

# 哀牢山构造带新安寨晚二叠世末期过铝质花岗岩 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究

刘汇川<sup>1,2</sup>, 王岳军<sup>1</sup>, 蔡永丰<sup>1,2</sup>, 马莉燕<sup>1,2</sup>, 邢晓婉<sup>1,2</sup>, 范蔚茗<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 大学, 北京 100049)

**摘要:** 对采自云南元阳新安寨花岗岩体东、西两侧的高钾过铝质黑云母二长花岗岩中的锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试, 分别得到了  $251.9 \pm 1.4$  Ma 和  $251.2 \pm 1.4$  Ma 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄, 说明新安寨花岗岩并非原先认为的形成于燕山期或者晚三叠世, 而是晚二叠世 - 早三叠世的产物。样品的锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别介于  $-9.8 \sim -6.2$  和  $-11.1 \sim -3.1$  间, 平均为  $-7.6$  和  $-6.9$ , 其二阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  分别为  $1.67 \sim 1.90$  Ga 和  $1.47 \sim 2.00$  Ga, 平均为  $1.76$  Ga 和  $1.72$  Ga, 推测源岩可能是元古宙哀牢山群变质杂砂岩。结合前人研究成果, 认为新安寨花岗岩体形成于岛弧向陆碰撞转换或者同碰撞的构造环境, 指示了哀牢山带的古特提斯支洋盆或弧后盆地在二叠纪和三叠纪之交 ( $251.6$  Ma) 可能已经基本闭合。

**关键词:** 红河 - 哀牢山构造带; 同碰撞花岗岩; 新安寨花岗岩体; 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素

**中图分类号:** P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4552(2013)01-0087-012

## 0 引言

滇西特提斯造山带是研究多个岩石圈块体相互作用过程与动力学机制的经典地区, 以发育线性延伸的构造形迹和岩浆岩带为特征(云南省地矿局, 1990; 张旗等, 1996; 钟大赉, 1998; 范蔚茗等, 2009), 其中哀牢山构造带处于特提斯 - 喜马拉雅构造区与滨太平洋构造区的结合部位, 兼具印支思茅地块和扬子板块两大构造单元的属性(钟大赉, 1998; 董云鹏等, 2000; 方维萱等, 2002; Fan et al., 2010) 而尤其受到重视。目前学术界认为位于亲扬子的思茅地块和亲冈瓦纳的缅甸马地块之间的昌宁 - 孟连带是古特提斯多岛洋格局的主洋盆遗迹分布区, 代表了古特提斯的主缝合线(从柏林等, 1993; 钟大赉, 1998; Metcalfe, 2002; Wang et al., 2002; Jian et al., 2009a, b; Wang et al., 2010) 而金沙江 - 哀牢山带

在晚古生代是否存在古特提斯支洋盆还存在争论: 一种观点认为在金沙江 - 哀牢山 - 松马构造带发育了支洋盆并在二叠纪发生洋壳俯冲(魏启荣和沈上越, 1997; 刘俊来等, 2011; Lepvrier et al., 2004; Jian et al., 2009a); 另一种观点认为思茅地块和扬子板块在泥盆纪前是一体的, 晚古生代二者之间发育了古特提斯洋东缘弧后盆地(Metcalfe, 2006; Fan et al., 2010)。

基于这些争论, 前人对哀牢山构造带的岩浆岩开展了广泛研究, 初步划分出四个火山岩带: 哀牢山洋脊/准洋脊火山岩带、太忠 - 李仙江带弧火山岩、邓控 - 五素裂谷火山岩带和潘家寨裂谷火山岩带(沈上越等, 1998)。其中的弧火山岩又分为三类: “俯冲同步型”弧火山岩、“碰撞型”弧火山岩、“滞后型”弧火山岩(魏启荣和沈上越, 1997; 沈上越等, 1998; 莫宣学等, 2001)。在新平向阳山、镇沅县老王

收稿日期: 2012-07-29; 改回日期: 2012-09-27

项目资助: 国家自然科学基金项目(批准号: 40825009, 41190073 和 40830319) 和中国科学院 135 项目(编号: GIGCAS-I35-Y234151001) 联合资助。

第一作者简介: 刘汇川(1986-) 男, 博士研究生, 主要从事岩石大地构造研究。Email: liuhuichuan@gig.ac.cn

寨-浪泥塘、双沟等地厘定出了形成于晚泥盆世到早石炭世的蛇绿岩套(魏启荣和沈上越,1995;简平等,1998a,b;凌其聪等,1999;Yumul et al.,2008;Jian et al.,2009a,b),在墨江发现了形成于早二叠世的五素弧后盆地玄武岩( $287 \pm 5$  Ma, Fan et al.,2010)和雅轩桥岛弧型玄武岩(266 Ma, Jian et al.,2009a; Fan et al.,2010)。Jian et al.(2009b)认为大龙凯基性超基性侵入岩形成于早三叠世(245.6 Ma)的造山后伸展环境,刘翠等(2011)报道了绿春 247.3 Ma 的岛弧向陆陆碰撞过渡的流纹岩。在哀牢山构造带南段李仙江-松马断裂北侧的白马寨、金平和越北地区还发现了二叠纪的与峨眉山地幔柱有关的低钛和高钛玄武岩(Wang et al.,2006,2007;Balykin et al.,2010)。

尽管对哀牢山构造带做了大量研究,但其在晚古生代至早中生代的构造环境、尤其是扬子板块与思茅印支地块的拼合及演化时限,仍未得到一致的认识。现有对哀牢山构造带火山岩的研究主要集中在中基性岩石,关于该区花岗岩的研究报道较少(如张玉泉等,2004;李宝龙等,2008),而花岗岩是大陆地壳的组成部分,是地质学研究的重要课题,是研究壳幔演化和古构造环境的一个有效手段(吴福

元等,2007a;张旗等,2007)。笔者注意到在哀牢山断裂西侧的浅变质带内北西-南东向出露大量条带状分布的花岗岩,云南省地矿局(1990)和钟大赉(1998)认为这些花岗岩形成于中生代,但是其展布方向与雅轩桥玄武岩和双沟蛇绿岩带平行,暗示可能存在某种成因上的联系。有鉴于此,笔者选取该套花岗岩中出露面积较大的、位于哀牢山构造带南段李仙江断裂北侧的新安寨花岗岩体(如图1)开展了系统的岩石学、精细年代学和锆石 Lu-Hf 同位素组成研究,进而讨论其形成时代和成因,以便为认识哀牢山-李仙江-松马构造带的演化提供新的依据。

## 1 地质背景与样品描述

哀牢山构造带总体呈 NW-SE 向北西窄、南东宽展布于云南省中南部,向东南经元阳和金平县延伸进入越南境内与松马构造带连接,向西北经点苍山与金沙江构造带对应(钟大赉,1998;董云鹏等,2000)。该构造带主要由四条主断裂和其分割出的三套不同性质的岩石建造组成,断裂自北向南依次为红河断裂、哀牢山断裂、九甲安定断裂和李仙江断裂(云南省地矿局,1990)。现在的哀牢山主体

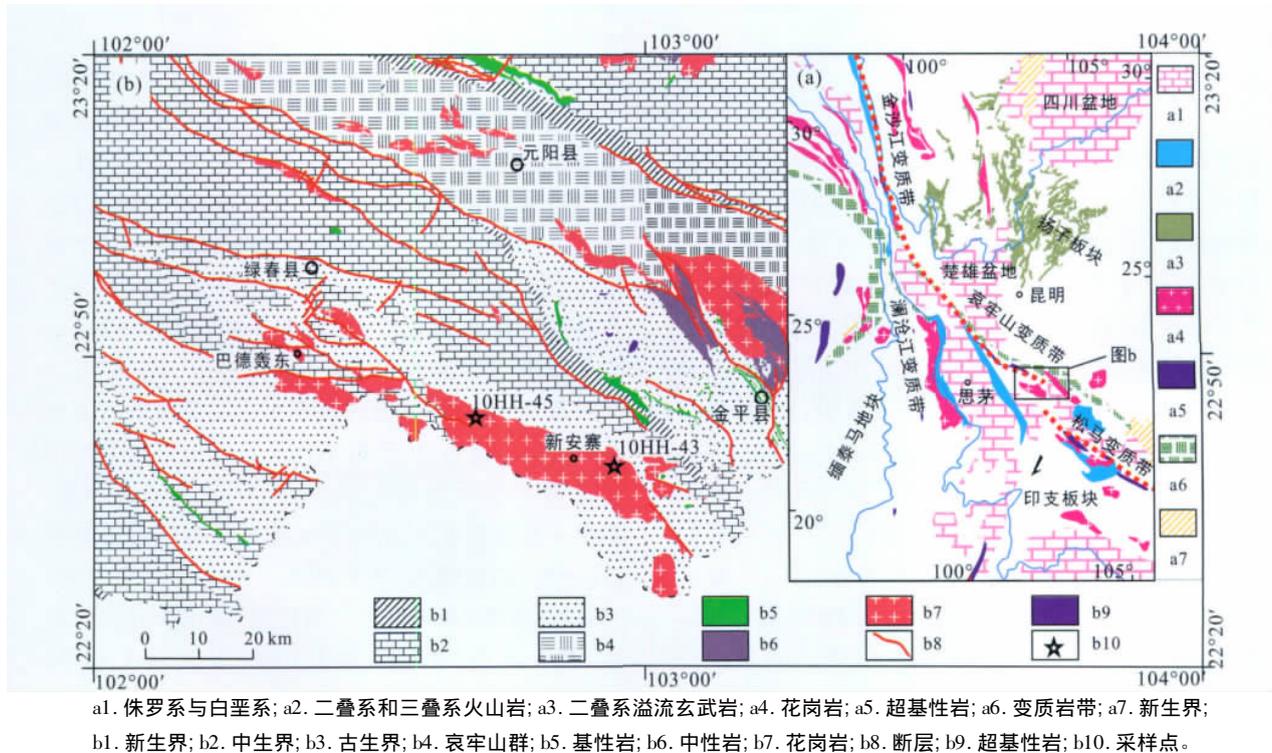


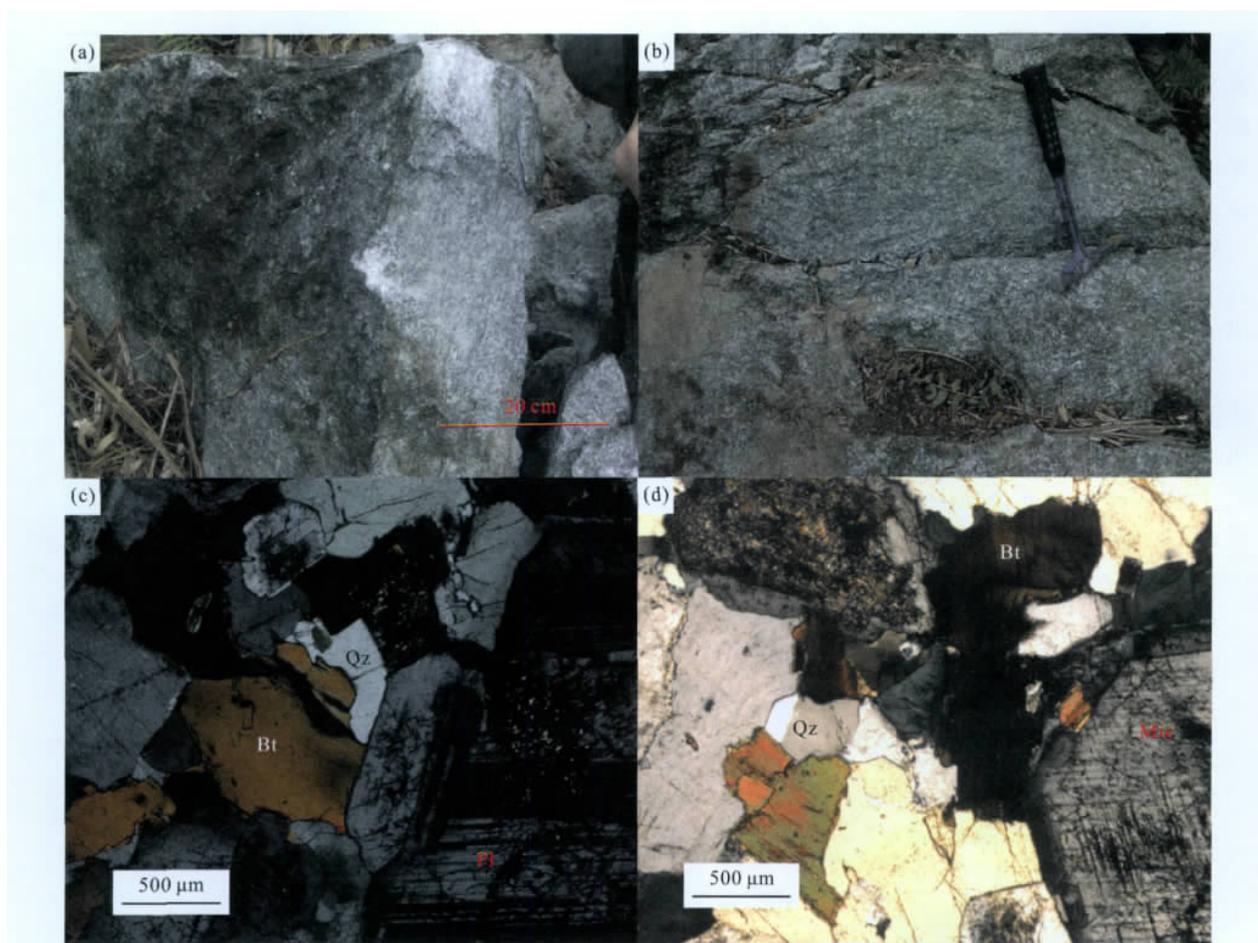
图 1 区域构造图 (a) 和研究区地质图 (b)

(图 a 参考 Zi et al. (2012), 图 b 据云南省地质局 1972 年金平幅和元阳幅 1:20 万地质图)

Fig. 1 Regional tectonic framework (a) and geological map of the study area (b)

由古元古界的哀牢山群变质岩系组成(李宝龙等, 2008), 同时该变质岩系也是本区最古老的地层(钟大赉, 1998)。东侧为扬子板块, 其结晶基底为哀牢山群、苍山群、瑶山群等变质岩系, 泥盆系至下二叠统除下泥盆统发育陆棚碎屑组合外, 其余以碳酸盐台地沉积组合为主, 构成了扬子地台稳定的盖层; 晚二叠世早期, 由于一系列近南北向古老断裂的强烈拉张而发生了以陆相拉斑系列为主的峨眉山玄武岩浆喷发, 并伴有玄武岩至浅成相的辉绿岩墙产出。哀牢山断裂带西侧思茅地块志留系和下泥盆统为厚度较大的陆棚深水碎屑连续沉积, 中上泥盆统转变为富含钠质火山碎屑的陆棚-滨海碎屑沉积组合, 石炭系至三叠系的岩性、岩相和沉积类型的变化比较复杂, 西部和东部主要为大陆边缘火山-沉积岩组合, 中部地区则以稳定类型的陆棚碎屑岩组合和台地碳酸盐岩组合为主(云南省地矿局, 1990; 钟大赉, 1998)。

新安寨花岗岩体出露于金平县藤条河以南至中越边境线之间, 侵位于下志留统, 其上被上三叠统高山寨组覆盖, 其延展方向与区域构造线一致, 出露面积 450 km<sup>2</sup> (图 1)。1971 年云南省地质局第二区域地质测绘大队将新安寨岩体和其临近的巴德轰东岩体定为燕山期花岗岩, 云南省地矿局(1990)测得新安寨岩体黑云母 K-Ar 年龄为 213 Ma, 从而认为其形成于晚三叠世。该岩体岩石组成较为均一, 主要岩石类型为中粒黑云母二长花岗岩, 岩相分带不明显, 部分可见似斑状结构, 块状构造(图 2a, b)。主要矿物组成为微斜长石(25%~35%)、斜长石(30%~40%)、石英(25%~30%)、黑云母(3%~7%)、白云母很少(图 2c, d)。副矿物含有磁铁矿、锆石、磷灰石。本文研究样品取自新安寨岩体东侧的金平县河边寨村南东 3 km 处(N22°42′28.6″, E102°53′59.5″)和西侧的金平县者米南东 3 km 处(N22°45′36.8″, E102°43′52.4″), 如图 1 所示。



Qz 为石英, Bt 为黑云母, Pl 为斜长石, Mic 为微斜长石。

图 2 新安寨花岗岩野外露头(a和b)和显微镜下矿物组成照片(c和d)

Fig. 2 Photographs of the outcrops (a and b) and photomicrographs (c and d) of the Xin'anzhai granite

## 2 分析方法

将野外采集的无蚀变、无矿化的新鲜岩石样品交由河北廊坊诚信地质有限公司切片磨制成厚度约为0.03 mm的薄片,接着对样品通过人工重砂法分选出锆石。

在双目显微镜下挑选出晶形好、无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒,在玻璃板上用环氧树脂固定,抛光至锆石中心,然后进行反射光和透射光照相,并用扫描电子显微镜上的阴极发光仪详细检查锆石内部结构,以选择最佳分析点。锆石阴极发光成像(CL)分析在中国科学院地质与地球物理研究所CAME-CA SX100型电子探针上进行,工作条件是15 kV加速电压和15~20 nA电流。

锆石U-Pb年龄及Lu-Hf同位素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)、Agilent 7500a型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)和193 nm的ArF准分子激光系统上进行同时原位测定,具体分析流程见文献(Yuan et al., 2004; 谢烈文等, 2008)。激光束斑直径为50  $\mu\text{m}$ ,频率为6~8 Hz,采样方式为单点剥蚀,以He作为剥蚀物质的载气。实验中每完成8个测点,测定1次标准年龄样品GJ-1和2次标准锆石91500。在样品测试开始和结束时各测定2次NIST SRM610、2次标准锆石91500和1次标准年龄样品GJ-1。锆石的U-Pb同位素比值采用标样91500为外部标准校正,分馏校正和结果的计算利用GLITTER(ver4.0)(Jackson et al., 2004)软件进行,普通Pb校正采用Andersen(2002)介绍的方法,样品的U-Pb年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot(ver2.49)(Ludwig, 2001)程序进行。

锆石Lu-Hf同位素原位测定过程中采用标准锆

石91500进行同位素分馏的校正。 $^{176}\text{Lu}$ 对 $^{176}\text{Hf}$ 的干扰采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$ 进行校正(Debièvre and Taylor, 1993),同时假设Lu和Hf的分馏情况相同。 $^{176}\text{Yb}$ 对 $^{176}\text{Hf}$ 的干扰采用实测Yb的分馏系数进行校正,同时假定 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ 值为0.5887(Chu et al., 2002)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}$ 的计算采用 $^{176}\text{Lu}$ 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001)。球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.282772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.0332(Blichert et al., 1997),以单颗粒锆石U-Pb年龄计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (早于1000 Ma的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,其他的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)。单阶段Hf模式年龄( $t_{\text{DM}}$ )计算时,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.28325, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值采用0.0384(Vervoort and Blichert, 1999)。两阶段Hf模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )计算时,平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.015, $f_{\text{cc}}$ 为-0.55(Griffin et al., 2002)。

## 3 结果分析

分选出两个样品的锆石均为无色透明、部分半透明、长柱状自形的晶体。晶体形态和大小比较均一,长宽比3:1~5:1,长约100~180  $\mu\text{m}$ 。锆石晶形以{100}、{111}面较为发育,具有明显的韵律环带结构,如图3,显示为典型的岩浆成因锆石。

### 3.1 锆石U-Pb年代学分析

两个样品锆石U-Pb定年分析结果数据见表1。

(1) 岩体东侧10HH-43A样品:针对该样品进行了25个点的分析测试,其中3个分析点(10HH-43A-06、-10和-20)由于年龄较老且偏离谐和线而未参与加权平均年龄计算。其它22个点的Th含量介于223~778  $\mu\text{g/g}$ 之间,平均395  $\mu\text{g/g}$ ;U含量介于955~2771  $\mu\text{g/g}$ 之间,平均1553  $\mu\text{g/g}$ ;Th/U值变化于0.19~0.46,平均0.25。结合其CL图像,

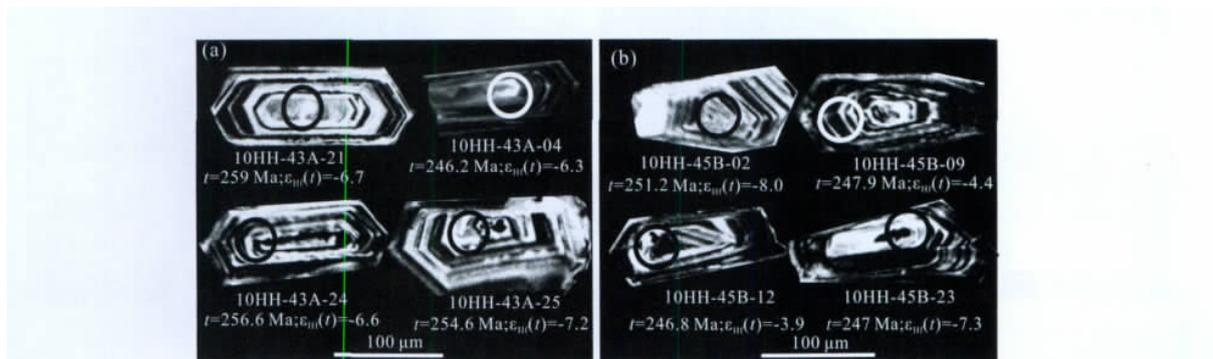


图3 代表性锆石颗粒CL图像

Fig. 3 CL images of the representative zircons

可知其为岩浆成因锆石, 22 个分析点给出的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $251.9 \pm 1.4 \text{ Ma}$  (95% 的置信度,  $\text{MSWD} = 0.84$ , 图 4a)。

(2) 岩体西侧 10HH-45B 样品: 除 10HH-45B-11、-13 和 -17 等 3 个分析点年龄较老且偏离谐和

线以外, 其它 22 个分析点均落在谐和线上, 其 Th 含量为  $254 \sim 944 \mu\text{g/g}$ , U 介于  $655 \sim 2312 \mu\text{g/g}$  之间, Th/U 为  $0.14 \sim 0.44$ , 给出的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄介于  $247.7 \sim 258.3 \text{ Ma}$  之间, 加权平均年龄为  $251.2 \pm 1.4 \text{ Ma}$  (95% 的置信度,  $\text{MSWD} = 0.90$ , 图 4b)。

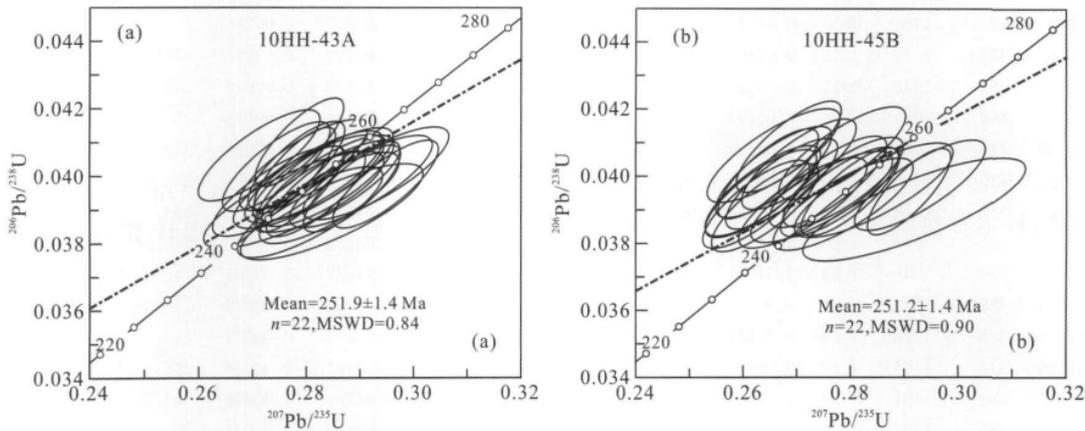


图 4 新安寨岩体样品代表性锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons from the Xin'anzhai granite

表 1 新安寨花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb results of the Xin'anzhai granite

样品	$^{232}\text{Th}$ ( $\mu\text{g/g}$ )	$^{238}\text{U}$ ( $\mu\text{g/g}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^{238}/\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
				比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$
新安寨花岗岩体东侧黑云母二长花岗岩 (10HH-43A)													
10HH-43A-01	778	2771	0.28	0.05277	0.0014	0.2885	0.00741	0.03963	0.00105	250.6	6.49	257.4	5.84
10HH-43A-02	335	1312	0.26	0.05237	0.00205	0.28428	0.01067	0.03935	0.0011	248.8	6.81	254	8.44
10HH-43A-03	663	2688	0.25	0.05375	0.00152	0.29477	0.00806	0.03976	0.00106	251.4	6.55	262.3	6.32
10HH-43A-04	464	1952	0.24	0.05228	0.00215	0.28069	0.01107	0.03893	0.0011	246.2	6.8	251.2	8.78
10HH-43A-05	658	1782	0.37	0.05302	0.00271	0.28476	0.01393	0.03894	0.00116	246.3	7.21	254.4	11.01
10HH-43A-06	11	712	0.02	0.07087	0.00161	1.33867	0.02937	0.13697	0.00361	827.5	20.46	862.7	12.75
10HH-43A-07	221	1177	0.19	0.05104	0.00198	0.2814	0.01053	0.03998	0.00111	252.7	6.87	251.8	8.34
10HH-43A-08	301	1318	0.23	0.05104	0.00218	0.28045	0.01149	0.03984	0.00113	251.8	6.99	251	9.11
10HH-43A-09	260	1366	0.19	0.05189	0.00208	0.28409	0.01093	0.0397	0.00111	251	6.88	253.9	8.65
10HH-43A-10	150	662	0.23	0.06968	0.00216	0.99448	0.02959	0.10349	0.00283	634.8	16.53	701	15.06
10HH-43A-11	291	955	0.30	0.05281	0.00207	0.29015	0.01092	0.03984	0.00111	251.8	6.87	258.7	8.59
10HH-43A-12	301	1199	0.25	0.05301	0.0021	0.29297	0.01113	0.04008	0.00112	253.3	6.94	260.9	8.74
10HH-43A-13	340	1648	0.21	0.05003	0.00137	0.27812	0.00737	0.04032	0.00106	254.8	6.58	249.2	5.86
10HH-43A-14	547	1799	0.30	0.05166	0.00191	0.28401	0.01008	0.03986	0.0011	252	6.8	253.8	7.97
10HH-43A-15	242	1180	0.20	0.05123	0.00264	0.27767	0.01372	0.0393	0.00117	248.5	7.26	248.8	10.9
10HH-43A-16	290	1336	0.22	0.05124	0.00202	0.2831	0.0107	0.04006	0.00112	253.2	6.92	253.1	8.47
10HH-43A-17	469	1816	0.26	0.05015	0.00115	0.27783	0.00619	0.04017	0.00104	253.9	6.46	248.9	4.92
10HH-43A-18	321	1273	0.25	0.05026	0.00183	0.27948	0.00977	0.04033	0.0011	254.9	6.85	250.2	7.75
10HH-43A-19	309	1641	0.19	0.05099	0.00128	0.27858	0.00673	0.03962	0.00104	250.5	6.43	249.5	5.35
10HH-43A-20	142	454	0.31	0.06036	0.0016	0.66697	0.01708	0.08013	0.00212	496.9	12.68	518.9	10.4
10HH-43A-21	391	1602	0.24	0.04929	0.00123	0.27865	0.00674	0.041	0.00107	259	6.63	249.6	5.35
10HH-43A-22	272	1231	0.22	0.05038	0.00192	0.27485	0.01007	0.03956	0.00109	250.1	6.78	246.6	8.02
10HH-43A-23	476	1739	0.27	0.05176	0.00144	0.28178	0.00753	0.03948	0.00104	249.6	6.48	252.1	5.96
10HH-43A-24	475	1022	0.46	0.04843	0.00171	0.27118	0.00923	0.04061	0.0011	256.6	6.84	243.6	7.37
10HH-43A-25	297	1358	0.22	0.04940	0.00153	0.27436	0.00818	0.04028	0.00108	254.6	6.68	246.2	6.52

续表 1

样品	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
	( $\mu\text{g/g}$ )	( $\mu\text{g/g}$ )		比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$
新安寨花岗岩体西侧黑云母二长花岗岩 (10HH-45B)													
10HH-45B-01	323	1465	0.22	0.04944	0.00101	0.28509	0.00545	0.04182	0.00075	249.1	6.91	246.4	8.6
10HH-45B-02	537	1812	0.30	0.05231	0.00107	0.29497	0.00561	0.04090	0.00074	251.2	6.82	260.9	7.79
10HH-45B-03	468	1448	0.32	0.04991	0.00117	0.28558	0.00621	0.04150	0.00077	251.8	6.77	249.6	7.24
10HH-45B-04	265	655	0.40	0.04893	0.00142	0.28378	0.00764	0.04207	0.00083	249.7	6.65	237.4	6.82
10HH-45B-05	338	1701	0.20	0.05142	0.00170	0.28780	0.00875	0.04059	0.00086	250.3	7.1	254.1	9.54
10HH-45B-06	344	1674	0.21	0.05202	0.00107	0.29578	0.00565	0.04124	0.00075	250	6.73	249.1	7.13
10HH-45B-07	254	1138	0.22	0.04962	0.00106	0.28711	0.00572	0.04196	0.00076	255.1	6.82	243.1	6.96
10HH-45B-08	496	2015	0.25	0.05192	0.00104	0.29825	0.00557	0.04166	0.00075	257.1	6.99	249.5	7.65
10HH-45B-09	438	2064	0.21	0.05154	0.00104	0.29015	0.00543	0.04083	0.00074	247.9	6.82	243.7	7.79
10HH-45B-10	436	1490	0.29	0.05064	0.00103	0.28739	0.00547	0.04116	0.00074	247.7	6.62	236.7	6.55
10HH-45B-11	355	1848	0.19	0.05780	0.00248	0.32152	0.01255	0.04034	0.00101	454.1	11.55	591.3	8.16
10HH-45B-12	482	1666	0.29	0.05316	0.00118	0.30432	0.00624	0.04152	0.00077	246.8	7.82	260	13.28
10HH-45B-13	129	560	0.23	0.07067	0.00113	1.15333	0.01722	0.11837	0.00209	746.4	18.88	787.1	12.16
10HH-45B-14	350	1676	0.21	0.04938	0.00090	0.28599	0.00490	0.04200	0.00074	258.3	6.88	241.5	6.4
10HH-45B-15	468	1178	0.40	0.05234	0.00125	0.29813	0.00660	0.04131	0.00078	247.7	6.92	249.6	8.46
10HH-45B-16	314	1104	0.28	0.04921	0.00107	0.28236	0.00578	0.04161	0.00075	256.7	7.08	239.3	8.11
10HH-45B-17	283	1591	0.18	0.05967	0.00090	0.46942	0.00662	0.05705	0.00098	384.7	10.04	405.8	8.07
10HH-45B-18	586	1490	0.39	0.05068	0.00105	0.28696	0.00557	0.04107	0.00074	251.5	6.79	240.5	6.83
10HH-45B-19	278	1943	0.14	0.04986	0.00095	0.28589	0.00510	0.04159	0.00074	253.6	6.9	239.3	7.09
10HH-45B-20	381	1855	0.21	0.05341	0.00094	0.30097	0.00494	0.04087	0.00071	250	6.63	250.7	5.95
10HH-45B-21	87	1760	0.05	0.05078	0.00134	0.28934	0.00706	0.04132	0.00080	250.2	6.82	237.7	7.07
10HH-45B-22	401	1780	0.23	0.05154	0.00098	0.29804	0.00527	0.04194	0.00074	251.9	6.85	247.4	7.09
10HH-45B-23	372	1799	0.21	0.05152	0.00106	0.28884	0.00554	0.04066	0.00073	247	6.67	238	6.54
10HH-45B-24	729	1674	0.44	0.05163	0.00111	0.29620	0.00592	0.04161	0.00076	253.3	6.77	238.5	6.14
10HH-45B-25	944	2312	0.41	0.05460	0.00168	0.30671	0.00868	0.04074	0.00085	250.1	6.54	259.3	4.97

上述两个样品分别给出  $251.9 \pm 1.4$  Ma 和  $251.2 \pm 1.4$  Ma 的加权平均年龄,在误差范围内高度一致,代表了新安寨花岗岩体的侵位年龄。

### 3.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石是适合于 Hf 同位素研究的典型矿物,因为它有很高的 Hf 含量和同位素封闭温度,后期的变质作用难以改变其原始的 Hf 同位素组成。同时锆石具有低的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值,形成后放射性成因的同位素变化可被忽略,由年龄不确定性引起的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值误差也较为有限 (Amelin et al., 1999; 吴福元等, 2007b)。两个样品的锆石 Hf 同位素分析结果见表 2。

(1) 岩体东侧 10HH-43A 样品: 该样品所测的 25 颗锆石具有非常低的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值,其中 10HH-43A-06、-10 和 -20 三颗继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别为 4.3、-4.8 和 -9.3,  $t_{\text{DM2}}$  分别为 1.45 Ga、1.87 Ga 和 2.05 Ga。22 颗结晶锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  介于 0.00136 ~ 0.00235 之间,平均 0.00168,显示锆石形成后基本没有放射性成因的 Hf 积累 (吴福元等, 2007b),  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值介于 0.28235 ~ 0.28245。按  $t =$

251.9 Ma 的形成年龄,对这 22 颗锆石计算出的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始比值介于 0.282340 ~ 0.282441 之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -9.8 ~ -6.2, 平均 -7.6, 其二阶模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  介于 1.67 ~ 1.90 Ga 之间,平均 1.76 Ga, 如图 5 和图 6a 所示。

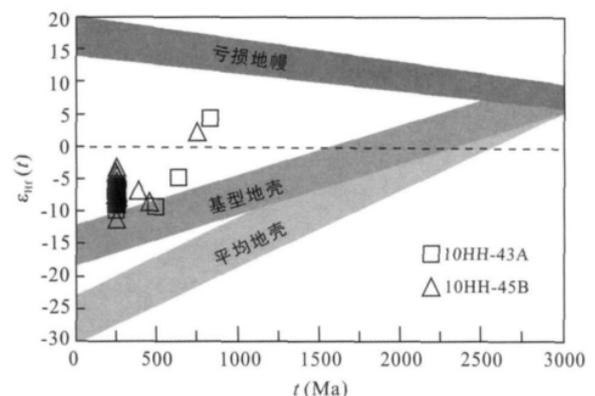


图 5 新安寨花岗岩体  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  与锆石结晶年龄图解

(基性地壳  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.022$  与平均地壳  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ ) 的 Hf 演化线来自 Yang et al., 2008)

Fig. 5 Plots of  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  versus crystallization age of the magmatic zircons from the Xin'anzhai granite

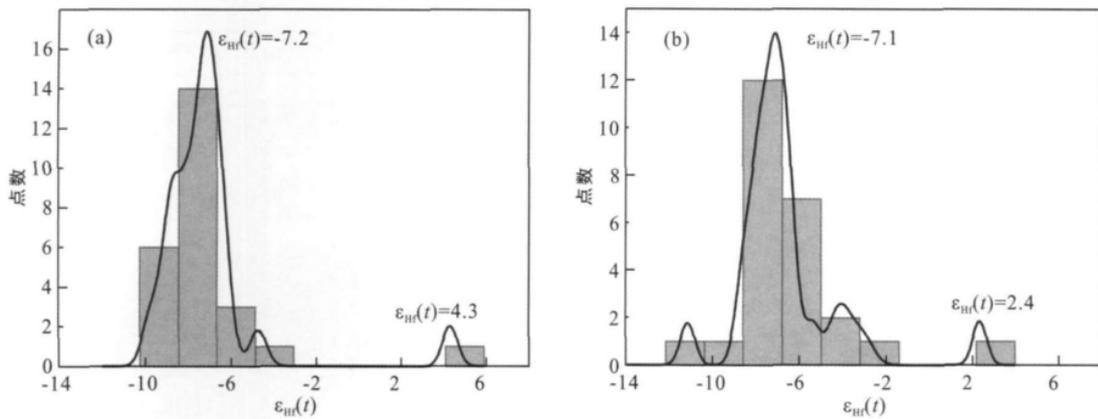


图 6 新安寨花岗岩体的锆石 Hf 同位素组成

Fig. 6 Zircon Hf isotopic compositions of the Xin'anzhai granite

表 2 新安寨花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Table 2 Analytical results of LA-ICP-MS zircon *in-situ* Lu-Hf isotope determinations for the Xin'anzhai granite

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^C(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
新安寨花岗岩体东侧黑云母二长花岗岩(10HH-43A)										
10HH-43A-01	0.060	0.002101	0.282436	0.000021	-11.9	-6.7	0.7	1189	1706	-0.94
10HH-43A-02	0.042	0.001496	0.282412	0.000020	-12.7	-7.5	0.7	1203	1754	-0.95
10HH-43A-03	0.060	0.002074	0.282378	0.000019	-13.9	-8.8	0.7	1272	1836	-0.94
10HH-43A-04	0.056	0.001979	0.282450	0.000021	-11.4	-6.3	0.7	1165	1677	-0.94
10HH-43A-05	0.041	0.001442	0.282432	0.000019	-12.0	-6.9	0.7	1174	1712	-0.96
10HH-43A-06	0.039	0.000255	0.282381	0.000020	-13.8	4.3	0.7	1208	1448	-0.99
10HH-43A-07	0.051	0.001357	0.282368	0.000024	-14.3	-9.0	0.9	1262	1850	-0.96
10HH-43A-08	0.057	0.001800	0.282374	0.000021	-14.1	-8.9	0.7	1269	1842	-0.95
10HH-43A-09	0.044	0.002006	0.282393	0.000021	-13.4	-8.2	0.7	1248	1801	-0.94
10HH-43A-10	0.054	0.001507	0.282260	0.000022	-18.1	-4.8	0.8	1419	1872	-0.95
10HH-43A-11	0.041	0.001869	0.282382	0.000019	-13.8	-8.6	0.7	1259	1823	-0.94
10HH-43A-12	0.042	0.001428	0.282447	0.000020	-11.5	-6.2	0.7	1153	1674	-0.96
10HH-43A-13	0.066	0.001467	0.282413	0.000017	-12.7	-7.3	0.6	1201	1749	-0.96
10HH-43A-14	0.044	0.002348	0.282418	0.000020	-12.5	-7.4	0.7	1223	1748	-0.93
10HH-43A-15	0.052	0.001567	0.282347	0.000021	-15.0	-9.8	0.8	1298	1901	-0.95
10HH-43A-16	0.046	0.001845	0.282426	0.000021	-12.2	-7.0	0.7	1196	1726	-0.94
10HH-43A-17	0.049	0.001600	0.282394	0.000018	-13.4	-8.1	0.6	1233	1794	-0.95
10HH-43A-18	0.047	0.001730	0.282394	0.000020	-13.4	-8.1	0.7	1237	1794	-0.95
10HH-43A-19	0.019	0.001657	0.282407	0.000021	-12.9	-7.7	0.7	1216	1767	-0.95
10HH-43A-20	0.040	0.000634	0.282207	0.000024	-20.0	-9.3	0.9	1460	2052	-0.98
10HH-43A-21	0.042	0.001406	0.282428	0.000017	-12.2	-6.7	0.6	1179	1713	-0.96
10HH-43A-22	0.053	0.001470	0.282424	0.000019	-12.3	-7.1	0.7	1187	1728	-0.96
10HH-43A-23	0.044	0.001844	0.282412	0.000023	-12.7	-7.5	0.8	1215	1757	-0.94
10HH-43A-24	0.040	0.001571	0.282434	0.000021	-11.9	-6.6	0.7	1175	1701	-0.95
10HH-43A-25	0.060	0.001441	0.282416	0.000019	-12.6	-7.2	0.7	1196	1742	-0.96

续表 2

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
新安寨花岗岩体西侧黑云母二长花岗岩(10HH-45B)										
10HH-45B-01	0.046	0.001622	0.282404	0.000017	-13.0	-7.8	0.6	1219	1773	-0.95
10HH-45B-02	0.041	0.001451	0.282397	0.000026	-13.2	-8.0	0.9	1223	1786	-0.96
10HH-45B-03	0.042	0.001442	0.282436	0.000018	-11.9	-6.6	0.6	1168	1699	-0.96
10HH-45B-04	0.055	0.001857	0.282474	0.000020	-10.5	-5.4	0.7	1127	1620	-0.94
10HH-45B-05	0.039	0.001399	0.282422	0.000018	-12.4	-7.1	0.6	1186	1730	-0.96
10HH-45B-06	0.042	0.001495	0.282380	0.000020	-13.9	-8.6	0.7	1249	1826	-0.95
10HH-45B-07	0.037	0.001305	0.282415	0.000017	-12.6	-7.3	0.6	1194	1744	-0.96
10HH-45B-08	0.052	0.001814	0.282421	0.000017	-12.4	-7.1	0.6	1201	1733	-0.95
10HH-45B-09	0.047	0.001647	0.282502	0.000023	-9.5	-4.4	0.8	1080	1555	-0.95
10HH-45B-10	0.060	0.002095	0.282417	0.000018	-12.5	-7.5	0.6	1216	1750	-0.94
10HH-45B-11	0.044	0.001544	0.282262	0.000022	-18.0	-8.5	0.8	1419	1974	-0.95
10HH-45B-12	0.052	0.001790	0.282518	0.000024	-9.0	-3.9	0.8	1062	1522	-0.95
10HH-45B-13	0.026	0.000958	0.282385	0.000019	-13.7	2.3	0.7	1224	1511	-0.97
10HH-45B-14	0.045	0.001585	0.282400	0.000018	-13.2	-7.8	0.6	1224	1778	-0.95
10HH-45B-15	0.049	0.001751	0.282539	0.000027	-8.2	-3.1	1.0	1031	1474	-0.95
10HH-45B-16	0.034	0.001211	0.282414	0.000020	-12.7	-7.2	0.7	1192	1743	-0.96
10HH-45B-17	0.044	0.001581	0.282355	0.000020	-14.8	-6.7	0.7	1288	1807	-0.95
10HH-45B-18	0.053	0.001870	0.282393	0.000021	-13.4	-8.2	0.7	1243	1799	-0.94
10HH-45B-19	0.058	0.002058	0.282398	0.000021	-13.2	-8.0	0.7	1243	1790	-0.94
10HH-45B-20	0.042	0.001468	0.282449	0.000019	-11.4	-6.2	0.7	1151	1672	-0.96
10HH-45B-21	0.044	0.001639	0.282310	0.000019	-16.4	-11.1	0.7	1354	1985	-0.95
10HH-45B-22	0.041	0.001448	0.282431	0.000019	-12.1	-6.8	0.7	1175	1710	-0.96
10HH-45B-23	0.039	0.001385	0.282418	0.000019	-12.5	-7.3	0.7	1192	1742	-0.96
10HH-45B-24	0.051	0.001765	0.282434	0.000019	-12.0	-6.7	0.7	1181	1706	-0.95
10HH-45B-25	0.076	0.002600	0.282446	0.000019	-11.5	-6.5	0.7	1191	1689	-0.92

(2) 岩体西侧 10HH-45B 样品: 其中 10HH-45B-11、-13 和 -17 三颗继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别为 -8.5、2.3 和 -6.7,  $t_{\text{DM2}}$  分别为 1.97 Ga、1.51 Ga 和 1.81 Ga。其余分析点  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.00121 \sim 0.00260$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28231 \sim 0.28254$ 。初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值介于 0.28230 ~ 0.28253 ( $t = 251.2 \text{ Ma}$ ),  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.1 \sim -3.1$ , 平均 -6.9, 二阶模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  介于 1.47 ~ 1.99 Ga 之间, 平均 1.72 Ga, 如图 5 和图 6b。

## 4 讨 论

### 4.1 岩石成因

云南省地矿局(1990)对新安寨岩体常量元素分析结果为:  $\text{SiO}_2 = 70.48\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.47\%$ 、 $\text{K}_2\text{O} = 4.05\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O} = 3.02\%$ 、 $\text{CaO} = 2.16\%$ 、 $\text{FeO}^{\text{I}} = 2.44\%$ 。A/CNK 和 A/NK 分别为 1.09 和 1.55, CIPW 计算结果中刚玉含量为 1.6%, 表明该岩体是高钾强过铝质花岗岩。样品在 QAP 定量矿物分类方案图解上投点落入二长花岗岩区域。

Sylvester(1998)认为花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  值主要

受源区中斜长石和黏土比例控制,可作为花岗岩源区的重要判别标志。一般而言,贫斜长石富黏土源区产生的强过铝质花岗岩的  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  小于 0.3, 富斜长石贫黏土源区(砂屑岩)产生的强过铝质花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  大于 0.3 (Douce and Johnston, 1991)。新安寨花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  为 0.79, 在不同成分岩浆的源岩判别图解(Altherr et al., 2000)上, 新安寨主量元素投点于杂砂岩熔融源区。因此, 新安寨花岗岩原岩是富斜长石贫黏土杂砂岩。

哀牢山构造带内的前寒武深变质岩系(哀牢山群、点苍山群、瑶山群)的 Nd 同位素模式年龄集中在 1600 ~ 1900 Ma (邹日等, 1997; 沙绍礼等, 1999; 朱炳泉等, 2001; 钟大赉, 1998)。我们对新安寨花岗岩体 Lu-Hf 同位素组成的测试结果表明: 该岩体东段的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.8 \sim -6.2$  (平均 -7.6), 模式年龄为 1.67 ~ 1.90 Ga; 西段  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.1 \sim -3.1$  (平均 -6.9), 模式年龄介于 1.5 ~ 2.0 Ga 之间。这暗示新安寨岩体的形成源区以沉积组分为主, 锆石 Hf 模式年龄与哀牢山群变质岩 Nd 模式年龄一致, 由此推测新安寨花岗岩体的源岩可能是哀牢山群变质岩系中的变质杂砂岩。根据锆石钛饱和温度计公

式  $\log(Ti_{zircon}) = (6.01 \pm 0.03) - (5080 \pm 30) / t$  (K) (Watson and Harrison, 2005) 新安寨两个样品计算的锆石钛饱和温度分别为 800 ~ 822 °C (平均 810 °C) 和 804 ~ 817 °C (平均 812 °C)。Winkler (1976) 在不同温度下对硬砂岩熔融产生岩浆的实验结果表明: 温度大于 700 °C 时, 白云母发生脱水熔融, 当温度大于 850 °C, 则黑云母脱水熔融, 温度升高到 900 °C 以上时角闪石才脱水熔融 (Thompson and Connolly, 1995)。据此推断新安寨花岗岩是哀牢山古元古代变质岩系中变杂砂岩在 810 °C 左右发生了长石、石英和云母类矿物脱水熔融的产物。

#### 4.2 构造意义

本文 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示新安寨花岗岩体侵位于晚二叠世 - 早三叠世 (251.6 Ma), 并非晚三叠世 (云南省地矿局, 1990), 而与绿春地区 247.3 Ma 的流纹岩 (刘翠等, 2011) 以及金沙江白马雪山花岗质侵入岩 (249 Ma, Zi et al., 2012) 形成时代相近。新安寨花岗岩周围出露的小面积花岗岩 (图 1) 也曾被认为形成于燕山期或者晚三叠世, 比如云南省地矿局 (1990) 对巴德轰东岩体测得的黑云母 K-Ar 年龄为 207 Ma 和 217 Ma。这些花岗岩体岩性基本与新安寨花岗岩一致, 都是黑云母二长花岗岩, 都侵位于下志留统, 并被上三叠统高山寨组沉积覆盖。所以这些小面积花岗岩体与新安寨花岗岩体可能形成时代相同, 都是在 252 Ma 左右。

绿春地区 247.3 Ma 的流纹岩被认为形成于成熟岛弧向陆碰撞的过渡环境 (刘翠等, 2011)。Zi et al. (2012) 报道了金沙江白马雪山花岗质侵入体的结晶年龄为 249 Ma, 也认为其形成于岛弧向弧陆或者陆陆碰撞转化的构造环境。在越南北部也有与古特提斯洋闭合有关 248 Ma 的花岗岩 (Roger et al., 2012), 越南中部发现了陆陆碰撞的高压变质杂岩带 (253 ± 2 Ma, Nagy et al., 2001)。新安寨花岗岩体的形成时代与上述岩体接近, 且同处于哀牢山构造带, 与上述岩体应存在着相同的大地构造背景, 结合新安寨花岗岩体的主量元素组成在花岗岩构造环境判别图上也投点于同碰撞构造环境, 因此推测该岩体形成于岛弧向陆碰撞转化或者陆陆或陆弧碰撞的构造环境。

直到目前, 位于扬子板块与思茅印支地板之间的金沙江 - 哀牢山 - 松马构造带在古生代至早中生代是古特提斯支洋盆, 还是弧后盆地依然没有定论。但是昌宁孟连带作为古特提斯主洋盆已基本确定, 并且对其构造的各个演化阶段, 尤其是洋壳俯冲开

始之后的演化有了比较清晰的认识。古特提斯洋壳在早二叠世开始北东向俯冲: Li et al. (2012) 和 Jian et al. (2009b) 指出南岭山 (298 Ma) 和半坡 (294.9 Ma 和 285.6 Ma) 基性超基性侵入岩是与洋壳俯冲有关的岛弧成因的, 在维西吉岔发现了形成于弧后盆地的混杂岩 (281 ~ 306 Ma) (Jian et al., 2009a, b), 澜沧江蛇绿岩 (267 Ma) 被确定为俯冲带型蛇绿岩 (Jian et al., 2009a, b), 带内最晚的岛弧成因岩石是 248.5 ± 6.3 Ma 的安山岩 (Peng et al., 2008); 主洋盆在早三叠世早期开始闭合: 区域上普遍缺失早三叠世地层, 彭头平等 (2006) 和范蔚茗等 (2009) 在临沧、景洪、云县等地厘定出了同碰撞成因的 230 Ma 左右的花岗岩、流纹岩; 晚三叠世晚期昌宁孟连带开始处于碰撞后的伸展环境: 在上三叠统小定西组和忙怀组中分别得到了 214 Ma 和 210 Ma 的玄武岩, 岩石地化显示处于碰撞后的伸展环境 (Wang et al., 2010)。与此对应, 前人虽然对晚古生代至早中生代处于哀牢山带的古特提斯支洋盆或者弧后盆地也开展了大量研究 (如引言所述), 但其构造演化时限还不确定。本文的研究说明在晚二叠世 - 早三叠世 (251.6 Ma 左右) 哀牢山支洋盆或者弧后盆地可能已经闭合, 与金沙江、越南松马构造带演化基本同时。闭合的动力可能来源于古特提斯主洋盆向思茅印支地块之下的俯冲和扬子板块西缘峨眉山幔柱上侵。新安寨花岗岩体被上三叠统高山寨组地层覆盖, 哀牢山构造带内普遍发育一碗水组, 说明扬子板块与思茅印支地块的碰撞一直延续到晚三叠世早期。

## 5 结 论

(1) 新安寨花岗岩体两个样品的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 251.9 ± 1.4 Ma 和 251.2 ± 1.4 Ma, 并非原先认为的形成于燕山期或者晚三叠世。

(2) 两个样品锆石  $\varepsilon_{Hf}(t)$  介于 -9.8 ~ -6.2 和 -11.1 ~ -3.1, 平均为 -7.6 和 -6.9; Hf 的二阶段模式年龄分别为 1.67 ~ 1.90 Ga 和 1.47 ~ 2.00 Ga。其源岩可能主要是元古宙哀牢山群变质杂砂岩。

(3) 新安寨过铝质花岗岩样品形成于岛弧向陆碰撞转换或者同碰撞构造环境, 指示哀牢山带的古特提斯支洋盆或弧后盆地在晚二叠世 - 早三叠世 (251.6 Ma) 可能已经基本闭合。

**致谢:** 感谢西北大学董云鹏教授和吉林大学周建波教授的认真细致审稿,感谢西北大学张菲菲博士和编辑部老师的热心帮助。他们的诸多建设性意见使本文质量得以提高。

### 参考文献 (References):

- 从柏林, 吴根耀, 张旗, 张儒媛, 翟明国, 赵大升, 张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化. 中国科学(D辑), 23(11): 1201-1207.
- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 邓尚贤. 2000. 哀牢山缝合带中两类火山岩地球化学特征及其构造意义. 地球化学, 29(1): 6-13.
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. 地学前缘, 16(6): 291-302.
- 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 苏文超. 2002. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化. 大地构造与成矿学, 26(1): 28-36.
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 王传尚. 1998a. 中国西南哀牢山蛇绿岩同位素地质年代学及大地构造意义. 华南地质与矿产, 1(1): 1-11.
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 王传尚. 1998b. 云南新平县双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究. 岩石学报, 14(2): 207-211.
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 龚俊峰, 宋彪, 庆建春, 张臣. 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石学报, 24(10): 2322-2330.
- 凌其聪, 程惠兰, 沈上越, 魏启荣. 1999. 云南哀牢山蛇绿岩的矿物学研究. 矿物学报, 19(1): 56-62.
- 刘翠, 邓晋福, 刘俊来, 石耀霖. 2011. 哀牢山构造岩浆带晚二叠世-早三叠世火山岩特征及其构造环境. 岩石学报, 27(12): 3590-3602.
- 刘俊来, 唐渊, 宋志杰, Dung T M, 翟云峰, 吴文彬, 陈文. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1285-1303.
- 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 喻学惠, 王勇, 周肃, 杨伟光. 2001. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义. 高校地质学报, 7(2): 121-138.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 刘敦一, 石玉若, 苗来成. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义. 中国科学(D辑), 36(2): 123-132.
- 沙绍礼, 包俊跃, 金亚昌, 邓志祥. 1999. 点苍山变质带同位素年代学研究新进展. 云南地质, 18(1): 63-36.
- 沈上越, 魏启荣, 程惠兰, 莫宣学. 1998. “三江”哀牢山-李仙江带火山岩构造岩浆类型. 矿物岩石, 18(2): 18-24.
- 魏启荣, 沈上越. 1995. 哀牢山北段老王寨-浪泥塘一带蛇绿岩的形成环境. 特提斯地质, 19: 56-70.
- 魏启荣, 沈上越. 1997. “三江”地区哀牢山西侧三类弧火山岩特征. 地质科技情报, 16(2): 13-18.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220-228.
- 云南省地矿局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社: 400-450.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三. 岩石学报, 23(11): 2683-2698.
- 张旗, 周德进, 赵大升, 彭兴阶, 罗万林, 刘祥品. 1996. 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. 岩石学报, 12(1): 17-29.
- 张玉泉, 夏斌, 梁华英, 刘红英, 林清茶. 2004. 云南大平糜棱岩化碱性花岗岩的锆石特征及其地质意义. 高校地质学报, 10(3): 378-384.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社: 1-231.
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 王江海, 邓尚贤. 2001. 云南前寒武纪基底形成与变质时代及其成矿作用年代学研究. 前寒武纪研究进展, 24(2): 75-82.
- 邹日, 朱炳泉, 孙大中, 常向阳. 1997. 红河成矿带壳幔演化与成矿作用的年代学研究. 地球化学, 26(2): 46-56.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N and Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733): 252-255.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report Pb-204. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- Balykin P A, Polyakov G V, Izokh A E, Tran T H, Ngo T P, Tran Q H and Petrova T E. 2010. Geochemistry and petrogenesis of Permian ultramafic-mafic complexes of the Jin-ping-Song Da rift (southeastern Asia). *Russian Geology and Geophysics*, 51(6): 611-624.
- Blichert T J, Chauvel C and Albarede F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector multiple collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248-260.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G and Burton K.

2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574.
- Debièvre P and Taylor P D P. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 123(2): 149–166.
- Douce A E P and Johnston A D. 1991. Phase-equilibria and melt productivity in the pelitic system – Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202–218.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, Zhang F F and Zhang Y Z. 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China. *Lithos*, 119(3–4): 553–568.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'reilly S Y, Xu X S and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L and Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1–2): 47–69.
- Jian P, Liu D Y, Kroner A, Zhang Q, Wang Y Z, Sun X M and Zhang W. 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. *Lithos*, 113(3–4): 748–766.
- Jian P, Liu D Y, Kroner A, Zhang Q, Wang Y Z, Sun X M and Zhang W. 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. *Lithos*, 113(3–4): 767–784.
- Lepvrier C, Maluski H, Van Tich V, Leyreloup A, Thi P T and Van Vuong N. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1–4): 87–118.
- Li G, Li C, Ripley M E, Kamo S and Su S. 2012. Geochronology, petrology and geochemistry of the Nanlinshan and Banpo mafic-ultramafic intrusions: Implications for subduction initiation in the eastern Paleo-Tethys. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, in press.
- Ludwig K R. 2001. SQUID 1.02: A user manual. Berkeley: *Berkeley Geochronological Center Special publication*: 1–219.
- Metcalf I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 551–566.
- Metcalf I. 2006. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9(1–2): 24–46.
- Nagy E A, Maluski H, Lepvrier C, Scharer U, Thi P T, Leyreloup A and Thich V V. 2001. Geodynamic significance of the Kontum massif in central Vietnam: Composite (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) and U-Pb ages from Paleozoic to Triassic. *Journal of Geology*, 109(6): 755–770.
- Peng T P, Wang Y J, Zhao G C, Fan W M and Peng B X. 2008. Arc-like volcanic rocks from the southern Lancangjiang zone, SW China: Geochronological and geochemical constraints on their petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 102(1–2): 358–373.
- Roger F, Maluski H, Lepvrier C, Van T V and Paquette J L. 2012. LA-ICPMS zircons U/Pb dating of Permo-Triassic and Cretaceous magmatism in Northern Vietnam—Geodynamical implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48: 72–82.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. Washington D C: *American Association for the Advancement of Science*, 293(5530): 683–687.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granulites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44.
- Thompson A B and Connolly J A D. 1995. Melting of the continental-crust—some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 100: 15565–15579.
- Vervoort J D and Blichert T J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 533–556.
- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2006. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(3): 309–321.
- Wang C Y, Zhou M F and Qi L. 2007. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping (SW China) Song Da (northern Vietnam) district: Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation. *Chemical Geology*, 243

- (3-4): 317-343.
- Wang X D, Shi G R and Sugiyama T. 2002. Permian of West Yunnan, Southwest China: A biostratigraphic synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 647-656.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Peng T P, Zhang F F, Zhang Y H and Bi X W. 2010. Petrogenesis of late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys Geochronological and geochemical constraints. *Lithos*, 120(3-4): 529-546.
- Watson E B and Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841-844.
- Winkler H G F. 1976. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (4th Edition). New York: Springer-Verlag: 1-344.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E and Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36(6): 467-470.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Gunther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370.
- Yumul G P, Zhou M F, Wang C Y, Zhao T P and Dimalanta C B. 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite (Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow-spreading oceanic basin origin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5-6): 385-395.
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, Tohver E, Wang Y J and McCuaig T C. 2012. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang Orogen (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys. *Lithos*, 140: 166-182.

## Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Composition of the Xin'anzhai Granite along the Ailaoshan Tectonic Zone in West Yunnan Province

LIU Huichuan<sup>1,2</sup>, WANG Yuejun<sup>1</sup>, CAI Yongfeng<sup>1,2</sup>,  
MA Lian<sup>1,2</sup>, XING Xiaowan<sup>1,2</sup> and FAN Weiming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A set of zircon U-Pb geochronological and in-situ Hf isotopic data was presented for the Xin'anzhai granite along the Ailaoshan tectonic zone in west Yunnan province. Our dating results show that zircon grains separated from the two samples (10HH-43B and 10HH-45B) from the Xin'anzhai granite yield weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $251.9 \pm 1.4$  Ma and  $251.2 \pm 1.4$  Ma, respectively, which are interpreted as the crystallization age of the Xin'anzhai pluton. This indicates that the Xin'anzhai pluton emplaced at  $P-T$  boundary rather than during the Yanshanian period or late Triassic previously perceived of. Their  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range from  $-9.8 \sim -6.2$  for 10HH-43B and  $-11.1 \sim -3.1$  for 10HH-45B with mean values of  $-7.6$  and  $-6.9$ , respectively. The corresponding two-stage Hf model ages range from  $1.67 \sim 1.90$  Ga and  $1.47 \sim 2.00$  Ga. These data together with other observations indicate that the Xin'anzhai peraluminous biotite monzonitic granite originated from the metagreywacke in the Proterozoic Ailaoshan metamorphic complex and formed in the syn-collisional setting in response to the assemblage of the Yangtze with Simao-Indochina Blocks.

**Keywords:** Honghe-Ailaoshan tectonic zone; syn-collisional granite; Xin'anzhai granite; zircon U-Pb geochronology; in-situ Hf isotope analysis