, L. L., Qian, Q., et al., 2006. South Tianshan: a Late Paleozoic or a Triassic orogen ?Acta Petrologica Sinica, 22(5):1049-1061 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICPMS. *Geostand Newsl.*, 22: 181-195. doi:10.1111/j.1751-908X.2002. tb00886. x
- Giorgio, R., Maurizio, M., Vicente, A., et al., 1998. Petrogenesis of the Paleoproterozoic basalt-andesite-rhyolite dyke association in the Carajas region, Amazonian craton. *Lithos*, 43 (4): 235 - 265. doi: 10. 1016/S0024 -4937(98)00015-2
- Gradstain, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., 2004. A geological time scale. Cambridge University Press, Cambridge, 589.
- Gu,L. X., Zhu, Q., Hu,S. X, et al., 1994. Geological characters and origin of the Kelameili-Harlik alkali granite belt. Xinjiang. Geosciences of Xinjiang, No. 2. Geological Publishing House, Beijing, 47 - 55 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., 1999. Post-collisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar basin. Science in China (Series D), 29(1):16-21 (in Chinese).
- Han, B. F., He, G. Q., Wu, T. R., et al., 2004a. Zircon U-Pb dating and geochemical features of Early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: implications for tectonic evolution. *Xinjiang Geology*, 22(1):4-11 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., Ji, J. Q., Song, B., et al., 2004b. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xin-

jiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(22):2324-2328 (in Chinese).

- Han, B. F., Ji, J. Q., 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, B. F., Wang, S. G., Jahn, B. M., et al., 1997. Depletedmantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3-4): 135-159. doi:10.1016/S0009-2541(97)00003-X
- He,S. P., Wang, H. L., Chen, J. L., et al., 2008. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of basic dikes within Maxianshan rock group in the central Qilian mountains and its tectonic implications. *Earth Science—Journal* of China university of Geosciences, 33(1):35-45 (in Chinese with English abstract).
- Hong, D. W., Wang, S. G., Xie, X. L., et al., 2000. Genesis of positive  $\varepsilon(Nd, t)$  granitoids in the Da Hinggar Mts. Mongolia orogenic belt and growth continental crustal. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441-456 (in Chinese with English abstract).
- Horn, I., Rudnick, R. L., Mcdonough, W. F., 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICPMS: application to U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 167: 405 - 425. doi: 10. 1016/S0009 - 2541 (99) 00168-0
- Hu, A. Q., Jahn, B. M., Zhang, G., et al., 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328 (1-2): 15-52. doi:10.1016/S0040-1951(00)00176-1
- Hu, A. Q., Wang, Z. G., Tu, G. C., 1997. Geological evolution, petrogenesis and metallogeny of North Xinjiang. Science Press, Beijing, 1-246 (in Chinese).
- Koler, J., Fonneland, H., Sylvester, P., et al., 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. *Chemical Geology*, 182(2-4):605-618. doi:10.1016/S0009-2541(01)00341-2
- Li, H. M., Chen, H. H., Zhao, Y. J., 2009. The hydrocarbon charging events and ages in the volcanic reservoir of Santanghu basin. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 34(5):785-791 (in Chinese with English abstract).

- Li, J. Y. ,1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 11 (Suppl.): 73 84 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 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, J. Y., Xiao, X. C., 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust. *Chinese Journal of Geology*, 34(4):405-419 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., Tang, Y. Q., 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, Y. J., Hu, K. L., Zhou, J. B., et al., 2010. Early Carboniferous volcano-magmatism and related mineralization in the Yishijilike Mountain, western Tianshan. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 35 (2):235-244 (in Chinese with English abstract).
- Li,Z. H., Han, B. F., Li, X. Z., et al., 2004. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in North Xinjiang. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(3):214-226 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J. F., Yu, H. X., Yu, X. Q., 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, J. Y., Yuan, K. R., 1996. Alkali granites and deposits of the East Junggar area, Xinjiang. South Central University Technology Press, Changsha, 1-140 (in Chinese).
- Liu, X. J., Xu, J. F., Hou, Q. Y., et al., 2007. Geochemical characteristics of Kalamaili ophiolite in East Junggar, Xinjiang:products of ridge subduction. Acta Petrologica Sinica, 23(7):1591-1602 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193 nm LA-ICP-MS. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 408-418 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Q. X., Liu, X. F., 1994. Isotope geochemical studies on tin-bearing granite rock belt in west part of eastern Junggar, Xinjiang. Geosciences of Xinjiang, No. 5. Geo-

logical Publishing House, Beijing, 132 — 143 (in Chinese).

- Ludwig, K. R., 1991. Isoplot—a plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geological Survey Open-File Report, 39:91-445.
- Ma,R. S., Shu, L. S., Sun, J. Q., 1997. Tectonic evolution and metallogeny of eastern Tianshan mountains. Geological Publishing House, Beijing, 1-202 (in Chinese).
- Pidgeon, R. T., Nemchin, A. A., Hitchen, G. J., 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. Contributions to Mineralogy and Petrology, 132 (3): 288-299.
- Silva, M. M. V. G., Neiva, A. M. R., Whitehouse, M. J., 2000. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal. *Lithos*, 50:153-170. doi:10.1016/S0024-4937(99)00053-5
- Su, Y. P., Tang, H. F., Liu, C. Q., et al., 2006. The determination and a preliminary study of Sujiqu aluminous Atype granites in East Junggar, Xinjiang. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(3): 175-184 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. H., Li, J. Y., Gao, L. M., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a dioritic pluton in the Harlik Mountain, eastern Xinjiang, and its tectonic implication. *Geological Review*, 51(4): 463-469 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. In: Sauders, A. D., Norry, M. J., eds., Magmatism in the ocean basins. *Geological Society Special Publication*, 42:313-345.
- Tang, G. J., Wang, Q., Zhao, Z. H., et al., 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyries in the Baogutu area (western Junggar): petrogenesis and their implications for tectonics and Cu-Au mineralization. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 34(1):56-74 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. F., Qu, W. J., Su, Y. P., et al., 2007a. 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).
- Tang, H. F., Su, Y. P., Liu, C. Q., et al., 2007b. Zircon U-Pb age of the plagiogranite in Kalamaili belt, northern Xinjiang and its tectonic implication. *Geotectonica et*

*Metallogenia*, 31(1): 110-117 (in Chinese with English abstract).

- Tang, H. S., Chen, Y. J., Liu, Y. L., et al., 2006. Isotope dating of the Belekuduke tin deposit in the eastern Junggar area. *Mineral. Petrol.*, 26(2):71-73 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust:its composition and evolution. Blackwell Scientific,Oxford Publications,54:209-230.
- Tu,G.C., 1993. New improvement of solid earth sciences in northem Xinjiang. Science Press, Beijing, 1 - 546 (in Chinese).
- Vernon, R. H., 1991. Interpretation of microstruture of microgranitoid enclaves. In: Didier, J., Barbarin, B., eds., Enclaves and granite petrology. Elsevier, Amsterdam, 277-292.
- Wang, S. G., Han, B. F., Hong, D. W., et al., 1994. Geochemistry and tectonic significance of alkali granites along Ulungur River, Xinjiang. *Scientia Geologica Sini*ca, 29 (4): 373 - 383 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constrainton interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16):1589-1604 (in Chinese).
- Xiao, W. J., Han, C. M., Yuan, C., et al., 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China); constraints for the tectonics of the southern Paleoasian Domain. Acta Petrologica Sinica, 22(5); 1062 - 1076 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M., Peng, S. L., Yang, B., et al., 2005. Crustobody's movement and evolution in northern Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1):113-121 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. F., Zeng, Y. S., Gu, L. B., et al., 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay mountains, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27 (1):61-77. doi:10.1016/j.jseaes. 2005.01.007
- Zhu, Y. F., Zhang, L. F., Gu, L. B., et al., 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50 (19): 2201 – 2212. doi:10.1360/03wd0154
- Zhu, Y. F., Zhou, J., Zeng, Y. S., 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, West Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics. Ore Geology Reviews, 32(1-2):337-365.

Zorpi, M. J., Coulon, C., Orsini, J. B., et al., 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157(4):315-329.

#### 附中文参考文献

- 毕承思,沈湘元,徐庆生,1994. 贝勒库都克锡矿带同位素地 质学研究.新疆地质科学,第5辑.北京:地质出版社, 106-119.
- 高俊,龙灵利,钱青,等,2006. 南天山:晚古生代还是三叠纪 碰撞造山带?岩石学报,22(5): 1049-1061.
- 顾连兴,褚强,胡受奚,等,1994.新疆卡拉麦里一哈尔里克碱 性花岗岩带地质特征及成因.新疆地质科学,第2辑, 北京:地质出版社,47-55.
- 韩宝福,何国琦,王式洸,1999. 后碰幔源岩浆活动、底垫作用 及准噶尔盆地基底的性质. 中国科学(D辑),29(1): 16-21.
- 韩宝福,何国琦,吴泰然,等,2004a.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. 新疆地质,22(1):4-11.
- 韩宝福,季建清,宋彪,等,2004b. 新疆喀拉通克和黄山东含 铜镍矿镁铁一超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年 龄及其地质意义. 科学通报,49(22): 2324-2328.
- 韩宝福,季建清,宋彪,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.
- 何世平,王洪亮,陈隽璐,等,2008. 中祁连马衔山岩群内基性 岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报,33(1): 35-45.
- 洪大卫,王式洸,谢锡林,等,2000. 兴蒙造山带正 ε(Nd,t)值 花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘,7(2): 441-456.
- 胡霭琴,王中刚,涂光炽,1997.新疆北部地质演化及成岩成 矿规律.北京:科学出版社,1-246.
- 李华明,陈红汉,赵艳军,2009. 三塘湖盆地火山岩油气藏油 气充注幕次及成藏年龄确定. 地球科学──中国地质 大学学报,34(5): 785-791.
- 李锦轶,1995.新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史. 岩石学报,11(增刊):73-84.
- 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.
- 李锦轶,肖序常,1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题 的简要评述. 地质科学,34(4): 405-419.
- 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.
- 李永军,胡克亮,周继兵,等,2010.西天山伊什基里克山早石 炭世火山岩浆作用及其成矿.地球科学——中国地质 大学学报,35(2):235-244.

- 李宗怀,韩宝福,李辛子,等,2004.新疆准噶尔地区花岗岩中 微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗质岩岩浆起源和演 化.岩石矿物学杂志,23(3):214-226.
- 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.新疆东准噶尔富碱花岗岩类及其成矿 作用.长沙:中南工业大学出版社,1-140.
- 刘希军,许继峰,侯青叶,等,2007.新疆东准噶尔克拉麦里蛇 绿岩地球化学:洋脊俯冲的产物.岩石学报,23(7): 1591-1602.
- 柳小明,高山,袁洪林,等,2002.193 nm LA-ICP-MS 对国际 地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析. 岩 石学报,18(3):408-418.
- 卢秋霞,刘显凡,1994.新疆东准噶尔西部含锡花岗岩带的同 位素地球化学研究.新疆地质科学,第5辑.北京:地质 出版社,132-143.
- 马瑞士,舒良树,孙家齐,1997.东天山构造演化与成矿.北 京:地质出版社,1-202.
- 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.
- 孙桂华,李锦轶,高立明,等,2005.新疆东部哈尔里克山闪长 岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.地质论评,

51(4): 463-469.

- 汤好书,陈衍景,刘玉林,等,2006.东准噶尔贝尔库都克锡矿 成矿年龄测定.矿物岩石,26(2):71-73.
- 唐功建,王强,赵振华,等,2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年 代学与地球化学:岩石成因与构造、铜金成矿意义. 地 球科学——中国地质大学学报,34(1): 56-74.
- 唐红峰,屈文俊,苏玉平,等,2007a. 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.
- 唐红峰,苏玉平,刘丛强,等,2007b. 新疆北部卡拉麦里斜长 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 大地构造与成 矿学,31(1): 110-117.
- 涂光炽,1993.新疆北部固体地球科学新进展.北京:科学出版社,1-546.
- 王式洸,韩宝福,洪大卫,等,1994.新疆乌伦河碱性花岗岩的 地球化学及其构造意义.地质科学,29(4):373-383.
- 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.
- 肖文交,韩春明,袁超,等,2006.新疆北部石炭纪一二叠纪独 特的构造一成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构 造演化的制约.岩石学报,22(5):1062-1076.
- 杨牧,彭省临,杨斌,等,2005.新疆北部壳体大地构造演化与运动初步研究.大地构造与成矿学,29(1):113-121.