

云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩 锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义

林清茶^{1,2}, 夏 斌¹, 张玉泉¹

LIN Qing-cha^{1,2}, XIA Bin¹, ZHANG Yu-quan¹

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

摘要:对金沙江缝合带东侧雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩进行了岩石学、岩石化学、稀土元素、锆石 SHRIMP U-Pb 定年等研究, 石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 215 Ma。结合前人的资料, 认为金沙江洋盆闭合、板块碰撞的时间应为 266 Ma, 碰撞阶段的年龄范围为 266~215 Ma。对无老核的岩浆型锆石的形成条件、结构简单的典型纯岩浆型锆石定年的测试点数量等方面也进行了讨论。

关键词:SHRIMP U-Pb 年龄; 锆石; 石英闪长玢岩; 同碰撞; 云南中甸

中图分类号: P588.12²; P597^{+.3}

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2006)01~02-0133-05

Lin Q C, Xia B, Zhang Y Q. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collisional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2):133-137

Abstract: This paper deals with the petrological, petrochemical and REE studies of the Xuejiping syn-collisional quartz diorite porphyrite on the eastern side of the Jinshajiang suture zone. Its zircon SHRIMP U-Pb dating gives an age of 215 Ma. Based on this age, combined with previous data, the authors believe that the Jinshajiang ocean basin closed at 266 Ma and that the collision stage took place at 266—214 Ma. The conditions for the formation of magmatic zircon (zircon without an older core) and the number of analyzed spots for the dating of typical, pure magmatic type zircon with a simple structure are also discussed.

Key words: SHRIMP U-Pb age; zircon; quartz diorite porphyrite; syn-collision; Zhongdian, Yunnan

中酸性岩浆岩常是威尔逊旋回(大陆裂开-洋盆扩张-板块俯冲-陆壳碰撞)^[1]后期产生的, 因此中酸性岩浆岩的定年研究可直接为板块俯冲和陆壳碰撞的时间提供同位素地质年代学方面的依据。此外, 在金沙江缝合带中, 伴随缝合带产生的中酸性岩浆岩虽有出露, 但并不十分发育, 而为数不多的几个岩体的定年, 对板块俯冲和陆壳碰撞时间的锁定就

显得更加重要。涉及到金沙江缝合带的碰撞时间的文献不少, 对于碰撞时间的确定都以晚三叠世甲丕拉组磨拉石建造覆于蛇绿混杂岩之上作为依据, 但是对于具体的碰撞时间的确定还存在争议, 如认为是晚二叠世^[2], 始于晚二叠世—早三叠世^[3], 二叠纪与三叠纪之交—中三叠世^[4], 三叠纪^[5], 中三叠世末^[6], 晚三叠世之前^[7]等。

收稿日期: 2005-08-03; 修订日期: 2005-11-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号KZCX2-SW-117)和国家自然科学基金项目(4007202)资助。

作者简介: 林清茶(1977-), 女, 在读博士, 从事岩石地球化学研究工作。E-mail: qchlin@163.com

本文研究的雪鸡坪岩体位于金沙江缝合带东侧,是雪鸡坪—春都斑岩铜矿带^①的重要组成部分。在20世纪70年代,云南省801地质队、第七地质队和第三地质大队等,在1:20万区调工作的基础上,先后进行了1:5万地质填图、普查找矿及Rb-Sr模式年龄测定。本文在前人工作的基础上,对该岩体进行了岩石学、岩石地球化学和锆石SHRIMP U-Pb定年等研究,为上述问题的解决提供了较为可靠的年代学资料。

1 地质背景和岩石特征

研究区位于金沙江缝合带东侧(图1),该缝合带处在西侧的昌都地块和东侧的中咱地块与扬子板块之间,洋盆内发育有浊流沉积物、硅质岩、火山岩、镁铁—超镁铁岩,其中硅质岩呈夹层产在玄武岩中^[5,7,8]。此外,在徐麦以西金沙江两岸和苏哇龙地区出露一套高级变质岩系,由片岩、片麻岩、斜长角闪岩及大理岩组成,变质程度高达绿片岩相到角闪岩相。四川省地质矿产局^[9]将这套变质岩分为4段,统称为额阿钦群。汪啸风等^[10]将其中二段定名为额阿钦杂岩。雪鸡坪地区出露的地层主要是中上三叠统。①红山组(T_3h):灰黑色细粒碎屑岩、板岩,中部夹灰岩。②雪鸡坪组(T_3x):砂岩、板岩、灰岩。其中火山岩中下部由安山岩、石英安山岩和石英安粗岩组成;上部以安山岩为主,顶部为玄武岩。③格咱组(T_2g):砂岩、泥灰岩。含矿岩体侵位于雪鸡坪组砂、板岩和灰岩中。岩体长2.2 km,宽200~870 m,为呈北北西向展布的小岩株,面积0.98 km²,岩性主要为石英闪长玢岩、石英二长闪长玢岩、二长花岗斑岩等。

石英闪长玢岩呈灰色、细粒斑状结构,斑晶以斜长石为主,常具环带结构($An=26\sim30$),其次是黑云母和角闪石。基质由斜长石(36%~40%)、钾长石(23%~25%)、石英(16%~18%)、角闪石(4%~6%)、黑云母(5%~7%)等组成。在岩石化学成分上(表1),富 Al_2O_3 (14.3%~15.1%)、低碱(3.9%~5.1%)、高MgO(3.7%~5.1%)和CaO(4.2%~5.6%),在 SiO_2 对 $lg[Ca/(Na_2O+K_2O)]$ 的图解中^[10],数据点和安第斯带安山岩的数据点一样,都处在钙碱质区(图略),说明该岩石属于钙碱性岩,其特点类似于西藏冈底斯带^[11]和西昆仑北带早古生代^[12]的花岗闪长岩;富集轻稀土元素(表2)($LREE/HREE=5.8$),Eu负异常不明显($\delta Eu=0.74$),配分曲线向右倾斜($La_N/Yb_N=21.1$)。这种稀土元素特征与雅鲁藏布江新生代缝合带和西昆仑北带早古生代缝合带同碰撞的花岗闪长岩的相似(图2),暗示不同时代的同碰撞钙碱性中酸性深成岩的岩石化学和稀土元素组成具有相似性。上述特征说明其物质来源

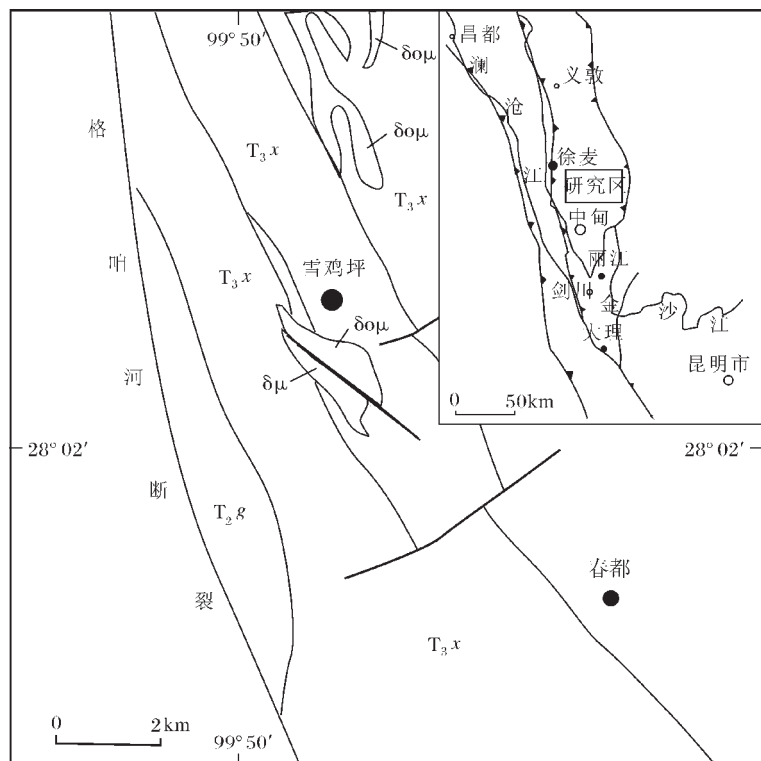


图1 中甸地区雪鸡坪岩体地质简图^①

Fig.1 Geological sketch map of the Xuejiping intrusion in Zhongdian
 $\delta\mu$ —闪长玢岩; $\delta o\mu$ —石英闪长玢岩; T_3x —雪鸡坪组; T_2g —格咱组

于洋壳加深源区沉积物的部分熔融,与S型花岗岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值($^{87}Sr/^{86}Sr=0.7056$)^①相对较低是一致的。

2 锆石SHRIMP U-Pb年龄

2.1 分选锆石

本文定年的锆石采自雪鸡坪岩体中的石英闪长玢岩。为尽量排除交叉混样,采用下列过程分选锆石:把0.5 kg左右的样品破碎成约1 cm³的小块,放入振动磨样机中(1.1/0.75 kW)研磨5~8 s后取出。此过程反复进行到样品全部通过0.3 mm孔径筛,洗去粉尘,经铝制淘砂盘富集重矿物,通过磁选、电磁选,剩下非电磁部分,再淘洗获得锆石精矿,最后在双目镜下挑选出用于定年的锆石。锆石晶体较自形,无色透明,以复四方双锥居多,长宽比为2:1。

2.2 分析方法

锆石SHRIMP U-Pb年龄是在中国地质科学院北京离子探针中心测定的。将样品锆石和标准锆石(TEM, 417Ma)一起在玻璃板上用环氧树脂固定,抛光到暴露出锆石的中心面,用反光、透光和阴极发光(CL)照相,然后镀金,根据锆石的成因类型,确定要测定的点,测定时尽量避开裂纹和包裹体。详细的实验流程和原理参考Compston等^[13]、Williams^[14]和

① 云南省地质科学研究所斑岩铜矿专题研究组.滇西东部斑岩和斑岩铜矿.1985.

表1 同碰撞中酸性岩石的主元素分析结果

Table 1 Major element analyses of syn-collisional intermediate-acid rocks

样品	83-142	83-146	83-135	87-227	88X74	曲水绕堆乡	冈仁布齐北
SiO ₂	61.92	64.35	60.57	62.49	59.65	63.47	62.70
TiO ₂	0.60	0.50	0.64	0.51	0.68	0.62	0.68
Al ₂ O ₃	15.11	14.34	14.78	16.73	16.73	17.27	16.44
Fe ₂ O ₃	4.01	2.75	3.71	1.18	2.74	2.41	3.46
FeO	1.99	1.80	2.26	3.03	3.3	2.88	2.20
MnO	0.22	0.19	0.26	0.11	0.11	0.09	0.10
MgO	4.82	3.70	5.13	1.7	2.73	1.7	1.60
CaO	4.31	4.22	5.62	6.4	5.59	4.03	3.49
Na ₂ O	1.17	2.06	1.17	3.51	3.09	3.95	3.82
K ₂ O	2.89	3.08	2.77	2.45	3.37	2.41	3.98
P ₂ O ₅	0.36	0.31	0.36	0.18	0.25	0.09	0.24
H ₂ O	2.09	1.60	1.8	0.72	1.96	0.41	0.59
总量	99.49	98.9	99.07	99.01	99.8	99.33	99.30

注:83-142、83-146、83-135是雪鸡坪闪长玢岩,87-227、88X74是西昆仑山北带花岗闪长岩^[12],曲水绕堆乡和冈仁布齐北是西藏南部花岗闪长岩^[11];氧化物含量wt%

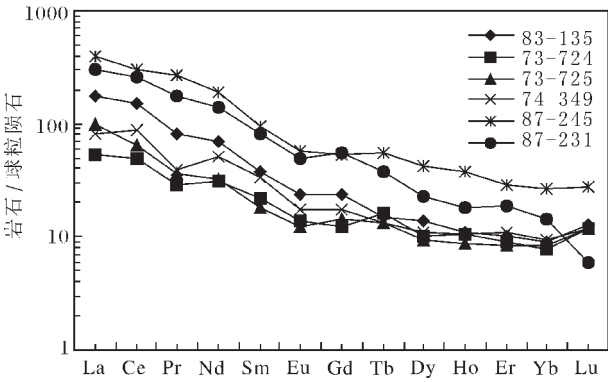


图2 同碰撞中酸性岩石稀土元素模式

Fig.2 REE patterns of syn-collisional intermediate-acid rocks

表2 同碰撞中酸性岩石的稀土元素含量

Table 2 REE content of syn-collisional intermediate-acid rocks

样品	87-231	87-245	74-349	73-725	73-724	83-135
La	71.60	93.20	19.20	23.40	12.60	42.10
Ce	160.00	187.00	53.40	39.70	30.30	91.29
Pr	16.60	25.80	3.70	3.50	2.70	7.85
Nd	65.90	87.50	23.90	15.30	14.30	32.32
Sm	12.30	14.50	5.10	2.80	3.30	5.81
Eu	2.83	3.32	1.00	0.70	0.80	1.37
Gd	11.20	10.90	3.60	2.90	2.50	4.88
Tb	1.43	2.07	0.50	0.50	0.60	0.56
Dy	5.76	10.80	2.80	2.40	2.60	3.51
Ho	1.01	2.10	0.60	0.50	0.60	0.63
Er	3.16	4.71	1.80	1.40	1.50	1.68
Yb	2.43	4.53	1.60	1.40	1.30	1.55
Lu	0.15	0.69	0.30	0.30	0.30	0.32
δ Eu	0.79	0.85	0.75	0.71	0.81	0.74
LREE/HREE	5.7	2.5	3.5	3.7	4.8	5.8
La/Yb	19.5	7.0	12.0	8.6	14.8	21.1

注:83-135是雪鸡坪闪长玢岩,87-231、87-245为西昆仑山北带闪长岩^[12];73-724、73-725、74-349为西藏冈底斯带的闪长岩^[11];稀土元素含量×10⁻⁶

宋彪等^[15]的文献。数据处理采用Squid和Isplot程序^[16],应用实测²⁰⁴Pb校正锆石中的普通Pb。单个数据点的误差均为1σ,采用年龄为²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄,其加权平均值为95%的置信度。

2.3 分析结果

样品中锆石的阴极发光图像如图3所示。这些锆石颗粒均发育有规则的韵律环带结构,反映了岩浆成因锆石的特点。对云南中甸雪鸡坪石英闪长玢岩的定年锆石测定12个点,分析样品Th的含量变化范围为289×10⁻⁶~806×10⁻⁶,U的含量变化范围为344×10⁻⁶~719×10⁻⁶,Th/U比值都大于0.8,分析结果见表3。图4为锆石U-Pb年龄谐和图,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为215.3 Ma±2.3 Ma,MSWD=3.95,表明其可信度

较高。

3 讨论

3.1 雪鸡坪石英闪长玢岩的时代

位于金沙江缝合带东侧的中甸雪鸡坪石英闪长玢岩,以

① 云南省地质科学研究所斑岩铜矿专题研究组.滇西东部斑岩和斑岩铜矿.1985.

往进行过同位素地质年龄测定^①: ①Rb-Sr单矿物模式年龄为230 Ma; ②Rb-Sr全岩(5个)等时线年龄为237 Ma, 线性关系较差($r=0.955$); ③Rb-Sr内部等时线(全岩+黑云母)年龄为225 Ma, 全岩+钾长石+斜长石年龄为368 Ma。为了获得置信度较高的年龄值, 本文做了锆石 SHRIMP定年, 加权平均年龄为215 Ma, 反映雪鸡坪石英闪长玢岩的结晶年龄相当于晚三叠世。

3.2 金沙江缝合带板块碰撞时间及年龄范围

威尔逊旋回理论表明, 洋盆闭合的时间就是板块碰撞开始的时间, 同时碰撞又常导致沿缝合线及两侧的岩石变质, 变质程度可达绿片岩相到角闪岩相^[17~19]。其中变质锆石是碰撞作用的直接产物, 因此变质锆石的结晶时间可直接为碰撞峰期提供年代学方面的依据。至于徐麦以西沿金沙江两岸分布的额阿钦群, 无论是岩石的变质程度还是变质时代, 均显示与该缝合带的碰撞作用及其时间具有同步性。汪啸风等^[4]首先对前述变质岩中的锆石进行了定年, 锆石样采自金沙江东侧巴塘—中咱之间嘎地村附近的斜长角闪岩, 相当额阿钦群二段。笔者认为: ①测试点的分布暗示, 定年的锆石中既有变质锆石, 又有变质复合型锆石(具有老核新壳的锆石); ②锆石U-Pb一致曲线的下交点年龄为266 Ma $\pm$ 65 Ma, 代表陆壳碰撞峰期的年龄, 相当于早二叠世晚期, 而碰撞开始的时间略早于266 Ma。根据本文的定年结果, 雪鸡坪石英闪长玢岩的年龄为215 Ma, 结合前人有关中酸性岩石的年代学研究, 如白马雪山花岗岩闪长岩和鲁甸岩体中黑云母二长花岗岩2种同碰撞岩体的锆石SHRIMP U-Pb定年的结果分别为239 Ma $\pm$ 6 Ma和214 Ma $\pm$ 6 Ma^[20], 鲁甸复式岩体花岗岩闪长岩黑云母Ar-

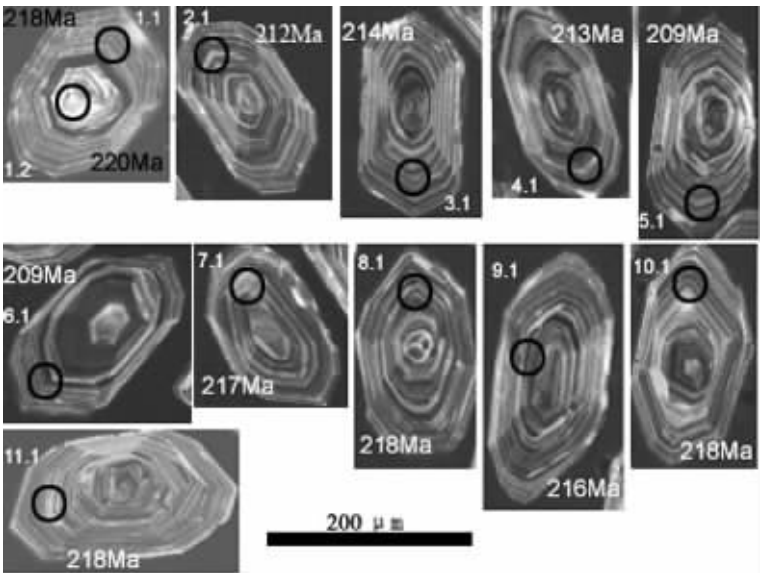


图3 中甸地区雪鸡坪石英闪长玢岩锆石阴极发光图像和测点位置
Fig.3 Cathodoluminescence image of zircon from the Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian and sites of analyzed spots

Ar坪年龄为253 Ma(钟孙霖私人通讯), 苏哇龙黑云母二长花岗岩黑云母K-Ar年龄为215 Ma^[21], 中木花岗岩Rb-Sr等时线年龄为255 Ma^[4]等, 其实测的中酸性深成岩的年龄分别为255 Ma、253 Ma、239 Ma、215 Ma和214 Ma, 考虑266 Ma碰撞峰期的年龄, 笔者认为碰撞阶段的年龄范围在266~214 Ma之间, 碰撞阶段持续的时间达50 Ma之久。

3.3 无老核的岩浆锆石形成条件的可能性分析

锆石阴极(CL)发光图像和SHRIMP定年结果表明, 在钙碱性和碱性花岗岩类中, 绝大部分都是具有老核新壳的岩浆

表3 中甸地区雪鸡坪石英闪长玢岩锆石SHRIMP U-Pb数据
Table 3 SHRIMP zircon U-Pb dating of the Xuejiping quartz diorite porphyrite, Zhongdian area

测点	²⁰⁶ Pb _c /%	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	Th /U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	<i>t</i> (²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U)/Ma	±%
142-1.1	0.82	480	469	1.01	14.3	0.0478	5.2	0.2267	5.3	0.0344	0.9	218.1	1.9
142-1.2	0.55	719	806	1.16	21.6	0.0495	2.7	0.2372	2.7	0.0348	0.7	220.4	1.5
142-2.1	1.66	357	360	1.04	10.4	0.0426	9.3	0.1970	9.4	0.0335	1.0	212.6	2.1
142-3.1	0.24	465	459	1.02	13.5	0.0516	2.3	0.2403	2.5	0.0338	0.9	214.2	1.9
142-4.1	1.01	573	558	1.01	16.7	0.0467	5.4	0.2165	5.4	0.0336	0.8	212.9	1.7
142-5.1	1.49	422	461	1.13	12.1	0.0418	8.0	0.1898	8.0	0.0329	0.9	208.7	1.9
142-6.1	1.11	683	802	1.21	19.6	0.0457	5.1	0.2084	5.2	0.0331	0.8	209.6	1.6
142-7.1	0.69	641	665	1.07	19.0	0.0503	3.5	0.2372	3.6	0.0342	0.8	216.9	1.6
142-8.1	1.24	487	441	0.94	14.6	0.0457	7.0	0.2171	7.1	0.0345	1.0	218.4	2.1
142-9.1	0.42	653	704	1.11	19.2	0.0499	3.3	0.2343	3.4	0.0341	0.8	216.0	1.6
142-10.1	0.71	344	289	0.87	10.3	0.0477	4.6	0.2268	4.7	0.0345	1.0	218.4	2.1
142-11.1	1.21	362	342	0.98	10.8	0.0496	6.0	0.2351	6.0	0.0344	1.0	218.0	2.2

注: ²⁰⁷Pb*/²³⁵Pb*表示放射成因铅比值, 普通铅的校正采用实测的²³⁸Pb进行

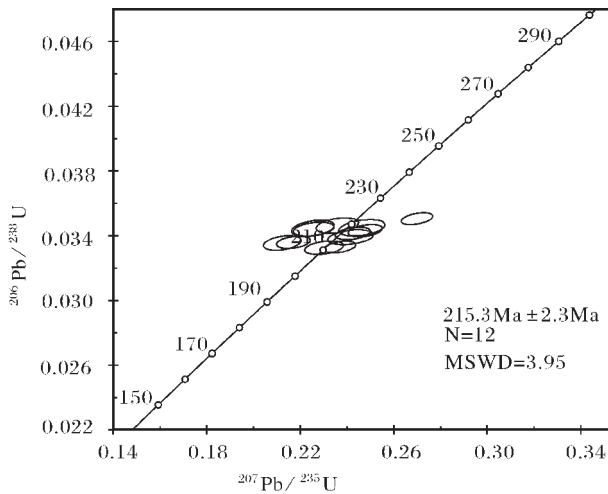


图4 中甸地区雪鸡坪石英闪长玢岩锆石
SHRIMP U-Pb谐和图

Fig.4 Zircon SHRIMP U-Pb concordia plot
of the Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian

复合型锆石^[22-25]。本文石英闪长玢岩中的锆石均为有规则韵律生长环带的典型的岩浆锆石(图3),其特点显示,物质可能是来自洋壳加深海沉积物的部分熔融,部分熔融的岩浆在上侵定位途中,同化混染围岩的成分极微。

3.4 锆石SHRIMP U-Pb定年测点数量的争议

雪鸡坪石英闪长玢岩锆石SHRIMP定年,共完成12个测点(表3),其加权平均年龄为 $215.3 \text{ Ma} \pm 2.3 \text{ Ma}$ 。如果用5(1~5)、7(1~7)、9(1~9)和12(1~12)个测点,加权平均年龄分别为 $215.7 \text{ Ma} \pm 0.4 \text{ Ma}$ 、 $213.8 \text{ Ma} \pm 3.8 \text{ Ma}$ 、 $214.6 \text{ Ma} \pm 3.1 \text{ Ma}$ 、 $215.3 \text{ Ma} \pm 2.3 \text{ Ma}$ 。锆石的内部结构相对单一、均匀,其中加权平均年龄的最大年龄差仅为2 Ma,加之测点之间最大的年龄差为9 Ma,表明被测定的锆石年龄比较稳定。所以笔者认为8~9个测点也能很好地反映该岩体的结晶年龄或成岩年龄。

致谢:本次工作得到中国地质科学院北京离子探针中心刘敦一研究员的大力支持,涂光炽院士、裘愉卓研究员在成文过程中提出了宝贵意见,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989. 466.
- [2] 黄汲清,陈炳蔚.中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地质出版社,1987.
- [3] 李兴振.西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论)[M].北京:地质出版社,1999.133-135.
- [4] 汪啸风, Ian Metcalfe, 简平,等.金沙江缝合带构造地层划分及时代厘定[J].中国科学(D辑),1999,29(4):289-297.

- [5] 张旗,周德进,赵大升,等.滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回:岩浆活动记录和深部过程讨论[J].岩石学报,1996,12(1):17-28.
- [6] 孙晓猛,张保民,聂泽同,等.滇西北金沙江带蛇绿岩、蛇绿混杂岩形成环境及时代[J].地质论评,1997,43(2):113-120.
- [7] 钟大赉.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998.184-194.
- [8] 张之孟,金蒙.川西乡城—得荣地区两种混杂岩及构造意义[J].地质科学,1979,3:205-214.
- [9] 四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.1-620.
- [10] Brown G C. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity, evolution and relation to volcanic arcs[A]. In: Thorpe ed. Andesites [M]. New York and London: John Wiley and Sons, 1982.437-461.
- [11] 涂光炽,张玉泉,王中刚,等.西藏南部花岗岩类地球化学[M].北京:科学出版社,1982.172-180.
- [12] 潘裕生,文世宣,孙东立,等.喀喇昆仑山—昆仑山地区地质演化[M].北京:科学出版社,2000.212-228.
- [13] Compston W, Williams I S, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: B525-534.
- [14] Williams I S. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology in the study of granitic rocks[J]. Trans. R. Soc. Edinburgh—Earth Sci., 1992, 83: 447-458.
- [15] 宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J].地质论评,2002,48(增刊):26-30.
- [16] Ludwig K. Isoplot/Ex 2.49: A geochronological toolkit for microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2001,(1a).
- [17] 丁林.西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩[J].科学通报,1995,40(14):1343.
- [18] 王天武,马瑞.西藏东南部南迦巴瓦地区变质作用特征[J].长春地质学院学报,1996,26:152-159.
- [19] 丁林,钟大赉.西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义[J].中国科学,1999,29(5):385-397.
- [20] 简平,刘敦一,孙晓猛.滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义[J].地球学报,2003,24(4):337-342.
- [21] 张玉泉,谢应雯.横断山区花岗岩类地球化学[M].北京:科学出版社,1995.30-42.
- [22] 张传林,王中刚,沈加林,等.西昆仑山阿卡孜岩体锆石SHRIMP定年及其地球化学特征[J].岩石学报,2003,19(3):523-529.
- [23] 沈其韩,宋彪,徐惠芬,等.山东沂水太古宙察峪和大山岩体SHRIMP 锆石年代学[J].地质论评,2004,50(3):275-284.
- [24] 刘红英,夏斌,张玉泉.攀西猫猫沟钠质碱性岩锆石SHRIMP定年及其地质意义[J].科学通报,2004,49(14):1431-1438.
- [25] 夏斌,林清茶,张玉泉.哀牢山—金沙江带透辉石花岗岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及地质意义[J].大地构造与岩石学,2005,29(1):35-43.