

滇东南老城坡片麻状花岗岩 地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其意义

潘锦波^{1,4}, 张达^{1*}, 阙朝阳^{1,2}, 狄永军¹, 黄孔文³, 毕珉烽¹, 徐建珍¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 紫金矿业集团西北有限公司, 乌鲁木齐 830026;
3. 广东省地质调查院, 广州 510080; 4. 中铁资源集团有限公司, 北京 100039

摘要:为探讨中越边境 Song Chay 穹隆中片麻状花岗岩的形成及演化,对穹隆北端的老城坡片麻状花岗岩进行了年代学和地球化学研究。结果表明,老城坡片麻状花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 415.4 ± 5.2 Ma, 属于过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩, SiO_2 含量为 73.48%~77.16%, 全碱含量较高 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.40\% \sim 7.86\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.99 \sim 1.75$ (均值为 1.30), 铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.01~1.14。大离子亲石元素 K 和 Rb 相对富集, Ba, Sr 亏损明显; 高场强元素 Th、U、Hf 相对富集, Ti、Nb 亏损, 其中 Ti 强烈亏损。结合区域地质背景初步推断, 岩浆源岩可能来自早期地壳物质部分熔融的产物; 广西运动时期云开地体与桂滇—北越地体发生碰撞, 导致老城坡岩体侵位于华南褶皱带。

关键词: Song Chay 穹隆; 片麻状花岗岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 云南

中图分类号: P597 文章编号: 1007-2802(2015)04-0795-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.04.014

Geochemistry and Zircon U-Pb Chronology of the Laochengpo Gneissic Granite in the Southeast Yunnan Area and their Implications

PAN Jin-bo^{1,4}, ZHANG Da^{1*}, QUE Chao-yang^{1,2}, DI Yong-jun¹, HUANG Kong-wen³, BI Min-feng¹, XU Jian-zhen¹

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Northwestern Limited Company of Zijin Mining Group, Urumchi 830026, China; 3. Guangdong Geologic Survey Institute, Guangzhou 510080, China;
4. China Railway Resources Group Co., LTD, Beijing 100039, China

Abstract: To further explore the formation and evolution of gneissic granite in the Song Chay dome of the Sino-Vietnamese border, the paper studied the chronology and geochemistry of the Laochengpo gneissic granite in the north of the dome. The results showed that the Laochengpo gneissic granite is a peraluminous, high K and calc-alkaline S-type granitoid, with a LA-ICP-MS zircon U-Pb dating age of 415.4 ± 5.2 Ma. The granite contains 73.48%—77.16% of SiO_2 , high total alkalis ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.40\% \sim 7.86\%$) and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.99 \sim 1.75$ (with a mean of 1.30), and high A/CNK of 1.01—1.14. The LILE elements K and Rb are relatively enriched, Ba and Sr are relatively depleted, the HFSE elements Th, U, and Hf are relatively enriched, and Ti and Nb are relatively depleted with Ti is depleted the most in the Laochengpo gneissic granite. On the basis of the regional geological background, this study suggested that the magma source may be a product of partially melted early crustal materials; the Yunkai terrane collided with the Yunnan-North Vietnam terrane during the Guangxi movement, which resulted in the emplacement of the Laochengpo plutons into the South China fold belt.

Key words: Song Chay dome; gneissic granite; geochemistry; zircon U-Pb ages; Yunnan Province

老城坡片麻状花岗岩所属 Song Chay 穹隆(中越边境)位于华夏板块、扬子板块与印支板块交汇区域,处于哀牢山—红河断裂带东侧和华南褶皱系

西端。该区域构造环境复杂,经历多期构造热液事件和岩浆作用,是研究的热点(Roger *et al.*, 2000; Nam *et al.*, 2003; Yan *et al.*, 2006; Maluski *et al.*,

收稿日期: 2014-07-07 收到, 2014-09-28 改回

基金项目: 云南省麻栗坡县政府委托项目“云南省麻栗坡县老君山地区钨多金属矿床成因及成矿预测”

第一作者简介: 潘锦波(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 构造地质学. E-mail: jinbopan@126.com.

* 通讯作者简介: 张达(1967-), 男, 博士生导师, 研究方向: 构造地质与成矿规律研究. E-mail: zhangda@cugb.edu.cn.

2001; Lepvrier *et al.*, 2008)。自 21 世纪初起,一些研究者开始应用同位素年代学方法对 Song Chay 穹窿体进行年代学研究,Roger 等(2000)在 Song Chay 穹窿东南区域(越南境内)采集眼球状片麻状花岗岩样品进行锆石 U-Pb 年龄分析,将其确定为志留纪花岗岩(428 ± 5 Ma),此类片麻状花岗岩为穹窿体的主体,分布广泛乃至滇东南地区(中国境内)。Song Chay 穹窿的北部区域出露一套面积约为 85 km^2 的变质酸性侵入岩,名为南温河序列(S_3NW),主要形成于早志留世;依据岩石组构特征,将其分为 2 个不同岩石单元:团田斑状、片麻状中粗粒花岗岩(S_3T)和老城坡片麻状中细粒花岗岩(S_3L)(云南地质调查大队,1999)。老城坡岩体分布广泛,然而,因风化严重,增大了研究难度,导致可靠数据的缺乏。

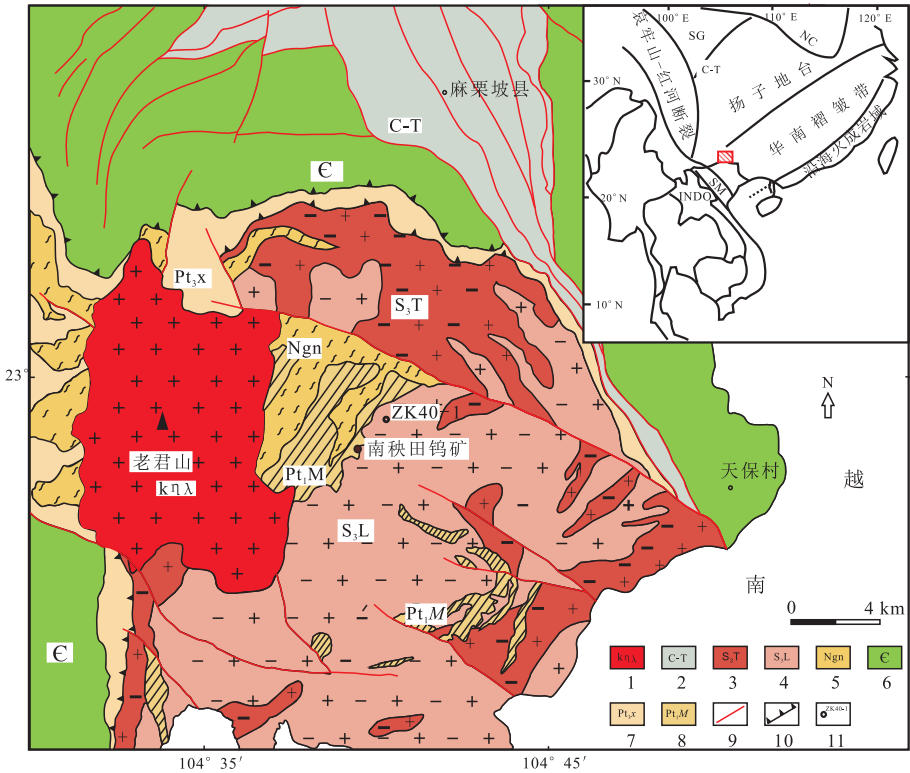
Song Chay 穹窿处于华夏板块与扬子板块交汇区域,发育大量片麻状花岗岩。老城坡片麻状花岗岩处于 Song Chay 穹窿北部,研究相对薄弱,又缺乏年代学及元素地球化学数据。Song Chay 穹窿中不同结构构造的片麻状花岗岩是否为同时代侵入?片麻状花岗岩的成因又是什么?这些岩体与哪期构造-岩浆活动有关系?为此本文以老城坡片麻状

花岗岩作为研究对象,在野外调查与岩相学的基础上,选取老城坡钻孔样品进行详细的地球化学分析,并开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。

1 地质背景及岩相学特征

老城坡岩体位于中越边境附近麻栗坡东部一带,出露面积 28.5 km^2 ,属于都龙—Song Chay 构造穹窿一部分,位于华南褶皱系西南端滇东南褶皱带,文山—麻栗坡大断裂西南侧。该区地层出露不完整,除第四系外,其他地层均受到岩浆作用和构造活动的影响,出露地层从老到新依次有元古界、寒武系、泥盆系、石炭系和三叠系以及第四系。老城坡单元下部岩层为元古界南秧田岩组(Pt_1n)。该区岩浆岩发育,主要为酸性侵入岩,最具代表性岩体为老君山多期复杂岩体。该区构造发育,北西向断裂以文山—麻栗坡断裂、南温河断裂、马关—都龙断裂为代表,对成矿区地质构造的发展和矿产分布,具有明界的控制作用。次级褶皱及断裂以南北向和北东向为主。

本文老城坡岩体样品于南秧田钨矿附近钻孔 ZK40-1 中采集,取样深度分别为 ZK40-1b2: 58.1 m; ZK40-1b3: 78.39 m; ZK40-1b4: 88.13 m;



1.燕山期花岗岩;2.石炭-三叠纪岩层;3.晚志留纪团田片麻状花岗岩;4.晚志留纪老城坡片麻状花岗岩;5.南捞片麻岩;6.寒武纪岩层;7.古元古代新寨岩组;8.古元古代猛洞岩群;9.断层;10.剥离断层;11.采样点(SG:松潘甘孜;NC:华北板块;INDO:印支板块;SM:Song Ma缝合域)

图 1 麻栗坡地区构造背景简图(据云南省麻栗坡县地质矿产图,2010 和 Roger *et al.*,2000)

Fig.1 Tectonic background sketch of the Malipo area (after Geological map in Malipo, 2010 and Roger *et al.*, 2000)

ZK40-1b5: 91.25; ZK40-1b6: 109.68; ZK40-1b7: 112.29 m; ZK40-1b8: 129.82 m。其主要岩性为浅灰色片麻状中细粒花岗岩, 变余半自形粒状结构、鳞片状变晶镶嵌结构, 条痕-片麻状构造, 片状矿物黑云母呈现一定的定向性(图2)。主要由石英(30%)、碱性长石(35%)、斜长石(20%)、白云母(10%)和黑云母(5%)组成, 碱性长石主要以正长石与微斜长石为主。其中, 石英, 他形粒状; 微斜长石, 格子双晶, 含量约25%; 白云母鳞片状, 无色。另有少量电气石。

2 样品分析

全岩地球化学分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室完成。主量元素由熔片X射线荧光光谱法(XRF)测试, 分析精度优于5%~10%; 微量元素由ICP-MS法测试, 分析精度优于5%; 分析测试方法详见文献(Gao *et al.*, 2002)。

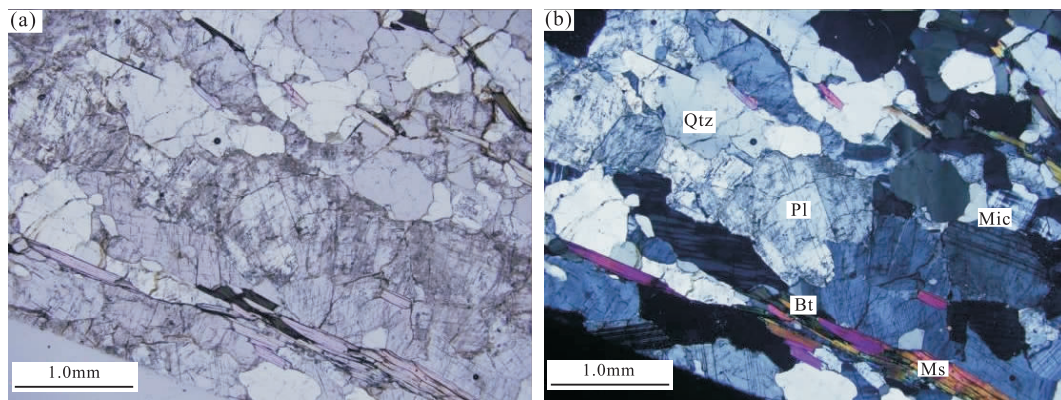
锆石分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成。锆石制靶镶嵌和阴极发光照相是在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石U-Pb分析在

天津地质矿产研究所同位素实验室完成。锆石定年分析的仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及配套的NewwaveUP193激光剥蚀系统。锆石年龄计算的外标为国际标准锆石91500, 元素含量的外标为人工合成硅酸盐玻璃NIST SRM610, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用ICPMSDataCal4.3程序(Liu *et al.*, 2008), 并采用软件对测试数据进行普通铅校正(Andersen, 2002), 年龄计算及谐和图绘制采用ISOPLOT(Ludwig, 2003)软件完成。

3 结果

3.1 主量元素

老城坡片麻状花岗岩化学成分(表1), SiO_2 含量为73.48%~77.16%。全碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)较高, 变化于7.40%~7.86%。里特曼指数为1.64~1.96, 平均1.78(小于3.3), 属于钙碱性系列。在 SiO_2 - K_2O 图解(图3)中, 样品数据投点较为集中的落于高钾钙碱性系列内。 Al_2O_3 含量为11.60%~13.72%, 变化范围不大。在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(图3)中, 片麻状花



Qtz-石英; Pl-斜长石; Mic-微斜长石; Bt-黑云母; Ms-白云母

图2 ZK40-1b2 老城坡片麻状花岗岩样品镜下照片(a为单偏光, b为正交偏光)

Fig.2 Plane polarized light (a) and cross nicols (b) photomicrographs of samples from the ZK40-1b2 Laochengpo gneissic granite

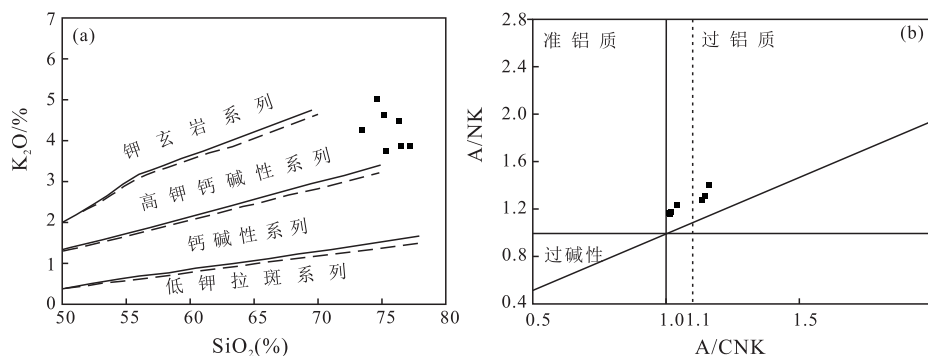


图3 老城坡片麻状花岗岩 SiO_2 - K_2O 图解(a)及 A/CNK - A/NK 图解(b) (底图a据Reikwood, 1989; b据Maniar和Piccoli, 1989)

Fig.3 SiO_2 vs. K_2O diagram (a) and A/CNK - A/NK diagram (b) of the Laochengpo gneissic granite

(a, modified after Richwood, 1989; b, modified after Maniar and Piccoli, 1976)

表 1 老城坡片麻状花岗岩主量元素(%)、稀土和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 The analyzed data of major elements(%) and trace elements($\times 10^{-6}$) of the Laochengpo gneissic granites

样品号	ZK40-1b2	ZK40-1b3	ZK40-1b4	ZK40-1b5	ZK40-1b6	ZK40-1b7	ZK40-1b8
SiO ₂	75.16	74.6	73.48	75.33	76.46	77.16	76.36
Al ₂ O ₃	12.9	13.21	13.72	12.67	12.15	11.73	11.6
Fe ₂ O ₃	0.52	0.65	0.54	0.22	0.15	0.37	0.31
FeO	1.12	1.12	1.51	1.48	1.31	1	1.53
MgO	0.27	0.3	0.43	0.36	0.39	0.26	0.57
CaO	0.7	0.77	1.12	1.05	0.89	0.77	0.84
Na ₂ O	3.08	2.86	3.15	3.78	3.71	3.62	3.09
K ₂ O	4.64	5.01	4.25	3.76	3.88	3.87	4.48
MnO	0.062	0.063	0.075	0.061	0.043	0.048	0.046
P ₂ O ₅	0.216	0.238	0.345	0.194	0.147	0.142	0.146
TiO ₂	0.16	0.17	0.19	0.17	0.14	0.13	0.2
TFe ₂ O ₃	1.76	1.9	2.22	1.86	1.61	1.48	2
LOI	0.98	0.83	1.09	0.66	0.7	0.61	0.74
TOTAL	99.8	99.83	99.89	99.72	99.98	99.7	99.91
K ₂ O/NaO	1.51	1.75	1.35	0.99	1.04	1.07	1.45
K ₂ O+NaO	7.72	7.86	7.4	7.54	7.59	7.49	7.57
A/CNK	1.14	1.15	1.16	1.04	1.02	1.02	1.01
A/NK	1.28	1.31	1.4	1.23	1.18	1.16	1.17
Rb	463.00	488.10	282.50	339.40	319.40	299.90	271.50
Ba	144.90	141.10	214.70	142.20	157.00	86.60	220.90
Th	12.50	13.04	10.80	14.89	13.13	16.80	18.34
U	20.09	15.63	11.45	17.82	31.15	14.80	21.78
Nb	19.38	19.53	27.60	18.78	15.97	12.95	15.90
Ta	3.52	4.92	10.27	4.96	2.66	2.67	2.94
La	16.25	17.23	16.98	16.30	13.55	16.51	20.08
Ce	35.08	37.49	37.31	32.72	27.13	35.91	42.74
Pb	25.80	26.43	27.40	27.61	28.36	27.51	29.16
Sr	50.80	39.50	158.10	57.70	136.90	127.80	85.20
Nd	15.57	16.36	16.83	13.64	11.28	15.82	18.08
Sm	3.65	3.81	3.68	3.13	2.65	4.12	4.24
Zr	92.30	94.60	87.20	98.70	93.70	105.00	134.70
Eu	0.36	0.37	0.52	0.38	0.33	0.30	0.44
Gd	3.78	3.89	3.55	3.41	2.93	4.98	4.61
Tb	0.75	0.75	0.65	0.71	0.62	1.15	0.98
Dy	4.66	4.75	3.85	4.64	3.97	8.14	6.34
Y	23.98	24.13	20.86	24.28	20.82	45.22	32.71
Ho	0.82	0.83	0.71	0.86	0.72	1.58	1.14
Er	2.36	2.40	2.06	2.55	2.04	4.66	3.20
Tm	0.37	0.37	0.35	0.41	0.33	0.74	0.50
Yb	2.42	2.49	2.21	2.71	2.23	4.88	3.06
Lu	0.32	0.34	0.31	0.37	0.30	0.68	0.42
S	132	90.6	207.6	43.3	92.4	500	54.6
Sc	5.56	5.79	5.84	6.26	5.41	3.98	6.28
Se	0.04	0.05	0.11	0.04	0.04	0.07	0.04
Sn	47.8	76.96	12.69	15.35	11.15	18.85	19.11
Te	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
V	17.2	16.4	23.9	18.1	15.3	7.9	17.2
W	11.93	10.4	11.31	8.43	7.01	4.48	2.73
Zn	58.7	100.7	44.17	43.37	161.5	1263.02	87.97
Bi	0.48	0.9	8.3	0.73	0.49	0.56	0.25
Co	2.12	1.82	3.37	2.54	2.12	1.88	2.27
Cr	8.3	7	12.7	10	10.6	6.6	11.4
Cs	26.27	55.47	14.05	22.48	14.48	10.63	6.04
Ga	20.69	21	22.38	20.14	17.83	16.45	14.84
Hf	4.16	4.16	4.91	3.63	3.5	4.21	5.68
In	0.42	0.42	0.15	0.13	0.1	0.49	0.15
ΣREE	90.65	95.6	93.53	85.69	71.23	103.89	110.91
ΣLREE/ΣHREE	4.86	5.04	5.83	4.47	4.42	2.87	4.48
δEu	0.29	0.29	0.44	0.36	0.36	0.2	0.3
(La/Yb) _N	4.82	4.97	5.5	4.31	4.36	2.43	4.7
(La/Sm) _N	2.87	2.92	2.98	3.369	3.3	2.59	3.06
(Gd/Yb) _N	1.29	1.29	1.33	1.04	1.09	0.84	1.24

注:A/CNK=摩尔 Al₂O₃/(Ca+Na₂O+K₂O),A/NK=摩尔 Al₂O₃/(Na₂O+K₂O);TFe₂O₃ 是以 Fe₂O₃ 表示的全铁含量,TFeO=0.9*Fe₂O₃。

岗岩投点散落范围比较均一,较为集中的落入过铝质区内。根据 Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)值判定 Al₂O₃ 的饱和度,样品的 A/CNK 值为 1.01~1.14,说明该片麻状花岗岩为过铝质。

3.2 微量元素及稀土元素

根据微量元素分析结果(表 1),绘制成片麻状花岗岩微量元素原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4a),由图可见,大离子亲石元素 Rb、K 相对富集,Ba、Sr 亏损明显;高场强元素 Th、U、Hf 相对富集,Zr、Ti、Nb 亏损。

由老城坡片麻状花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 4b)可见,其 ΣLREE/ΣHREE 值为 2.87~7.91,平均 4.99,均大于 1,比值较大,表明随着岩浆作用的演化,ΣLREE 在岩浆作用晚期富集,ΣHREE 亏损,表明轻稀土与重稀土具有一定的分异作用;稀土配分曲线斜率(La/Yb)_N 值为 2.43~7.91,平均 4.88。曲线整体呈现弱右倾斜配分模式(图 4b),显示轻稀土较为富集;(La/Sm)_N 值为 2.59~4.74,平均 3.23,均大于 1;(Gd/Yb)_N 值为 0.84~1.33,平均 1.17,表明轻稀土元素之间具有一定的分馏程度,且轻稀土元素(LREE)较为富集;稀土元素总的分布规律呈比较明显的右倾“V”型。δEu 值为 0.20~0.44,平均 0.36,显示中等偏高的负 Eu 异常。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

采用激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)对样品 ZK40-1b8 进行锆石 U-Pb 法对其定年。样品中的锆石大部分呈透明自形的短柱状、柱状,晶面整洁光滑,无包体,粒度 100~200 μm,长宽比一般为 1:2,个别可达 1:3。锆石阴极发光图像显示锆石大多由继承性锆石构成的核和后期生长的边组成(图 5),内核呈次圆状、形态不规则(图 5、图 6)。锆石边多数围绕内核呈环带状生长,结晶边完整,韵律环带清晰,仍显示出岩浆锆石特点。一般,岩浆锆石的 Th、U 含量较高,Th/U 值较大(通常大于 0.4)(吴元保和郑永飞,2004),但依然存在一些 Th/U 值非常低(<0.1)的岩浆锆石(Hidaka and Shimizu,2002),所以不能仅凭 Th/U 值判断岩浆锆石和变质锆石。

对 ZK40-1b8 样品中锆石核部和边部进行了 24 颗锆石 26 个点(图 5)的 U-Pb 同位素测试分析,结果见表 2。由结果可见,这些测点年龄可以分为 3 组:锆石结晶年龄、锆石变质年龄和捕获锆石年龄。15 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 409~418 Ma,变化范围很小,用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 值年龄进行加权平均(图

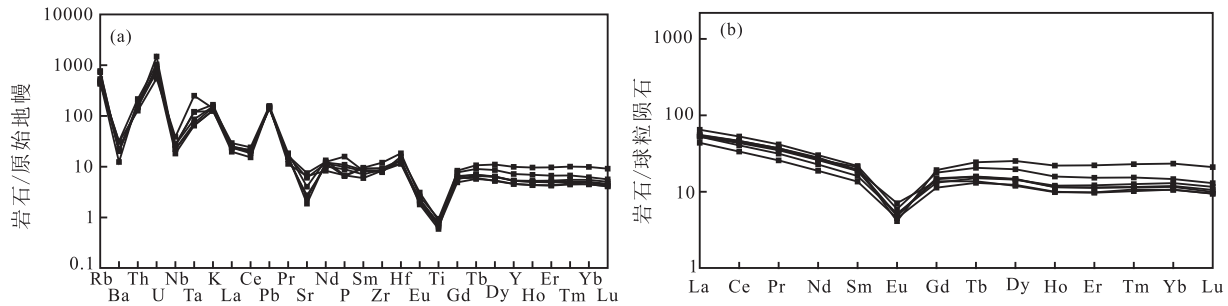


图4 老城坡片麻状花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)(底图据 Sun 和 McDonough, 1989) 和稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(b)(底图据 Boyntone, 1984)

Fig.4 Primitive-mantle normalized spider-gram for the Laochengpo gneissic granite (a) (modified after Sun and McDonough, 1989), and Chondrite-normalized REE patterns for the the Laochengpo gneissic granite (b) (modified after Boynton, 1984)

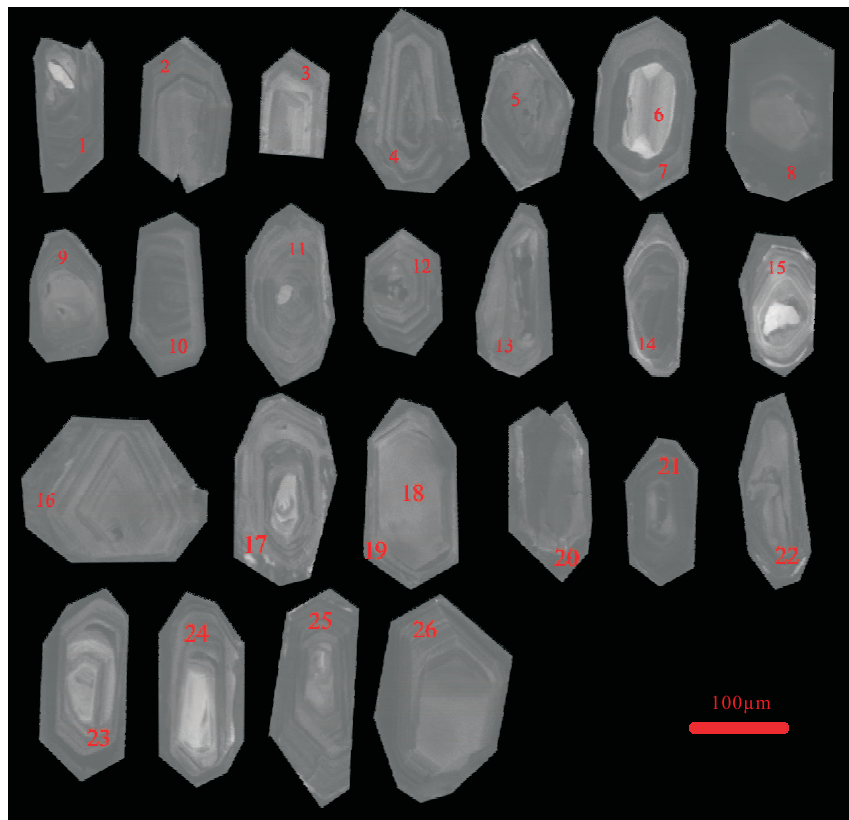


图5 老城坡片麻状花岗岩(ZK40-1b8)锆石阴极发光图像

Fig.5 Cathodoluminescence images of zircons from the Zk40-1b8 Laochengpo gneissic granite

6b), 计算所得的平均年龄为 415.4 ± 5.2 Ma ($n = 15$, MSWD=0.062)。在谐和图上, 测点都相对集中分布于谐和线上及其附近, 可信度高, 代表了锆石结晶年龄(图 6a); 锆石 5 个测点年龄为 394 ~ 400 Ma (表 2), 为 397.2 ± 2.2 Ma ($n = 5$, MSWD=0.74), Th/U 均小于 0.1, 可能代表后期地质热事件的改造时代; 锆石 5 个测点年龄为 427 ~ 460 Ma (表 2), 这些较老年龄可能为岩浆上涌时所捕获的锆石年龄; 锆石核部的 1 个测点年龄为 716 Ma (表 2, 图 5, 图 6), Th/U=0.52, 据推测可能为元古代岩浆结晶年龄。

4 讨论

4.1 岩体形成时代

华南地区大量加里东期花岗岩的测年数据显示, 岩浆锆石 U-Pb 年龄为 480 ~ 390 Ma, 高峰期为 430 ~ 400 Ma, 大多数为过铝质 S 型花岗岩(舒良树, 2006)。

本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得了老城坡片麻状花岗岩样品所得的平均年龄为 415.4 ± 5.2 Ma。由此推断, 该岩体侵位于 415 Ma 左右, 为早古生代晚志留世期间发生的一期大规模岩浆作

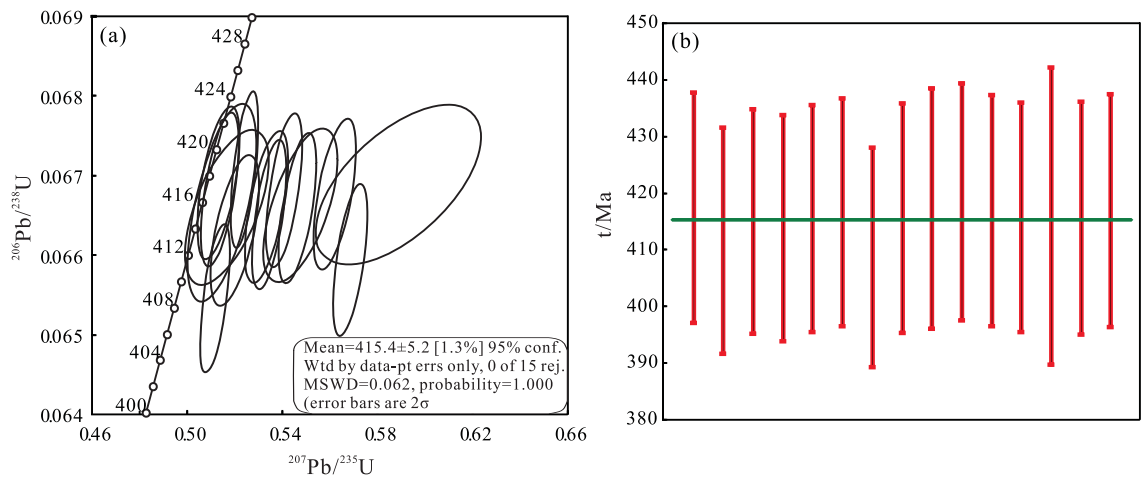


图 6 ZK40-1b8 的 LA-ICP-MS 法锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图 (b)

Fig.6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (a) and zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagram (b) of ZK40-1b8

表 2 老城坡片麻状花岗岩锆石 U-Pb 定年数据

Table 2 U-Pb dating results of zircons from the Laochengpo gneissic granite

测点号	含量/ $\times 10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
ZK40-1b8-1	31	453	0.0687	0.0566	0.0004	0.5662	0.0036	0.0725	0.0004	456	3	451	3
ZK40-1b8-2	22	325	0.0676	0.0569	0.0005	0.5634	0.0048	0.0718	0.0004	454	4	447	3
ZK40-1b8-3	11	183	0.0980	0.0600	0.0009	0.5221	0.0078	0.0631	0.0004	427	6	394	3
ZK40-1b8-4	20	286	0.0875	0.0568	0.0006	0.5800	0.0057	0.0740	0.0004	464	5	460	3
ZK40-1b8-5	16	239	0.1129	0.0569	0.0006	0.5545	0.0053	0.0707	0.0004	448	4	440	3
ZK40-1b8-6	13	101	0.5198	0.0635	0.0007	1.0283	0.0112	0.1174	0.0007	718	8	716	4
ZK40-1b8-7	23	359	0.0766	0.0556	0.0004	0.5131	0.0036	0.0669	0.0004	421	3	418	2
ZK40-1b8-8	85	1330	0.0470	0.0562	0.0003	0.5303	0.0020	0.0684	0.0004	432	2	427	2
ZK40-1b8-9	41	635	0.1540	0.0625	0.0004	0.5685	0.0030	0.0660	0.0004	457	2	412	2
ZK40-1b8-10	47	747	0.0742	0.0583	0.0004	0.5346	0.0030	0.0665	0.0004	435	2	415	2
ZK40-1b8-11	23	360	0.0913	0.0569	0.0005	0.5200	0.0041	0.0663	0.0004	425	3	414	2
ZK40-1b8-12	30	458	0.2005	0.0595	0.0004	0.5465	0.0033	0.0666	0.0004	443	3	416	2
ZK40-1b8-13	29	438	0.2249	0.0610	0.0005	0.5621	0.0037	0.0668	0.0004	453	3	417	2
ZK40-1b8-14	44	713	0.0534	0.0567	0.0004	0.5116	0.0026	0.0655	0.0004	420	2	409	2
ZK40-1b8-15	20	328	0.0667	0.0580	0.0006	0.5077	0.0052	0.0635	0.0004	417	4	397	2
ZK40-1b8-16	24	399	0.0791	0.0587	0.0008	0.5181	0.0070	0.0640	0.0004	424	6	400	2
ZK40-1b8-17	33	518	0.1050	0.0581	0.0005	0.5335	0.0037	0.0666	0.0004	434	3	416	2
ZK40-1b8-18	10	145	0.2061	0.0638	0.0016	0.5887	0.0142	0.0669	0.0004	470	11	417	3
ZK40-1b8-19	29	484	0.0729	0.0568	0.0005	0.4951	0.0045	0.0633	0.0005	408	4	395	3
ZK40-1b8-20	17	291	0.0726	0.0548	0.0012	0.4796	0.0107	0.0635	0.0004	398	9	397	2
ZK40-1b8-21	54	857	0.0878	0.0566	0.0003	0.5240	0.0024	0.0671	0.0004	428	2	419	3
ZK40-1b8-22	43	670	0.1154	0.0587	0.0004	0.5407	0.0032	0.0668	0.0004	439	3	417	2
ZK40-1b8-23	24	375	0.1442	0.0596	0.0007	0.5475	0.0063	0.0666	0.0004	443	5	416	2
ZK40-1b8-24	23	370	0.0651	0.0560	0.0007	0.5146	0.0059	0.0667	0.0005	422	5	416	3
ZK40-1b8-25	31	493	0.0842	0.0562	0.0007	0.5166	0.0072	0.0666	0.0004	423	6	416	2
ZK40-1b8-26	29	459	0.0828	0.0558	0.0004	0.5138	0.0033	0.0668	0.0004	421	3	417	2

用的产物。

Yan 等(2006)通过锆石 U-Pb 测年获得两组都龙花岗质片麻岩的结晶年龄: 799 ± 10 Ma 和 402 ± 10 Ma。郭利果(2006)在本地区所测老城坡单元 DN4123 (417 Ma) 亦属于同一时代。与 Roger 等(2000)在 Song Chay 变质热穹窿测得 U-Pb 锆石年龄(428 Ma)、Li 等(1989)和 Li(1994)在诸广山岩基获得的 U-Pb 年龄(427 Ma、434 Ma), 以及华南褶皱带众多加里东岩基年龄相一致。由此说明加里东期岩浆作用在滇东南地区表现明显。

岩相学特征显示该样品具花岗岩性质, 定向云母矿物是受后期构造运动而成(图 2)。研究学者通过 Ar-Ar 年代学方法从 Song Chay 穹窿片麻状花岗岩中云母类矿物获得 165~236 Ma 的年龄(Maluski *et al.*, 2001; Roger *et al.*, 2000), 亦代表了属于 Song Chay 穹窿的滇东南老君山地区片麻状花岗岩变质矿物形成的封闭年龄, 这些年龄纪录了印支期和燕山期构造变质事件, 因此可以认为片麻状花岗岩中云母类矿物均形成于加里东期, 而其定向性是受印支运动和燕山运动改造而成。

4.2 岩石成因

老城坡片麻状花岗岩的 SiO_2 含量为 73.48%~77.16%, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.01~1.14(均值为 1.08), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.99~1.75(平均 1.30)(表 1); 岩体中含有白云母、石榴子石等富铝矿物, 镜下岩相学特征显示该片麻状花岗岩为 S 型花岗岩(图 2); 在花岗岩 ACF 图解判别图解中均落入了 S 型花岗岩中(图 7)。ZK40-1b5 至 ZK40-1b8 的 A/CNK 值均小于 1.1, 数据显示出岩体具有 I 型花岗岩特征, 推断可能为大量地壳物质中混染地幔物质而成。老城坡单元样品微量元素标准化蛛网图(图 6a)具有大离子亲石元素 K、Rb 相对富集, Ba、Sr 亏损明显, 并在 Ba 处形成比较明显的谷; 高场强元素 Th、

U、Hf 相对富集, Ti、Nb 亏损, 其中 Ti 强烈亏损, 与上部地壳分布特征极为相似, 说明原岩可能来自上地壳物质。

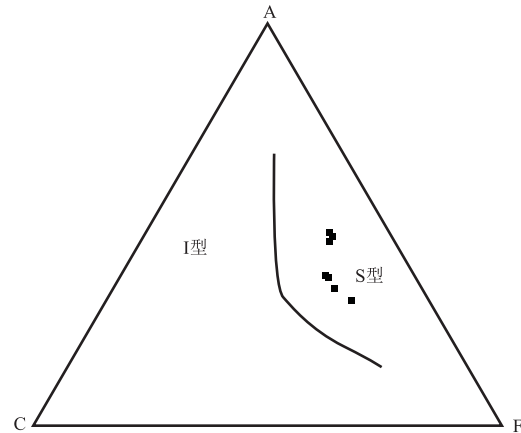


图 7 老城坡花岗岩类 ACF 图解

($A = \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$, $C = \text{CaO}$, $F = \text{FeO} + \text{MgO}$)

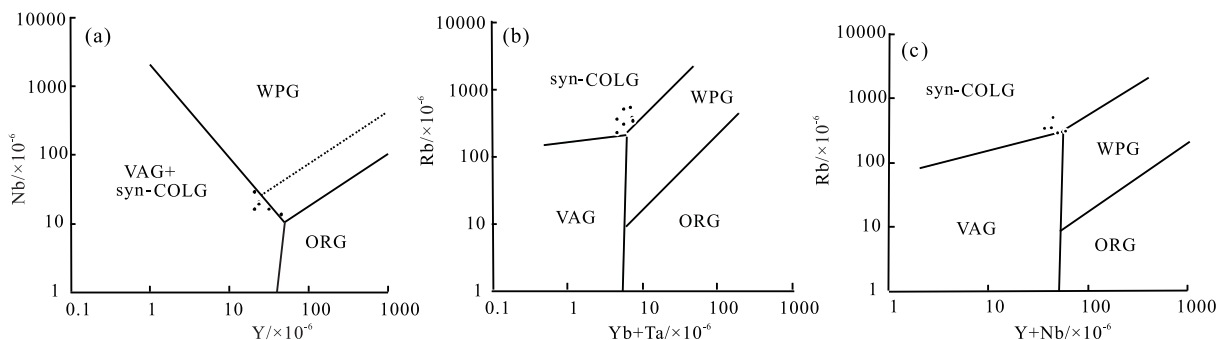
Fig.7 ACF diagram of granites from the Laochengpo

($A = \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$, $C = \text{CaO}$, $F = \text{FeO} + \text{MgO}$)

4.3 构造环境判别及演化

火成岩中的微量元素也可以起到很好的示踪作用, 对其成因环境的判别有特殊意义。在 Y-Nb, Yb+Ta-Rb 及 Y+Nb-Rb 判别图解(图 8)中, 投影点均落在火山岛弧带和同碰撞造山带区域内。说明该片麻状花岗岩形成于碰撞造山的环境中。在 Rb-Hf-Ta 图解(图 9)中, 投点大部分落在碰撞环境中, 少部分点落于碰撞后环境。可能是由于大量地壳物质中混染地幔物质, 即加里东期之前形成的中-基性岩与上地壳物质部分熔融的产物。

滇东南地区的地质演化可以追溯到 Rodinia 超大陆聚合和裂解事件。很多学者认为扬子陆块和华夏陆块属于中元古代 Rodinia 超大陆, 大量著作论述关于此超大陆的聚合和裂解的过程(Li *et al.*,



VAG-火山岛弧带; syn-COLG-同碰撞造山带; ORG-洋脊花岗岩; WPG-板内环境

图 8 老城坡片麻状花岗岩 Y-Nb, (Yb+Ta)-Rb, (Y+Nb)-Rb 图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984 修改)

Fig.8 Diagrams of Y-Nb, (Yb+Ta)-Rb, (Y+Nb)-Rb of the Laochengpo gneissic granite (modified after Pearce *et al.*, 1984)

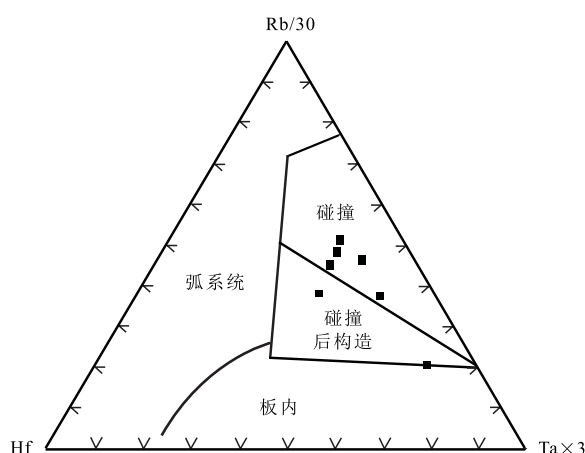


图9 不同构造背景下花岗岩的 Rb-Hf-Ta 图解

(底图据 Harris *et al.*, 1986)

Fig.9 Rb-Hf-Ta diagram showing fields of granites from various tectonic settings(modified after Harris *et al.*, 1986)

2003;Li *et al.*, 2002, 2003;Li *et al.*, 2005)。舒良树(2006)认为 Rodinia 超大陆在 800~900 Ma 发生裂解,原华夏地块被分成云开大山、浙南—闽北和赣中—赣南 3 个古陆残块。吴浩若(2000)通过古沉积相特征将广西分为西北部的桂滇—北越地块、东北部的扬子地块和南部的云块地块,大明山—大瑶山地体。他们所提及的云开地区在加里东期存在明显的隆起现象(莫柱孙,1994),这与当时华南加里东运动总体存在由南向北挤压的特点有关(丘元禧等,1992;1996)。加里东期云开大山区出现岛弧火山岩,在台山地区发育少量的岛弧火山岩(开平马山)和岛弧花岗岩(台山龙塘岩体)以及大量的 S 型陆壳改造型的花岗质岩石,构成成对花岗岩带(丘元禧,1992)。

吴浩若(2000)认为在古生代时桂滇—北越地块可能为一个较大的地块,南部的北越地块核部为“斋江隆起”(Song Chay dome)。其由元古界变质杂岩组成,沉积盖层为中上寒武统和少量下奥陶统碳酸盐岩和碎屑岩互层,产状平缓,含三叶虫和腕足类化石(Tran Van Tri, 1973; Phan Cu Tien, 1991)。地层发育和桂滇地块很相似(吴浩若,2000)。在广西运动期间,扬子板块受到一是来自南部云开地块和桂滇—北越地块,二是来自南东向华夏地块两个方向的挤压碰撞(吴浩若,2000;万天丰,2006)。南部收缩效应造成的结果是广西大明山、大瑶山地区东西向的寒武系褶皱以及黔中背斜、乌当—二比向斜为代表的东西向构造带;南东向收缩效应的结果则是桂北元宝山、越城岭地区及湘赣边境地区北东—北北东向的早古生代地层的褶皱还有贵州中东部以

麻江背斜为代表的南北向构造带(陈旭,2001;郝义等,2010;邓新等,2010)。

综上所述,在华南加里东期的确存在一个由南向北方向的强烈运动,导致桂滇—北越地体、云开地体和扬子板块共同作用而发生造山运动和岩浆作用——在志留系晚期,受广西运动影响,老城坡岩体侵位于华南褶皱带。

5 结论

(1)老城坡岩体定名为中细粒片麻状花岗岩,位于 Song Chay 穹隆北部,与穹隆中部花岗岩构造结构相似、形成时代基本相同,为穹隆重要组成部分。

(2)老城坡岩体属于高钾钙碱性系列,富硅、全碱含量较高、过铝质,总体具有 S 型花岗岩特征,少部分数据显示具有 I 型花岗岩的特点,表明岩浆源岩可能来自于早期大部分地壳物质混染地幔物质而后部分熔融的产物。

(3)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年确定老城坡片麻状花岗岩的形成年龄为 415.4 ± 5.2 Ma,属晚志留纪岩浆侵入的产物。

(4)老城坡岩体形成于同碰撞环境,广西运动发生时,云开地体与桂滇—北越地体相互作用,导致岩浆侵位于华南褶皱带。

致谢:研究工作得到云南文山州委、州政府,麻栗坡县委、县政府,文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司、文山州紫金钨业集团院士工作站的大力支持,游振东教授在文章撰写过程中提出了修改意见,在此一并谢意。

参考文献 (References):

- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; Meteoric studies. *Rare Earth Element Geochemistry*: 63-114
- Harris N B W, Peacre J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Reis A C (eds). *Collision tectonics*. Special Publications Geological Society Lond, 19: 67-81
- Hidaka, Shimizu. 2002. U-Pb geochronology and REE geochemistry of zircons from Palaeoproterozoic paragneiss clasts in the Mesozoic Kamiaso conglomerate, central Japan: Evidence for an Archean provenance. *Chemical Geology*, 187(3): 279-293
- Lepvrier C, Van Vuong, Maluski H, Truong Thi, Van Vu. 2008. Indosinian tectonics in Vietnam. *Comptes Rendus Geoscience*, 340: 94-111

- LI X, Tatsumoto M, Premo W R. 1989. Age and origin of the Tanghu granite, southeast China: Results from U/Pb single zircon and Nd isotopes. *Geology*, 17: 395–399
- Li Z X, Li X H, Zhou H W, Kinny P D. 2002. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30: 163–166
- Li W X, Li X H, Li Z X. 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. *Precambrian Research*, 136: 51–66
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122: 85–109
- Li X A. 1994. Comprehensive U/Pb Sm/Nd Rb/Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study on Guidong granodiorite, Southeast China: Records of multiple tectonothermal events in a single pluton. *Chemical Geology*, 115: 283–295
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Dele G, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34–43
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex version 2.49: Ageochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 1–56
- Maluski H, Lepvrie C, Jolivet L, Carter A, Roques D, Beyssac O, Tang T T, Thang N D, Avigad D. 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chaymassif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in Northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 233–248
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643
- Nam T N, Toriumi M, Sano Y, Terada K, Thang T T. 2003. 2. 9, 2. 36, and 1. 96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Vietnam: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 743–753
- Peaere J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956–983
- Phan C T. 1991. Geology of Cambodia, Laos and Vietnam: Explanatory note to the geological map of Cambodia, Laos and Vietnam at 1:1,000,000 scale. Geological Survey of Vietnam
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247–263
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, Marc J, Robin L, Phan T T, Maurice B, Diane S. 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321: 449–466
- Gao S, Liu X M, Yuan H L, Bodo Hattendorf, Detlef Günther, Chen L, Hu S H. 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS. *Geostandard Newsletter*, 22: 181–195
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publications*, 42(1): 313–345
- Tran Van Tri. 1973. Geological Map of Vietnam (The North Part), 1:1000000. Geological Research Expedition, No. 45
- Yan D P, Zhou M F, Wang C Y, Xia B. 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 332–353
- 邓新, 杨坤光, 刘彦良, 余振兵. 2010. 黔中隆起性质及其构造演化. *地质前缘*, 17(3): 79–89
- 陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 张元动, 詹仁斌, 刘建波, 樊隽轩. 2001. 上扬子区奥陶-志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. *科学通报*, 46(12): 1052–1056
- 郭利果. 2006. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究. 北京: 中国科学院研究生院
- 郝义, 李三忠, 金宠, 戴黎明, 刘博, 刘丽萍, 刘鑫. 2010. 湘赣桂地区加里东期构造变形特征及成因分析. *大地构造与成矿学*, 34: 166–180
- 莫柱孙. 1994. 论云开隆起区的再生矿床: 区域地质与矿床成因一例. *广东地质*, 9: 22–27
- 丘元禧, 马文璞, 范小林, 张渝昌, 邓家瑞, 夏亮辉, 张旭亮. 1996. “雪峰古陆”加里东期的构造性质和构造演化. *中国区域地质*, 15: 150–160
- 丘元禧. 1992. 广东省区域构造演化及其基本特征. *广东地质*, 7: 1–26
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. *高校地质学报*, 12(4): 418–431
- 万天丰. 2006. 中国大陆早古生代构造演化. *地质前缘*, 13(6): 30–42
- 吴浩若. 2000. 广西加里东运动构造古地理问题. *古地理学报*, 2(1): 70–76
- 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
- 云南省地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队. 1999. 中华人民共和国地质图说明书(1:5万)都龙幅\麻栗坡县幅
- 云南省地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队. 2010. 中华人民共和国云南省麻栗坡县地质矿产图(1:5万)

(本文责任编辑: 龚超颖)