西大别芳畈花岗岩锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及其构造意义

武昱东¹⁾,王宗起¹⁾,刘成新²⁾,贾少华¹⁾,张玉涛¹⁾,吴波²⁾,王刚¹⁾

1) 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037;
 2) 湖北省地质调查院,武汉,430034

内容提要:本文通过对西大别大悟芳畈地区黑云母花岗岩和石英正长岩花岗岩两种岩体的地球化学分析及 U-Pb 同位素测试,得到如下认识:黑云母花岗岩和石英正长岩花岗岩总体特征相似,主量元素表现为高 SiO₂(平均 77.2%)、过铝质(A/CNK 指数在 1.03~1.13),碱度率在 5.43~7.23,属碱性系列;ΣREE 平均 62.4×10⁻⁶,(Ce/ Yb)_N均值为 0.67,(La/Yb)_N均值为 0.97,呈现平缓仅 Eu 亏损(δEu 均值 0.20)的"海鸥型";大离子亲石元素 Rb、 Th、U、K 等相对富集,高场强元素 Nb、Ta、Sr、Ti 等呈明显的负异常,说明岩浆源岩以陆壳成分为主;Ga/Al 均值为 3.16,Zr+Nb+Ce+Y 均值为 578;锆石饱和温度为 833~877℃,稀土元素饱和浓度温度为 773~862℃,表明初始 岩浆温度较高。上述特征说明,芳畈花岗岩为典型的 A 型花岗岩,形成于中上地壳的板内伸展背景。用 LA-ICP-MS 测得的黑云母花岗岩中锆石的 U-Pb 年龄为 773.0±1.6 Ma(MSWD=0.96,n=33),石英正长花岗岩形成的年 龄为 759.8±2.3 Ma(MSWD=1.6,n=28),表明其形成于新元古代洋陆俯冲的构造背景,是这一时期大陆边缘弧 岩浆作用的产物。芳畈花岗岩体形成时代早于其外围地层,是经后期构造改造形成的混杂岩带,其岩浆作用与岩 体外围的铜成矿作用无直接联系。

关键词:芳畈花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;西大别;扬子北缘;芳畈铜矿

桐柏-大别构造带是中央造山带的重要组成部 分,夹持于北秦岭-北淮阳构造带和扬子板块北缘花 山-大别南缘构造带之间,记录了华北地块和扬子地 块汇聚拼合碰撞的历史。它不仅是研究和了解中国 大陆地质构造演化的关键地段,而且蕴藏着丰富的 多金属矿床,因而成为国内外地球科学领域长期关 注的重要区域(Mattauer et al., 1985; Xu Bei et al., 2007; Jiang et al., 2009; Xu Zhiqin et al., 2015a, 2015b,2016)。(新城)-芳畈-觅儿寺断裂是该造山 带南部的一条 NWW-SEE 走向的构造带,亦是该 区域金、银、铜、铅、锌等矿产的富集带(Yin Jiangning et al., 2016)。该构造带两侧变质程度有 差异,南西侧为绿片岩相或低绿片岩相变质,发育基 性岩(超基性岩)-碱性侵入岩;北东侧为角闪岩相--绿帘角闪岩相,广泛分布中一酸性花岗岩类。后者 一度被认为是具"I"型花岗岩成分特点的同构造侵 入岩,它们代表着深部重熔型花岗岩的结构演化特 点,形成于扬子陆块与华北陆块的碰撞背景。因此 研究该区域侵入岩的形成时代和构造背景,对于确 立和约束该构造带的性质以及桐柏-大别构造带晚 古生代至中生代的大地构造属性具有重要的意义。

芳畈镇芳畈侵入体是上述的中一酸性侵入岩之 一,中南冶勘 604 队在该岩体中所采 K-Ar 法同位 素样品结果为 0.96 Ma、0.80 Ma、0.94 Ma,认为其 为燕山晚期第三次侵入到大理岩围岩中,导致砂卡 岩型铜矿化[•]。Zhou Xin(2009)对芳畈铜多金属矿 床的地质背景及主要地质特征进行了研究,认为该 岩体由扬子期侵入岩(为中粗粒黑云二长花岗岩)和 燕山期侵入岩(斑状石英正长岩)组成,判断其矿床 成因类型属中低温热液充填交代型,与燕山期碱性 岩浆后期热液活动有关。值得一提的是,1987 年湖 北省鄂东北地质大队对其产状岩相特征、结构构造 以及所受变质作用进行分析,认为它"并非是燕山 中一晚期侵入者,而应是元古宙海底火山喷发、伴随 的碱性、偏碱性次火山岩侵入体"[•]。考虑到 K-Ar 法对同位素封闭体系的要求,元古宙和早古生代样

收稿日期:2015-08-11;改回日期:2015-11-04;责任编辑:周健。

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41402180)和国土资源部中国地质调查局项目(编号 12120113069000)资助的成果。

作者简介:武昱东,男,1982年生。博士,构造地质学专业。通讯地址:100037,北京市西城区百万庄大街 26号;Email: wuyudong@ cags.ac.cn。

品可能受到 K 和 Ar 自然扩散或后期变质、变形等 多因素扰动作用的影响,导致所得的结果和实际的 地质事件不符(Chen Yuelong et al.,2012);相对而 言,锆石具有较高的 U-Pb 同位素封闭温度(700~ 750°C)(Harrison et al.,1987;Tilton et al.,1991) 以及较强的抵抗热液扰动的能力(Mezger et al., 1997),更适用于古老岩体和矿物样品的年龄测定。 因此,采用锆石 U-Pb 同位素定年手段和地球化学 分析方法,重新厘定这些花岗岩形成的时代和地质 背景,不仅对于约束这些铜矿成矿的构造背景和下 一步找矿工作有着积极的作用,对研究桐柏-大别构 造带的地质演化亦有着重要的意义。

综上,本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素 年代学和地球化学分析方法,研究芳畈花岗岩岩体 的形成时代和地球化学特征,进而探讨其成因及构 造地质背景。

1 地质背景

芳畈地区区域上属秦岭-大别地层区扬子板块 北缘地层分区中的大悟-河口地层小区,前寒武纪变 质地层和古生代地层广泛分布,Peng Lianghong (2003)在该区域南部的双峰尖地区发现早古生代腕 足化石。区内断层构造发育,早期以发育北西向的 区域韧性断裂为特征,晚期以发育北东向的脆性断 裂为特征,对地层和早期断裂有截切作用。

区内出露地层主要为武当岩群二岩组、陡山沱 组、灯影组及公安寨组。河南省地质局(1981)将这 套围岩地层划为新元古代七角山群[€];彭练红等 (2003)将红安群解体并重新划分为新元古代青白口 纪武当(岩)群,南华纪耀岭河组,震旦纪陡山沱组、 灯影组及早古生代寒武系、奥陶系、志留系;其中,武 当岩群划分上下两岩组:一岩组主要为一套泥砂质、 砂质组合,下部为(含砾)厚层状砂质岩石,向上逐渐 变化为细砂质、粉砂质、钙泥灰质岩石;二岩组则以 中一酸性火山岩为主,夹少量基性侵入岩及碎屑沉 积岩组合,局部发育碳质、泥质岩石,上部发育少量 基性火山岩[●]:Zhou Xin(2009)沿用这一称谓,认为 芳畈花岗岩体的东部围岩为武当群二岩段,其岩石 组成主要包括绢云钠长片岩、绿泥钠长片岩、绿帘绿 泥钠长片岩,夹绢云石英片岩、大理岩,变质程度为 绿片岩相,原岩为中基性一中酸性火山凝灰岩夹碳 酸盐岩,是芳畈地区重要的矿源层和含矿层位。

区内侵入岩主要发育在芳畈的南西(图1),长 轴方向与区域构造一致,北西、南西方向均为断层与 震旦纪、新元古代地层接触,因受动力变质影响岩体 出现糜棱岩化或压碎现象。根据岩性和变质变形特 征可以划分为两类:

黑云母花岗岩:岩石呈肉红色一浅灰色,鳞片花 岗变晶结构、变余花岗结构,片麻状构造、眼球状构 造。岩体中包体发育,包体多呈长条透镜状,大小不 等,与岩体界面清楚;成分有黑云钠长片岩、二长片 岩、黑云片岩、黑云钠长角闪(片)岩等。

石英正长岩:分布在芳畈南西;Zhou Xin(2009) 认为岩体北东侧与绢云母石英片岩呈侵入接触,但 我们在芳畈水库一侧看到二者接触边界为构造接 触,接触边界强片理化;岩体南西侧与灯影组大理岩 呈断层接触,在花山村可以看到清楚的接触关系。 岩石呈肉红色,局部呈灰白色,似斑状结构,基质具 细粒结构、块状构造,局部具定向构造。

野外观测发现在芳畈镇西侧廖家塝附近该岩体 有良好出露,且露头特征表现为石英正长岩侵入到 黑云母花岗岩内,Zhou Xin(2009)亦认为石英正长 岩形成时代晚于前者。

2 样品采集及测试

黑云母花岗岩主要矿物成分为钾长石、斜长石、 石英,次为黑云母、白云母。眼球体为长英质矿物集 合体,云母围绕粒状矿物或长英质矿物集合体定向 分布。主要矿物成分为钾长石(37%~45%)、斜长 石(22%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~ 8%)等。岩体经历了韧性变形改造,粒状矿物压扁 拉长现象普遍,并可见长石旋转碎斑,矿物退变 明显。

石英正长岩主要由微斜长石(52%)、石英 (30%)组成,少量钠长石(5%)、绢云母(8%)、磁铁 矿、黄铁矿(2%~4%),斑晶成分以微斜长石为主 (3%~5%)。侵入体受构造变形改造,局部面状构 造发育。

我们分别采集了两种花岗岩用于地球化学分析,选择芳畈镇西侧廖家塝附近的黑云母花岗岩、石英正长岩进行锆石 U-Pb 同位素测试(图 1)。所选样品均采自新鲜露头(图 2a、b),采样岩体中均不含方解石、石英等后期脉体,确保没有外来热液影响到样品的地球化学特征;地球化学样品均不少于 1 kg,锆石测年样品不少于 5 kg。13DWJ01~13DWJ04 样品采自石英正长岩,13DWJ05、13FFB01~13FFB03 样品采自黑云母花岗岩。





Fig.1 Geologic sketch map of the study area and sample positions(after 1:250000 Geological Survey of Macheng City) 1-蛇绿混杂岩带;2-白垩纪花岗岩;3-晚古生代花岗岩;4-侏罗纪花岗岩;5-地层界线;6-断层;7-不整合界线;8-石英正长岩;9-黑 云母花岗岩;10-绢云钠长片岩;11-大理岩;12-铜矿(矿化点);13-本文取样点;Pt-元古字;Qb-青白口系;Z-震旦系;Pz₁-下古生界; D-泥盆系;K-Q-白垩系-第四系

1—Ophiolitic melange belt; 2—Cretaceous granites; 3—Late Paleozoic granites; 4—Jurassic granites; 5—stratigraphic boundary; 6—fault; 7—unconformable boundary line; 8—quarz-syenite; 9—biotite granite; 10—sericite-albite schist; 11—marble; 12—copper ore (mineralized); 13—sampling points; Pt—Algonkian; Qb—Qingbaikouan; Z—Sinian; Pz₁—Lower Paleozoic; D—Devonian; K—Q—Cretaceous-Quaternary

2.1 主量、微量与稀土元素测试

从芳畈花岗岩体采集两种花岗岩样品,经镜下 鉴定后,选择未蚀变的石英正长岩样品3件(13 DWJ2、13 DWJ3、13 DWJ4)、黑云母花岗岩样品3 件(13FFB01、13FFB02、13FFB03)进行地球化学分 析。将样品用刚玉瓷盘和玛瑙球磨机磨碎到200目 后,在中国地质科学院国家地质实验测试中心进行 主量元素和微量元素分析测试。主量元素采用荷兰 飞利浦 PW4400X 射线荧光光谱仪(XRF)进行测 试,微量元素采用等离子质谱仪(ICP-MS)进行测 试;数据处理和作图采用 PetroGraph 软件(Petrelli et al.,2005)与 geokit 软件(Lu Yuanfa,2004)。

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试

选择石英正长岩样品(13DWJ01)和黑云母花

岗岩样品(13DWJ05)进行锆石单矿物分选,分选工 作由河北省区域地质调查研究院实验室完成,即将 原岩样品破碎成粉末后手工淘洗,再在双目镜下挑 选出锆石晶体。岩石中锆石含量较高,粒径在70~ 150 μm,自形一半自形双锥长柱状,CL图像显示出 清晰的韵律环带,具岩浆成因特征。将锆石样品和 标样(TEM)一起用环氧树脂固定在样品靶上,制成 直径为25 mm、厚5 mm的样品靶,固化后打磨抛光 至露出一个光洁平面,不镀金(Song Biao et al., 2002)。锆石制靶和阴极荧光照相由北京锆年领航 科技有限公司完成(图3)。

结合透射、反射、阴极发光观测,选择晶形较好、 无包体的锆石 40 粒,进行同位素分析。测试工作在



(e)

图 2 芳畈花岗岩野外及镜下显微照片 Fig. 2 Outcrop pictures and photomicrograph of Fangfan granites (a)、(b)一芳畈花岗岩野外照片及素描;(c)、(e)一黑云母花岗岩(单偏光/正交偏光);(d)、(f)一石英正长岩(单偏光/正交偏光); Q-石英;Kp-钾长石;Pl-斜长石;Mi-微斜长石

(a),(b)—Outcrop pictures and geological sketch of Fangfan granites;
 (c),(d)—biotite granite (plane polarized light/perpendicular polarized light);
 (e),(f)—quartz syenite (plane polarized light/perpendicular polarized light);

Q-quartz; Kf-K-feldspar; Pl-plagioclase; Mi-microcline

中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作 用与资源评价重点实验室完成,采用 Neptune 型 MC-ICP-MS 及之配套的 Neww ave UP 213 激光剥 蚀系统。测试环境和采样方式见 Hou Kejun et al. (2007,2008),激光波长 213 nm,斑束直径 30 μ m, 频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm²,以 He 为载 气。激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析 前用锆石 GJ-1 进行仪器调试,使之达到最优状态,



图 3 芳畈花岗岩中锆石的阴极发光图像

Fig. 3 Cathode luminescence images and ages of zircon from Fangfan granites 图中圆圈表示测点位置,数字表示相应测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值(Ma) Circles represent location of the measuring points, numbers represent ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages (Ma)

锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以 锆石 M127 为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进 行校正,并测量一个锆石 Plesovice(Nasdala et al., 2008),观察仪器的状态以保证测试的精确度,详细 实验测试过程可参见 Hou Kejun et al.(2009)。分 析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成, 具体仪器和测试流程参数见 Liu Yongsheng et al. (2010a,2010b),年龄计算和成图采用 ISOPLOT (4.5)版软件(Ludwig, 2001)。

2.3 锆石饱和温度计算

由于花岗岩浆大多是绝热式上升就位的,那么岩 浆在早期结晶时的温度可以近似代表岩浆形成时的 温度(Wu Fuyuan et al.,2007)。锆石是花岗质岩浆 体系中较早结晶的副矿物,它通常被镁铁质矿物、长 英质矿物包裹,另外对温度非常敏感,而其他因素对 其没有明显的影响(Miller et al.,2003)。因此,可以 认为锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线 的温度(King et al.,1997)。锆石温度计算的方法有 两种:其一是锆石饱和温度计算(Watson et al., 1983),基本原理依据锆石中 Zr 的分配系数与温度之 间的相关性;第二是锆石的钛温度计(Watson et al., 2005),目前还较少有资料发表。

本文采用前者的方法,根据 Watson et al. (1983)从高温实验得出的锆石溶解度的模拟公式,

对芳畈花岗岩的形成温度进行估算:

 $\ln D^{2r(496000/melt)}$ +0.38+0.85(*M*-1)=12900/*T* 其中 Zr 分配系数 D_{zr} = 496000/ $D^{melt, Zr}$,(纯正锆石 Zr 含量为 496000×10⁻⁶, $D^{melt, Zr}$ 为熔体中的 Zr 含 量(×10⁻⁶),近似用全岩 Zr 含量测试结果代替);令 全岩岩石化学中 Si+Al+Fe+Mg+Ca+Na+K+ P=1(原子分数),则全岩岩石化学参数阳离子数量 比 *M*=(Na+K+2Ca)/(Al×Si),*T* 为绝对温度。

2.4 稀土元素饱和浓度温度

Montel (1986)和 Rapp et al. (1991)等通过实 验发现,独居石在长英质熔体中起重要的作用,控制 着微量元素(P、U、Th)和稀土元素(REE)的行为; 在变泥质岩的部分熔融中,独居石和熔体之间的化 学平衡取决于温度和熔体成分,控制着熔体的 LREE 的丰度。Rapp et al. (1991)通过实验证明, 独居石的溶解度与温度有强烈的正相关关系; Montel (1986)通过实验提出了LREE 在岩浆中饱 和浓度温度计:

 $\ln(REE_t) = 9.50 + 2.34D + 0.3879(H_2O)^{1/2}$

-13318/T

式中 $REE_i = \sum [REE_i (\times 10^{-6})/at \cdot weight(g/mol)], REE_i$ 从元素 La 到 Gd 再加上 Eu, T 为绝对 温度, H₂O 为重量百分含量, D 是阳离子含量的比 值, 由公式 D= (Na+K+Li+2Ca)/Al/(Al+Si) 来计算。

表 1 芳畈花岗岩主量元素(%)和微量元素(×10⁻⁶)分析结果表

Table 1 Major (%) and trace($\times 10^{-6}$) element compositions of the Fangfan granites

岩石类型		石英正长岩				
样号	13DWJ02	13DWJ03	13DWJ04	13FFB01	13FFB02	13FFB03
SiO_2	78.13	78.21	78.67	76.52	78.43	77.67
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	12.08	12.09	11.80	12.06	11.32	11.70
CaO	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	0.60	0.08	0.10	0.33	0.04	0.32
FeO	0.09	0.09	0.08	0.21	0.28	0.15
K_2O	5.69	5.56	5.13	6.13	6.18	6.1
MgO	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06
MnO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03
Na_2O	2.68	3.17	3.38	3.03	2.16	2.81
P_2O_5	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TiO_2	0.17	0.14	0.14	0.15	0.14	0.12
烧失量	0.74	0.70	0.68	0.57	0.67	0.5
总量	100.35	100.17	100.10	99.77	100.18	100.06
FeOT	4.26	5.26	6.26	6.26	6.26	6.26
K ₂ O/Na ₂ O	2.12	1.75	1.52	2.02	2.86	2.17
A/NK	1.14	1.07	1.06	1.04	1.10	1.04
A/CNK	1.13	1.06	1.05	1.03	1.09	1.03
碱度率(AR)	5.43	6.11	6,08	7.19	6.49	7. 23
- (Ab)	20.02	24.23	27.12	25. 22	17.73	23. 32
(Or)	33.68	32 95	30 44	36.71	36.96	36.36
石茧(Ou)	42 51	40.34	40.56	36.32	43.02	38 63
石央(Qu) 分量指数(DI) *	96.21	97.52	98.12	98.25	97 71	98 31
P%	8 00	13 12	17 52	12 60	3 95	10.59
A %	45 70	44 06	40.04	49.33	50 74	49.09
A%	42 51	40.34	40.56	36 32	43.02	38 63
₹270 Ti	1 38	1 36	1.04	0.75	43.02	1 65
Ba	0.87	1.30	1.04	0.86	1.23	0.07
De Cr	2.66	2.2	2.47	0.00	0.58	0.37
Mn	7 20	5.5	4 15	0.5	6.71	6.08
Co	0.1	0.00	4.15	4.0	0.71	0.08
Ni	2.76	1.97	1.20	0.05	0.20	0.16
Cu	1.45	1.07	1.05	1.40	2.06	2.57
Zn	2.65	2.07	1.5	2.05	3.00	6.67
ZII Ca	2.03	18 7	1.70	21 1	20.4	10.2
Ga	120	10.7	10.4	21.1	20.4	19.2
KD Se	139	125	120	139	140	101
SI C-	24.7	24.5	20.0	12.9	12.3	12.3
Cs P-	0.000	0.00	216	260	200	415
Da	200	293	510	200	509	415
	0.84	0.85	0.84	0.94	0.98	0.8
Pb D:	7.13	6.65	6.18	5.56	12.1	8.74
BI	0.34	0.16	0.45	< 0.05	0.08	<0.05
l h	9.16	8.99	8.45	7.97	19.3	11.6
U	1.675	1.62	2.09	1.23	2.49	1. 23
Nb	22.4	19.8	21.7	24.9	32.3	21.9
Ta	1.78	1.65	1.67	1.73	2.5	1.64
Zr	453	474	485	458	743	435
Ht	15.2	15.7	15.1	14.3	25.2	14.6
Sn	5.74	7.13	6.41	3.56	4.72	2.86
Sb	0.33	0.22	0.21	0.1	0.12	0.15
Ti	753	780	767	822	810	652
W	0.36	0.34	0.08	0.78	0.91	0.48
As	1.41	1.02	1.23	0.55	0.26	2.22

续表 1

岩石类型		石英正长岩			黑云母花岗岩							
样号	13DWJ02	13DWJ03	13DWJ04	13FFB01	13FFB02	13FFB03						
V	2.24	1.82	1.76	1.49	1.71	2.13						
La	7.72	7.35	9.31	9.8	12.5	4.01						
Ce	12.4	13.1	15.3	12.4	33.6	6.98						
Pr	1.67	1.84	2.31	2.1	3.23	0.97						
Nd	6.54	6.8	8.49	7.97	14.3	4.16						
Sm	2.23	2.03	2.46	2.16	4.28	1.72						
Eu	0.2	0.21	0.24	0.27	0.43	0.24						
Gd	4.63	4.32	4.67	3.71	5.67	3.42						
Tb	0.975	1.01	1.06	1.16	1.3	1.01						
Dy	8.4	8.06	8.06	9.05	9.05	7.6						
Ho	2.3	1.65	1.7	2.09	2.13	1.78						
Er	6.75	5.4	5.09	5.96	6.92	5.25						
Tm	0.98	0.79	0.73	1.01	1.39	0.94						
Yb	6.76	5.40	4.80	6.06	9.28	5.58						
Lu	0.97	0.75	0.69	0.87	1.42	0.85						
Y	1.27	0.83	0.75	62.4	62.9	56.3						
ΣREE	62.53	58.71	64.91	55.84	94.65	41.52						
ΣLREE	30.76	31.33	38.11	28.61	61.51	17.49						
∑HREE	31.77	27.38	26.8	27.23	33.14	24.03						
$\Sigma LREE / \Sigma HREE$	0.97	1.14	1.42	1.05	1.86	0.73						
δEu	0.16	0.18	0.18	0.21	0.23	0.23						
δCe	0.85	0.87	0.81	0.67	1.30	0.87						
$(Ce/Yb)_N$	0.51	0.67	0.89	0.57	1.01	0.35						
(La/Yb) _N	0.82	0.98	1.39	1.16	0.97	0.35						
$Ga/Al(imes 10^4)$	3.28	2.92	2.95	3.30	3.40	3.10						
Zr + Nb + Ce + Y	489	508	523	558	872	520						

注:8Eu=Eu_N/(Sm_N+Gd_N)^{1/2};8Ce=Ce_N/(La_N+Pr_N)^{1/2};(Ce/Yb)_N与(La/Yb)_N为球粒陨石标准化后的比值。

3 测试结果与分析

3.1 主量元素特征

芳畈花岗岩两种岩体主量元素分析结果列于表 1。结果显示花岗岩具有高硅、富铝、富碱、低镁、贫钙 的特征。SiO₂和 A1₂O₃含量范围分别为 74.63%~ 78.67% (平均 77.2%)、11.3% ~ 12.3% (平均 11.8%); Na, O+K, O含量为8.17%~9.16%(平均 8.61%),K2O/Na2O比值在1.40~2.86之间(平均 1.98); MgO、CaO 和 Fe₂ O₃ 含量分别为 0.05%~ 0.06%、0.06%~0.07%、0.08%~0.60%; P₂O₅含量 低,全部小于 0.1%。当 SiO₂ 在<42%或>70%时, 里特曼指数(Wright,1969)σ值误差相对高,宜用碱度 率(alkalinity ratio, AR)(Wright, 1969)进行判别,各样 品 AR 值分布在 5.43~7.23,总体属于碱性系列。用 Geokit 软件(Lu Yuanfa, 2004)获得分异指数 (Thornton et al., 1960)为 94.09~98.25,表明岩浆演 化较彻底,酸性程度较高;A/CNK 与 A/NK 参数均 大于 1.0,显示出过铝质特征;SiO₂-K₂O 图解(图 4a) 中,石英正长岩落入钾玄岩系列,而黑云母花岗岩落 入高钾钙碱系列;采用花岗岩类自然矿物岩石化学换 算法(Zhu Weifang et al., 1983)获得矿物组合,并计 算Q、A、P百分比,在QAP图解(图4b)上投影,样品 落入花岗岩与碱长花岗岩区域。

3.2 稀土元素和微量元素特征

芳畈花岗岩稀土及微量元素分析结果列于表 1。 结合稀土元素配分图(图 5a)可以看出,两种花岗岩的 稀土元素分布特征比较接近,ΣREE 为 40.5×10⁻⁶ ~ 93.0×10⁻⁶(平均 62.4×10⁻⁶),显示稀土总量较高; ΣLREE 为 17.5×10⁻⁶~61.5×10⁻⁶(平均 34.6× 10⁻⁶),ΣHREE 为 23.0×10⁻⁶~31.8×10⁻⁶(平均 27.8×10⁻⁶),(Ce/Yb)_N值为 0.32~1.01(均值为 0.67),石英正长岩(La/Yb)_N值为 0.52~1.39(均值 为 0.97),均呈现平缓仅 Eu 亏损的"海鸥型"。各样 品 Nb/Ta 比值(2.54~5.72)远小于 17.5,说明源区 地壳性质更明显。Sr 含量为 12.3×10⁻⁶~28.8× 10⁻⁶,Yb含量为 4.80×10⁻⁶~9.28×10⁻⁶,属于非常 低 Sr 高 Yb 类型(Sr<100×10⁻⁶、Yb>2×10⁻⁶),表 明花岗岩形成的压力可能较低(<0.5Ga),同时源区 较浅(Zhang Qi et al.,2007b)。

石英正长岩 δEu 值为 0.16~0.18,黑云母花岗 岩 δEu 值为 0.21~0.23,均为强烈亏损的碱性花岗岩





Fig. 4 SiO_2 -K₂O diagrams (a) (after Rickwood, 1989; Peccerillo et al., 1976) and QAP diagrams (b)

(after Streckeise et al., 1979) for Fangfan granites

1一碱长正长岩;2一正长岩;3一二长岩;4一二长闪长岩;5一闪长岩、辉长岩、斜长岩;6一石英碱长正长岩;7一石英正长岩;8一石英二长岩;9 一石英二长闪长岩、石英二长辉长岩;10一石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩;11一碱长花岗岩;12一花岗岩;13一二长花岗岩;14一花岗 闪长岩;15一英云闪长岩;16一富石英花岗岩类;17一硅英岩

1—Alkali feldspar syenite; 2—syenite; 3—monzonite; 4—monzodiorite; 5—diorite; 6—quartze alkali feldspar syenite; 7—quartze-syenite; 8 quartz monzonite; 9—quartz monzodiorite; 10—quartze diorite; 11—alkali-feldspar granite; 12—granite; 13—admellite; 14—granodiorite; 15 tonalite; 16—quartz-rich granites; 17—quartzolite





Fig. 5 Trace element characteristics of the Fangfan granites

(a)一芳畈花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图,(球粒陨石数据据 Boynton, 1984);(b)一芳畈花岗岩微量元素原始地幔标准化 蛛网图(标准化数据据 Sun et al., 1989; McDonough et al., 1995)

 (a) —Chondrite normalized REE patterns for Fangfan granites (chondrite data from Boynton, 1984); (b)—trace element spider for Fangfan granites(primitive-mantle data from Sun et al., 1989; McDonough et al., 1995)

(<0.30)。石英正长岩 & Ce 值为 0.81~0.87,黑云母 花岗岩 & Ce 值为 0.67~1.3,显示较弱的 Ce 异常。

结合表1及微量元素蛛网图(图 5b)可以看出, 芳畈花岗岩两种岩体的微量元素特征比较相似,配分 模式表现为右倾型,大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 等 相对富集,高场强元素 Nb、Ta、Sr、Ti 等呈明显的负异 常(图 5),说明岩浆源岩以陆壳成分为主(Green, 1987,1995;Barth et al.,2000; Rollinson,2014)。石英 正长岩 Zr+Nb+Ce+Y值为489~523(均值507), Ga/Al 指数在 2.13~3.06之间(均值3.05);黑云母 花岗岩 Zr+Nb+Ce+Y值在520~872(均值650), Ga/Al(×10⁴)指数在3.10~3.40之间(均值3.27), 均与非造山环境中的A型花岗岩类的地球化学特征 (Ga/Al(×10⁴)>2.6,Zr+Nb+Ce+Y>350)相一致 (Whalen et al.,1987)。石英正长岩明显亏损Y,可能 是在黑云母花岗岩形成过程中Y元素大量进入独居 石等富Y矿物或进入石榴子石等矿物晶体结构所 致;考虑到两类花岗岩的HREE没有明显差异,我们 趋向于认为石英正长岩明显亏损Y是由于富Y矿物 脱离岩浆体系所致。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

一般认为锆石的 Th/U 比值在一定程度上能 指示岩浆或变质成因,一般情况下,岩浆锆石的 Th、 U含量较高,Th/U 比值大于 0.5,且 U 和 Th 之间 具有明显的正相关关系;而变质成因锆石的 Th、U 含量低,且 Th/U 比值小于 0.1(Hoskin et al., 2000;Zhou et al.,2002b)。如果 Th/U 比值变化较 大,则表明锆石形成于化学成分相对不均匀的岩浆 结晶条件下。

本次分析所有测点的 U 含量分布在 187×10⁻⁶ ~549×10⁻⁶的范围内, Th 含量变化在 159×10⁻⁶ ~820×10⁻⁶之间, Pb 总含量位于 6667×10⁻⁶~ 22398×10⁻⁶之间。Th/U 比值介于 0.84~2.18 之 间,均大于 0.1。另外 Th 和 U 之间具有明显的正 相关性(图 6),显示了岩浆锆石 Th/U 比值的典型 特征(Hoskin et al.,2000)。

考虑到锆石结晶后可能发生蜕晶化作用,也可能受热事件影响而重结晶,从而导致放射性成因铅丢失,造成测点年龄不协和等因素(Leon et al., 1963; Peucat et al., 1985; Mezger et al., 1997)。通过校正后的有效测点如表 2、图 3 和图7,分别为石英正长岩(13DWJ01)28 点和黑云母花岗岩(13DWJ05)33 点,这些有效测点给出的年龄



Fig. 6 The covariant diagram of Th-U for zircons from Fangfan intrusion

数据基本都位于谐和线上:石英正长岩其²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U年龄在 762±5~781±5 Ma 之间,²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 年龄在 728±15~818±19 Ma 之间,²⁰⁶ Pb/²³⁸ U年 龄加权平均值为 759.8±2.3 Ma(MSWD=1.6); 黑云母花岗岩²⁰⁶ Pb/²³⁸ U年龄在 747±4~767±5 Ma 之间,²⁰⁷ Pb/²³⁵ U年龄在 718±22~813±15 Ma 之间,²⁰⁶ Pb/²³⁸ U年龄加权平均值为 773.0±1.6 Ma(MSWD=0.96);说明²⁰⁶ Pb/²³⁸ U和²⁰⁷ Pb/²³⁵ U 年龄较为一致(表 2),由此表明黑云母花岗岩形成 的年龄为 773.0±1.6 Ma,石英正长岩形成的年龄 为 759.8±2.3 Ma,这与二者的野外接触关系是一 致的(图 2)。



图 7 芳畈岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图 Fig. 7 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordant diagram from Fangfan intrusion

表 2 芳畈花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircons from Fangfan granite

आग्रा म	含量	$(\times 10$	-6)		²⁰⁷ Pb,	$/^{206}$ Pb	²⁰⁷ Pb	$/^{235}{ m U}$	$^{206}{ m Pb}/^{238}{ m U}$		年龄(Ma)					
	Pb *	Th	U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
13DWJ01																
1	13635	400	375	1.0958	0.0620	0.0012	1.0750	0.0227	0.1258	0.0007	674	41	741	16	764	4
2	12548	364	340	1.0967	0.0622	0.0011	1.0885	0.0223	0.1269	0.0008	681	39	748	15	770	5
3	12846	382	346	1.1323	0.0623	0.0011	1.0910	0.0220	0.1270	0.0008	685	39	749	15	771	5
5	20754	796	549	1.4870	0.0626	0.0010	1.1079	0.0205	0.1284	0.0008	693	35	757	14	779	5
6	12540	322	321	1.0289	0.0631	0.0011	1.1115	0.0222	0.1278	0.0008	710	38	759	15	776	5
7	14066	352	333	1.0824	0.0644	0.0012	1.1391	0.0237	0.1284	0.0008	753	40	772	16	779	5
8	15120	304	340	0.9171	0.0652	0.0012	1.1573	0.0240	0.1286	0.0008	782	40	781	16	780	5
9	18931	672	490	1.4065	0.0629	0.0011	1.1142	0.0223	0.1285	0.0008	705	38	760	15	779	5
10	8951	270	285	0.9742	0.0599	0.0011	1.0484	0.0218	0.1268	0.0008	602	41	728	15	770	5
11	17762	403	387	1.0703	0.0658	0.0011	1.1587	0.0220	0.1276	0.0007	801	36	781	15	774	5
12	10316	282	294	0.9836	0.0614	0.0011	1.0793	0.0214	0.1274	0.0008	655	39	743	15	773	5
13	12352	287	301	0.9803	0.0639	0.0012	1.1253	0.0238	0.1277	0.0007	738	41	766	16	775	5
14	12147	282	288	1.0055	0.0644	0.0013	1.1239	0.0247	0.1266	0.0007	754	42	765	17	769	5
17	15359	384	337	1.1679	0.0657	0.0012	1.1518	0.0226	0.1271	0.0008	797	37	778	15	772	5
18	13454	328	307	1.0964	0.0650	0.0012	1.1453	0.0236	0.1278	0.0008	774	39	775	16	775	5
19	14045	338	327	1.063	0.0647	0.0012	1.1414	0.0231	0.1280	0.0008	763	39	773	16	777	5
23	10690	304	270	1.1557	0.0633	0.0012	1.1092	0.0237	0.1271	0.0007	718	42	758	16	771	5
24	12931	334	291	1.1765	0.0652	0.0013	1.1465	0.0245	0.1275	0.0008	782	41	776	17	773	5
25	15915	379	321	1.2144	0.0673	0.0013	1.1793	0.0240	0.1271	0.0008	847	39	791	16	771	5
26	11837	259	252	1.0573	0.0663	0.0013	1.1634	0.0243	0.1273	0.0008	815	40	784	16	772	5
27	18108	467	351	1.3631	0.0681	0.0012	1.1933	0.0229	0.1272	0.0008	870	36	797	15	772	5
30	22398	649	493	1.3503	0.0656	0.0011	1.1542	0.0223	0.1275	0.0008	795	36	779	15	774	5
31	19269	655	482	1.3930	0.0634	0.0011	1.1084	0.0214	0.1267	0.0008	723	37	757	15	769	5
32	13593	311	274	1.1626	0.0673	0.0014	1.1855	0.0263	0.1278	0.0008	846	43	794	18	775	5
34	13831	453	345	1.3467	0.0635	0.0012	1.1154	0.0233	0.1274	0.0008	725	40	761	16	773	5
36	20269	525	390	1.3790	0.0682	0.0012	1.1878	0.0228	0.1263	0.0007	875	36	795	15	767	5
37	22165	753	454	1.7038	0.0670	0.0011	1.1585	0.0216	0.1254	0.0007	838	35	781	15	762	5
40	13082	282	281	1.0305	0.0661	0.0014	1.1572	0.0267	0.1270	0.0007	809	45	781	18	771	5
42	16511	374	307	1.2516	0.0689	0.0013	1.2079	0.0244	0.1271	0.0008	897	38	804	16	771	5
44	15822	303	280	1.1105	0.0700	0.0015	1.2374	0.0284	0.1283	0.0008	927	43	818	19	778	5
46	14280	235	286	0.8421	0.0674	0.0015	1.1966	0.0277	0.1288	0.0008	850	45	799	19	781	5
47	15625	370	347	1.0922	0.0655	0.0012	1.1583	0.0236	0.1283	0.0008	790	39	781	16	778	5
48	15929	407	367	1.1389	0.0649	0.0012	1.1349	0.0238	0.1269	0.0008	770	40	770	16	770	5
								13DWJ	05							
5	15347	430	351	1.2564	0.0649	0.0009	1.1301	0.0176	0.1262	0.0008	772	29	768	12	766	5
6	8615	221	225	1.0088	0.0628	0.0011	1.0895	0.0216	0.1259	0.0008	700	39	748	15	764	5
7	10923	374	275	1.3953	0.0633	0.0011	1.1042	0.0215	0.1264	0.0008	720	37	755	15	767	5
8	12047	276	254	1.1117	0.0664	0.0012	1.1494	0.0246	0.1256	0.0008	819	39	777	17	762	5
9	11457	428	349	1.2593	0.0605	0.0010	1.0430	0.0212	0.1250	0.0008	623	37	725	15	759	5
10	13381	456	357	1.3072	0.0624	0.0010	1.0739	0.0196	0.1248	0.0008	688	33	741	13	758	5
11	12186	372	300	1.2733	0.0637	0.0010	1.1015	0.0200	0.1253	0.0008	733	35	754	14	761	5
12	6667	238	191	1.2732	0.0614	0.0011	1.0610	0.0198	0.1254	0.0008	652	37	734	14	762	5
13	21208	500	350	1.4657	0.0715	0.0012	1.2278	0.0226	0.1245	0.0007	973	35	813	15	756	4
14	19698	483	367	1.3489	0.0689	0.0010	1.1903	0.0183	0.1254	0.0008	895	29	796	12	761	5
16	12158	357	309	1.1843	0.0632	0.0009	1.0719	0.0161	0.1230	0.0007	715	30	740	11	748	4
20	16243	627	377	1.7069	0.0647	0.0008	1.0981	0.0151	0.1231	0.0007	765	27	752	10	748	4
21	13769	496	343	1.4857	0.0635	0.0009	1.0768	0.0155	0.1229	0.0007	726	29	742	11	747	4
22	11535	375	292	1.3173	0.0632	0.0009	1.0788	0.0162	0.1237	0.0007	717	30	743	11	752	5
23	10335	234	243	0.9853	0.0644	0.0011	1.1001	0.0194	0.1238	0.0008	756	35	753	13	752	5
25	9104	262	246	1.0944	0.0622	0.0010	1.0570	0.0185	0.1232	0.0007	682	35	732	13	749	5
27	9490	245	187	1.3419	0.0677	0.0018	1.1597	0.0299	0.1242	0.0008	859	55	782	20	755	5

325

续表 2

测占 含量(×10 ⁻⁶)		含量(×10 ⁻⁶) Th/U		TL/II	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		$^{207}{\rm Pb}/^{235}{\rm U}$		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		年龄(Ma)					
侧鼠	Pb *	Th	U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
29	13676	524	339	1.5853	0.0636	0.0008	1.0927	0.0147	0.1246	0.0007	728	27	750	10	757	4
31	11875	356	275	1.3271	0.0647	0.0014	1.1022	0.0239	0.1235	0.0007	766	45	754	16	751	4
34	10372	253	257	1.0112	0.0636	0.0010	1.1005	0.0177	0.1254	0.0008	729	33	754	12	762	5
36	9802	389	321	1.2447	0.0596	0.0016	1.0285	0.0322	0.1252	0.0008	589	58	718	22	760	5
37	10297	264	227	1.1936	0.0656	0.0011	1.1247	0.0204	0.1244	0.0007	794	36	765	14	756	4
39	15211	820	387	2.1754	0.0632	0.0009	1.0804	0.0159	0.1240	0.0007	715	29	744	11	754	4
40	10649	384	305	1.2928	0.0614	0.0009	1.0571	0.0168	0.1249	0.0007	653	32	732	12	758	5
42	14856	523	366	1.4666	0.0637	0.0008	1.0997	0.0154	0.1252	0.0008	731	28	753	11	761	5
43	11889	288	286	1.0332	0.0641	0.0009	1.1091	0.0161	0.1255	0.0007	744	29	758	11	762	5
45	8273	159	192	0.8468	0.0647	0.0012	1.1246	0.0219	0.1261	0.0008	764	40	765	15	766	5
46	13567	465	338	1.4106	0.0635	0.0009	1.0886	0.0171	0.1243	0.0008	726	31	748	12	755	5

3.4 花岗岩的形成温度

如表 3,计算表明黑云母花岗岩锆石饱和温度 (T_{zr})介于 843~846℃之间(平均 845℃),石英正长 岩饱 和温度(T_{zr})介于 833~877℃之间(平均 848℃)。均值代表样品中锆石的结晶温度,大体代 表了花岗岩的结晶温度(King et al.,1997),而计算 得到的最高温度则代表了岩浆源区原始岩浆的最低 温度(Miller et al.,2003;Zhao Zhenhua,2010)。

由稀土元素饱和浓度温度计适合于贫 Ca、Fe、 Mg 的花岗岩,本文研究的两类样品均符合这一特 征(如表 1):计算得到的黑云母花岗岩锆石饱和温 度(*T*_{REE})介于 773~862℃之间(平均 831℃),石英 正长岩饱和温度(*T*_{REE})介于 818~839℃之间(平均 826℃)。此温度计给出的温度是独居石与熔体最终 平衡时的温度。但花岗质熔体在分异过程中独居石 与熔体之间是否达到平衡尚无法确定,而且此温度 计还受到含水量、熔体成分及独居石内包裹体的影 响,如 ThSiO₄、CaTh(PO₄)等会降低 REEPO₄的活 动性(Gao Li'e et al.,2010)。

上述结果表明,这2个温度计给出的温度总体

相符,且黑云母花岗岩和石英正长岩的结晶温度和 初始温度相当,两种花岗岩形成时的平均温度在 820~850℃左右,较准确、客观地反映了岩浆源区部 分熔融时的温度范围。

4 讨论

4.1 芳畈花岗岩源区性质

从野外特征看,黑云母花岗岩糜棱岩化强于石 英正长岩,由变形和侵入关系判断,变形作用应发生 于石英正长岩侵入到黑云母二长花岗岩之前;此外 采样岩体中均不含方解石、石英等后期脉体,确保没 有外来热液影响到样品的地球化学特征。关于糜棱 岩化花岗岩的元素迁移变化特征,前人已做过类似 的研究:①随着糜棱岩化作用加大,即韧性剪切变形 作用和退变质作用增强,斜长石的牌号会明显降低。 ②随着糜棱岩化作用的增强,白云母有向多硅白云 母过渡的趋势。③糜棱岩化作用的加大会导致 K、 Mg 大量流失,致使黑云母逐渐过渡以致全部转变 为绿泥石,呈现出黑云母的假象。④糜棱岩化作用 的增强对花岗质岩石的常量元素变化影响较小,但

表 3 芳畈花岗岩的锆石饱和温度计算结果 Table 3 The results of zircon saturation temperatures of Fangfan granites

			_	_	_	
样号	13DWJ02	13DWJ03	13DWJ04	13FFB01	13FFB03	13FFB05
M	1.29	1.35	1.35	1.42	1.37	1.42
$ m Zr(imes 10^{-6})$	453	474	485	458	743	435
$D_{ m Zr}$	1095	1046	1023	1083	668	1140
$\ln D_{ m Zr}$	7.00	6.95	6.93	6.99	6.50	7.04
$T_{ m Zr}$ ($^{\circ} m C$)	846	843	846	833	877	835
REE_t	0.22	0.22	0.27	0.25	0.48	0.13
D	1.12	1.14	1.04	0.95	1.01	1.31
$T_{ m REE}$ ($^\circ m C$)	820	819	839	858	862	773

注: M=(Na+K+2Ca)/(Al×Si)(阳离子数量); D_{Zr}= 496000/全岩中的 Zr 含量; T_{REE}为稀土元素饱和浓度温度; D 为锆石饱和温度; 具体算 法及说明见第 2.3 和 2.4 节。

会导致稀有碱金属元素 Li、Sc、Rb、Sr、Ba、Cs 以及 稀有元素 Nb、Ta、Th 含量的升高,稀土元素出溶程 度也出现随着变形强度增高而增加。弱变形花岗质 初糜棱岩和强变形花岗质糜棱岩与未变形的黑云母 二长花岗岩相比,化学成分含量基本没有明显变化, 只有 SiO₂含量有减少趋势,Fe₂O₃和K₂O+Na₂O 均 有增加特点(Lü Peiji et al.,1993;Fei Ping et al., 2015)。结合野外特征,本文样品尤其是黑云母花岗 岩的变形达到初糜棱岩,但在变质作用导致稀有碱 金属元素增高的情况下,两种花岗岩体均表现出明 显的 Nb、Ta、Sr、Ti 等高场强元素负异常,故认为这 两种岩浆的岩浆源岩应以陆壳成分为主。

芳畈花岗岩两种不同岩性的岩体的地球化学特 征总体相似,表明两者可能属于同一岩浆系列。从 岩石化学、微量元素、稀土元素组成特征看:主量元 素表现为高 SiO₂(平均 77.2%)、过铝质(A/CNK 指数在 1.03~1.13),碱度率在 5.43~7.23 之间, 属于碱性系列;稀土元素总量(Σ REE 平均 62.4× 10^{-6}),(Ce/Yb)_N均值为 0.67,(La/Yb)_N均值为 0.97,呈现平缓仅 Eu 亏损(δ Eu 均值 0.20)的"海鸥 型";Ga/Al 均值为 3.16,Zr+Nb+Ce+Y 均值为 578;锆石饱和温度分布在 833~877℃,稀土元素饱 和浓度温度计分布为 773~862℃之间,表明初始岩 浆温度较高。上述特征说明,芳畈花岗岩为典型的 A 型花岗岩。

芳畈花岗岩两种岩体均应为 A 型花岗岩类。 传统上 A 型花岗岩是无水、碱性和非造山的 (Loiselle et al.,1979),但现在定义已发生很大的变 化(Bonin,2007):如有时 A 型花岗岩并不贫水,不 少 A 型花岗岩是过铝质的,大多数 A 型花岗岩形成 于造山后而不是非造山的环境(King et al.,1997)。 无论 A 型花岗岩成因如何,比较共认的一点是:该 类岩石的形成温度较高,而且部分 A 型花岗岩形成 压力还较低(即来源于较浅部的中上地壳),这不仅 有岩石学依据,也得到实验岩石学资料的支持 (Clemens et al.,1986;Patino,1997)。

芳畈花岗岩形成的平均温度为 820~850℃,两 种岩体均为过铝质,其源岩应为长英质陆壳,可能有 泥砂质沉积岩的参与(Vielzeuf et al.,1994;King et al.,1997;Montel et al.,1997;Douce et al.,1998; Castro et al.,1999);表 1 中高 SiO₂、低 TiO₂、过铝 质的岩石地球化学特征可以排除其有下地壳和幔源 物质的参与;表 1 中大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 等相对富集,高场强元素 Nb、Ta、Sr、Ti 等呈明显的 负异常(图 5),说明岩浆源岩以陆壳成分为主;Sr 含 量为 12.3×10⁻⁶~28.8×10⁻⁶,Yb 含量为 4.80× 10⁻⁶~9.28×10⁻⁶,属于非常低 Sr 高 Yb 类型(Sr <100×10⁻⁶、Yb>2×10⁻⁶),表明花岗岩形成的压 力可能较低(<0.5Ga),同时源区较浅(Zhang Qi et al.,2007b)。综上,本文认为芳畈花岗岩源岩应为 长英质陆壳。

此外,这两种岩体地球化学特征上也存在着一 定的差异,如:石英正长岩投图于钾玄岩系列,而黑 云母花岗岩投图于高钾钙碱系列;黑云母花岗岩 Y 为弱正异常,而石英正长岩Y为强负异常。和玄武 岩不同,花岗质岩浆在很大程度上表现为晶粥体 (Pitcher,1997),其发生分离结晶作用的可能性大 为降低(Reid et al., 1993)。因此,黑云母花岗岩与 石英正长岩花岗岩不应为分离结晶的阶段性产物。 按照目前的实验模拟和理论计算的结果(Pitcher, 1997; Cobbing, 2000; Petford et al., 2000; Glazner et al., 2004), 单个侵入体从岩浆形成到锆石 U-Pb 同位素体系封闭的时间不超过1 Ma。Coleman et al. (2004)对内华达地区著名的 Tuolumne 岩套进 行了仔细的年代学研究,结果发现该岩套中不同侵 入体的锆石 U-Pb 年龄变化在 85~95 Ma 之间,并 具有从外向内年龄渐新的规律,表明这些侵入体不 是同批岩浆结晶形成的,而可能是从源区上升的不 同批次岩浆就位的结果。因此,上述芳畈花岗岩两 种岩体地球化学特征的差异表明它们可能为同一岩 浆系列的不同批次产物,部分熔融时长英质壳源成 分有所不同。

4.2 芳畈花岗岩形成的构造背景

花岗岩的地球化学成分取决于其源岩的矿物组成和化学成分、熔融时的物理化学条件(包括温度、压力和挥发分)和其后岩浆的演化(如分离结晶作用、岩浆混合作用、同化混染作用等),而与构造背景的关系不大。尤其对于陆内花岗岩,由于长英质地壳在形成演化过程中的复杂性,难以用地球化学元素直接判别花岗岩形成的构造环境,而只能判别花岗岩形成的构造环境,而只能判别花岗岩源区的构造环境(Wu Fuyuan et al.,2007; Zhang Qi et al.,2007a)。

如上文所述,芳畈花岗岩源岩应为长英质陆壳, 形成于中上地壳。如果浅层地壳能够发生高温部分 熔融,则暗示其深部存在异常热源,而这大多数只会 发生在拉张背景(Wu Fuyuan et al.,2007),这种拉 张背景可以形成于俯冲岛弧带,亦可以形成于地幔 柱上涌。

根据锆石 U-Pb 测年结果,芳畈花岗岩形成于 新元古代早南华世,围绕这一阶段扬子地台北缘该 阶段构造背景的解释主要存在以下几种认识:①形 成于岛弧环境(Ling Wenli et al., 1996; Wang Zongqi et al., 1999, 2009a; Lai Shaocong et al., 2001, 2003; Zhou Meifu et al., 2002a, 2002b; Li Xianhua et al., 2003b; Chen Yuelong et al., 2005; Xu Xueyi et al., 2011);② 形成于大陆裂谷环境 (Zhang Guowei, 1991; Xia Linqi et al., 2001, 2008; Zhang Benren et al.,2002);③ 在 1000 ~ 820 Ma, 扬子陆块北缘一直处于稳定的洋壳消减俯冲的活动 大陆边缘环境(Li Xianhua, 1999; Wang Xiaolei et al.,2006;Zheng Yongfei et al.,2006b),到 825 Ma 左右,受地幔柱(或超级地幔柱)事件影响,Rodinia 超大陆发生裂解(Li Zhengxia et al., 2003b), 使扬 子板块逐渐向背离超大陆核心的方向漂移,从而引 发洋陆俯冲活动程度的加剧,到 770 Ma,裂谷作用 不断加强,岩浆活动愈加频繁的阶段。

Li Zhengxia et al. (2003b)认为 830~750 Ma 是 Rodinia 超级地幔柱与超大陆裂解的时期,其中 830~795 Ma 和 780~745 Ma 分别是 Rodinia 超大 陆开始张裂和最终裂解两个阶段,分别对应裂谷前 岩浆作用(Prerift magmatism)和同裂谷岩浆作用 (Syn-rift magmatism)。扬子的南缘和西缘这二期 岩浆活动均有发育(Li Xianhua et al., 2003a, 1999; Zhou Jibin et al., 2007), 而在扬子北缘, 沿秦岭-武当一桐柏一大别造山带南缘,主要产出的是 700 ~ 800 Ma 岩浆活动(Liu et al., 2006; Zheng et al. ,2004,2006a; Cai et al., 2006; Li et al., 2010; Ling Wenli et al., 2002, 2007, 2010; Wu Yudong et al., 2014; Xue Huaimin et al., 2013, 2011; Zhu Xiyan et al.,2008),而少有 825 Ma 前裂谷期岩浆作用的报 道。到 780 Ma 左右,至少在扬子板块北缘,形成了 以勉略带为代表的新元古代洋盆,该洋盆存在的证 据已被勉略带内存在新元古代蛇绿岩残块证实[€], 该洋壳向南俯冲于扬子板块之下,形成了扬子北缘 较为广泛的大陆边缘弧岩浆作用(Feng Yimin et al., 2004; Su Chungian et al., 2006; Wang Zongqi et al., 2009a, 2009b; Yan Zhen et al., 2010; Dong Yunpeng et al. ,2011; Xu Xueyi et al. ,2011; Zhu et al., 2014), 该岩浆事件可能一直持续到 680 Ma (Wu et al., 2004; Liu et al., 2006; Xu Zhiqin et al., 2006; Xu Xueyi et al., 2011)。基于上述特征, 我们认为芳畈花岗岩形成于新元古代洋陆俯冲的构 造背景,是这一时期大陆边缘弧岩浆作用的产物。

4.3 芳畈花岗岩的构造性质及铜成矿的探讨

如前文所述, Peng Lianghong et al. (2003)在 本文研究区南部的双峰尖地区袁集一带乔店片岩— 大理岩(岩)组中发现腕足类生物化石碎片,将该岩 组的时代约束在早古生代寒武系之后;并由此将芳 畈花岗岩西侧的大理岩组划归南华系灯影组(Z_2 — \in_1)。此外,作者还在芳畈花岗岩东北部的武当岩 群二岩组中获得了731.9±2.3 Ma(MSWD=0.84, n=35)的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平 均年龄,表明该岩组形成时代在731 Ma 之后。这 些特征均表明芳畈花岗岩体形成时代(759.8~ 773.0 Ma)早于其外围地层,即其与岩体东部和西 部的围岩之间均非侵入关系,而是经后期构造改造 形成的混杂岩带,其形成的时代和混杂带的类型有 待于进一步研究约束。

如此一来,围绕芳畈岩体围岩中的一系列铜矿 (矿化)也并非砂卡岩性矿床,而是断裂控制的后生 热液矿床。Zhou Xin(2009)对该类矿床进行研究, 认为矿石矿物以斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黄铁矿为 主;次为蓝辉铜矿、铜蓝、方铅矿、闪锌矿;脉石矿物 为方解石、白云石、石英、绿泥石、重晶石、斜长石、绢 云母、白云母等;围岩蚀变以绿泥石化、硅化、绢云母 化及钾化最为普遍,这些特征表明该矿床应为中温 热液矿床。由于芳畈花岗岩体的形成时代为新元古 代(759.8~773.0 Ma),而非晚燕山期,无法提供成 矿热液,故与铜矿的形成没有直接关系。

5 结论

本文通过对西大别芳畈黑云母花岗岩和石英正 长岩两种岩体的地球化学分析以及 U-Pb 同位素年 代学测试,得到如下认识:

黑云母花岗岩形成于 773.0±1.6 Ma,石英正 长岩形成于 759.8±2.3 Ma;芳畈花岗岩为新元古 代岩浆事件,而非燕山晚期形成,该岩浆作用与岩体 外围的铜成矿作用无直接联系。

地球化学分析结果和岩体产出特征表明,芳畈 花岗岩体中黑云母花岗岩和石英正长岩总体特征相 似,均应为A型花岗岩类,源岩应为长英质陆壳,形 成平均温度在820~850℃左右。

芳畈花岗岩体形成于新元古代洋陆俯冲的构造 背景,是这一时期大陆边缘弧岩浆作用的产物;花岗 岩体形成时代早于其外围地层,是经后期构造改造 形成的混杂岩带。 **致谢**:本文研究过程中,样品处理和单矿物分选 工作由河北省区域地质调查研究院实验室完成,主 量、微量元素测试在国家地质实验测试中心完成,锆 石制靶和阴极荧光照相由北京锆年领航科技有限公 司完成,锆石 U-Pb 同位素年代学测试工作在中国 地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与 资源评价重点实验室完成,在此深表感谢!

注 释

- 中南冶金地质勘探公司 604 队. 1975. 湖北省大悟县芳畈矿区陈 家河铜矿地质勘探报告.
- ❷湖北省鄂东北地质大队.1987.湖北省大悟县芳畈铜矿区普查地 质报告.
- ❸河南省地质局.1982.1:20万区域地质调查成果报告(新县(大悟) 幅).
- ●彭练红等,湖北省地质调查院.2003.1:25万区域地质调查成果报告(麻城市幅).
- ⑤陕西省地质调查院. 2008.1:25万区域地质调查成果报告(南江市幅).

References

- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. Chemical Geology, 165(3~4): 197~213.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. Lithos, 97(1~2): 1~29.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteoric studies. Rare Earth Element Geochemistry, $63{\sim}114$.
- Cai Zhiyong, Luo Hong, Xiong Xiaolin, Wu Dekuan, Wu Xianliang, Sun Sancai, Yang Jun. 2006. A Discussion on the age of the meta-sedimentary rocks in the upper part of the Wudang Group: constrained by the Grain-Zircon U-Pb Dating. Journal of Stratigraphy, 30 (1): 60 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Castro A, Douce A E P, Corretg L G, Jesús D, El-Biad M, El-Hmidi H. 1999. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Iberian massif, Spain: an experimental test of granite petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 135(2~3): 255~276.
- Chen Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, Zhang Zongqin, Dai Tongmo, Shi Zeen, Sun Jingbo. 2012. Isotope geochronology: technique and application. Acta Geologica Sinica, 85(11): 1917 ~1947(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, Li Zhihong, Zhang Hongfei, Song Biao. 2005. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province. Science in China Series (D: Earth Sciences), 48(5): 622~634.
- Clemens J D, Holloway J R, White A J R. 1986. Origin of A-type granite: Experimental constraints. American Mineralogist, 71: 317~324.

- Cobbing J. 2000. The geology and mapping of granite batholiths. In: Cobbing J, ed. Notes in Earth Sciences.
- Coleman D S, Gray W, Glazner A F. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. Geology, 32(5): 433~436.
- Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Santosh M, Zhang Xiaoning, Qing Chen, Chen Yang, Zhao Yang. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan Massif. Precambrian Research, 189(1~2): 66~90.
- Douce A E P, Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. Journal of Petrology, 39(4): 689~710.
- Fei Ping, Zhao Xiu, Jin Haiyu. 2015. On the single mineral and geochemistry features: taking the mylonite in Toudaoqiao area, Ewenki of Inner Mongolia for cases. Value Engineering, 34 (5): 307~309 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. 2004. Discussion on the tectonic features of the Mianxian-Lueyang zone. Geological Review, 50(3): 295~303 (in Chinese with English abstract).
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Hu Guyue. 2010. High Sr/Y two-mica granite from Quedang area, southern Tibet, China: Formation mechanism and tectonic implications. Geological Bulletin of China, 29(2~3): 214~226(in Chinese with English abstract).
- Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, Gray W, Taylor R Z. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? GSA Today, 14(4/ 5): 4~12.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. Chemical Geology, 120(3~4): 347~359.
- Green T H, Pearson N J. 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(1): 55~62.
- Harrison T M, Aleinikoff J N, Compston W. 1987. Observations and controls on the occurrence of inherited zircon in Concordtype granitoids, New Hampshire. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(9): 2549~2558.
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. Journal of Metamorphic Geology, 18(4): 423~439.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, (4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Xie Guiqing, 2007. LA-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 28 (supp): $26 \sim 28$ (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2008. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf

isotope microanalysis of zircon and its geological applications. Acta Petrologica Sinica (10): $2595 \sim 2604$ (in Chinese with English abstract).

- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Fang Donghui, Liu Yifei. 2009. Geochronology and geochemical features of the main intrusive rocks in the Weishancheng area, Tongbai County, Henan. Acta Geologica Sinica, 83(7):1011~1029(in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Lai Shaocong, Yang Ruiying, Zhang Guowei. 2001. Tectonic setting and implication of the Sunjiahe volcanic rocks, Xixiang Group, in South Qinling. Scientia Geologica Sinica, 36(3): 295 ~303(in Chinese with English abstract).
- Lai Shaocong, Li Sanzhong, Zhang Guowei. 2003. Tectonic settings of the volcano-sedimentary rock association from Xixiang Group, Shaanxi province: volcanic rock geochemistry constraints. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 141 ~ 152 (in Chinese with English abstract).
- Leon T S, Deutsch S. 1963. Uranium-lead isotopic variations in zircons: a case study. The Journal of Geology, 71(6): 721 ~758.
- Li Fulin, Li Yilong, Zhou Guohua, Xu Shiyuan, Li Zugang, Zhou Hanwen. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of schist from the Dalangshan Group in Suizhou City, Hubei Province, and its implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(5): 488~ 496(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning: Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly. Precambrian Research, 97(1): 43~57.
- Li Xianhua, Li Zhengxia, Ge Wenchun, Zhou Hanwen, Li Wuxian, Liu Ying, Wingate M T. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? Precambrian Research, 122(1): 45~83.
- Li Zhengxia, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian, Zhang Shihong, Zhou Hanwen. 2003b. Geochronology of Neoproterozoic synrift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Research, 122 (1~4): 85~109.
- Ling Wenli. 1996. Sotopic geochronology and crustal growth of Proterozoic basement along the northern margin of Yangtze Craton: I. Houhe Group and Xixiang Group. Earth Science, 21 (5): 491~494(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Cheng Jianping, Wang Xinghua, Zhou Hanwen. 2002. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 18(1): $25 \sim 36$ (in

Chinese with English abstract).

- Ling Wenli, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Luo Tingchuan. 1996. An isotopic evidence for oceanic crust subduction and crust mantle recycling in Meso Neoproterozoic along northern margin of Yangtze Craton. Earth Science, 21(3): 332~336(in Chinese with English abstract).
- Ling Wen Li, Xie Xianjun, Liu Xiaoming, Cheng Jianping. 2007. " Zircon U-Pb dating on the Mesozoic volcanic suite from the Qingshan Group stratotype section in eastern Shandong Province and its tectonic significance. " Science in China Series D (Earth Sciences). 50(6): 813~824.
- Ling Wenli, Ren Bangfang, Duan Ruichun, Liu Xiaoming, Mao Xinwu, Peng Lianhong, Liu Zaoxue, Cheng Jianping, Yang Hongmei. 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication. Chinese Science Bulletin, 53 (14): 2192~2199.
- Ling Wenli, Duan Ruichun, Liu Xiaoming, Cheng Jianping, Mao Xinwu, Peng Lianhong, Liu Zaoxue, Yang Hongmei, Ren Bangfang. 2010. U-Pb dating of detrital zircons from the Wudangshan Group in the South Qinling and its geological significance. Chinese Science Bulletin. 55 (22); 2440~2448.
- Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, Song Biao, Wang Zongxiu. 2006. Zircon U-Pb dating for the earliest Neoproterozoic mafic magmatism in the southern margin of the North China Block. Chinese Science Bulletin, 51(19): 2375~2382.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1~2): 537~571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010b. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1535~1546.
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America Abstracts with Programs. 11(7): 468.
- Lü Peiji, Zheng Xuexin. 1993. Geochemical research of mylonite zone from south of Tanlu fault zone. Geology of China, 1993, 9: 21~23(in Chinese without English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit: a geochemical software package constructed by VAB. Geochemistry, 33(5): 459~464.
- Ludwig K R. 2001. ISOPLOTS—a geochronological tookit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 1a: 1~58.
- Mattauer M, Matte Ph, Malavieille, et al. 1985. Tectonics of the Qinling belt: build up and evolution of eastern Asia. Nature, 317:496~500.
- McDonough W F, Sun Shensu. 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, 120(3~4): 223~253.

- Mezger K, Krogstad E J. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. Journal of Metamorphic Geology, 15(1): 127~140.
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529~532.
- Montel J M. 1986. Experimental determination of the solubility of Ce-monazite in SiO₂-Al₂O₃-K₂O-Na₂O melts at 800°C, 2 kbar, under H₂O-saturated conditions. Geology, 14(8): 659~662.
- Montel J M, Vielzeuf D. 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 128(2~3): 176~196.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson J M, Corfu F, Dörr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Y, Götze J, Häger T, Kröner A, Valley J W. 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. Geostandards and Geoanalytical Research, 32(3): 247 ~265.
- Patiño Douce A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25(8): 743~746.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63 ~81.
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, Vigneresse J L. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. Nature, 408(6813): 669~673.
- Petrelli M, Poli G, Perugini D, Peccerillo A. 2005. PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 6(7): 6183.
- Peucat J J, Tisserant D, Caby R, Clauer N. 1985. Resistance of zircons to U-Pb resetting in a prograde metamorphic sequence of Caledonian age in East Greenland. Canadian Journal of Earth Sciences, 22(3): 330~338.
- Pitcher W S. 1997. The Nature and Origin of Granite. Springer.
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. Precambrian Research, 51(1): 1~25.
- Reid J B, Murray D P, Hermes O D, Steig E J. 1993. Fractional crystallization in granites of the Sierra Nevada: How important is it? Geology, 21(7): 587~590.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): $247 \sim 263$.
- Rollinson H R. 2014. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Routledge.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48(1): 26~30.

- Streckeisen A, Le Maitre R. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. Neues Jahrbuch for Mineralogie, Abhandlungen, 136: 169~206.
- Su Chunqian, Hu Jianmin, Li Yong, Liu Jiqing. 2006. The existence of two different tectonic attributes in Yaolinghe Group in South Qinling region. Acta Petrologica et Mineralogica, 25 (4): 287~298.
- Sun Shensu, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Thornton C P, Tuttle O F. 1960. Chemistry of igneous rocks— [Part] 1, Differentiation index. American Journal of Science, 258(9): 664~684.
- Tilton G R, Schreyer W, Schertl H P. 1991. Pb-Sr-Nd isotopic behavior of deeply subducted crustal rocks from the Dora Maira Massif, Western Alps, Italy—II: what is the age of the ultrahigh-pressure metamorphism? Contributions to Mineralogy and Petrology, 108(1~2): 22~33.
- Vielzeuf D, Montel J M. 1994. Partial melting of metagreywackes. Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships. Contributions to Mineralogy and Petrology, 117(4): 375~393.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, Zhang Wenlan, Liu Xiaoming, Zhang Guilin. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. Precambrian Research, 145(1): 111~130.
- Wang Zongqi, Chen Haihong, Li Jiliang, Hao Jie, Zhao Yue, Han Fanglin, Hao Junwu. 1999. Discovery of radiolarian fossils in the Xixiang Group, the Southern Qinling, central China, and its implications. Science China Earth Sciences, 42 (4): 337 ~343.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Junlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009a. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1527~1546(in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Gao Lianda, Yan Quanren, Chen Junlu, Li Qiugen, Jiang Chunfa, Liu Ping, Zhang Yingli, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009b. New advances in the study on ages of metamorphic strata in the Qinling orogenic belt. Acta Geoscientica Sinica, 30(5): $561 \sim 570$ (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295 ~ 304 .
- Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest earth. Science, 308 (5723): 841~844.
- Whalen J, Currie K, Chappell B. 1987. A-type granites:

geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4); $407 \sim 419$.

- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. Geological Magazine, 106(04): 370~384.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217~1238(in Chinese with English abstract).
- Wu Yudong, Wang Zongqi, Wang Tao, Zhang Yutao, Zhanghan. 2014. Characteristics and geological significance of detrital zircon from Meta-sedimentary rocks of Wudang group. South qinling. Annual meeting of the Chinese Academy of Earth Sciences (2014)——Topics 46: Proceedings of the central orogenic belt tectonic evolution and mineralization (in Chinese without English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei, Zhou Jianbo. 2004. Neoproterozoic granitoid in northwest Sulu and its bearing on the North China
 South China Blocks boundary in east China. Geophysical Research Letters, 31(7): 1~4.
- Xia Linqi. 2001. A Study of volcanic rocks in orogenic belts. Acta Petrologica et mineralogica, 20(3): 225~232(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Xu Xueyi. 2008. Petrogenesis of the Yaolinghe Group, Yunxi Group, Wudangshan Group volcanic rocks and basic dyke swarms from eastern part of the South Qinling Mountains. Northwestern Geology, 41(3): 1~29(in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Huang Shaoying, Zhan Sheng, Deng Rongjing, Liu Bing. 2007. Correlation between Tongbai and western Dabie orogenic belts. Acta Geological Sinica, 81(1): 32~37(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Li Ting, Chen Junlu, Li Ping, Wang Hongliang, Li Zhipei. 2011. Zircon U-Pb age and petrogenesis of intrusions from Mengzi area in the northern margin of Yangtze plate. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 699~720(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Liu Fulai, Qi Xuexiang, Zhang Zeming, Yang Jingsui, Zeng Lingsen, Liang Fenghua. 2006. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultra-high pressure metamorphic terrane. Acta Petrologica Sinica, 22(7): 1745~1760(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Li Yuan, Liang Fenghua, Pei Xianzhi. 2015a. A connection between of the paleo-Tethys suture zone in the Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt. Acta Geologica Sinica,89(4): 671~680(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin. 2011. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb data of Neoproterozoic meta-magmatic rocks in the Suizhou-Zaoyang area, northern margin of the Yangtze Craton, Central China. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1116~1130(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang. 2013. Detrital-zircon geochronology from the metasedimentary rocks of the Suizhou Group in the southern

foot of the Tongbaishan Orogen and their geological significance. Acta Petrologica Sinica, 29(2): $564 \sim 580$ (in Chinese with English abstract).

- Yan Zhen, Wang Zongqi, Chen Junlu, Yan Ququanren, Wang Tao. 2010. Detrital record of Neoproterozoic arc-magmatism along the NW margin of the Yangtze Block, China: U-Pb geochronology and petrography of sandstones. Journal of Asian Earth Sciences, 37(4): 322~334.
- Yang Zeqiang, Tang Xiangwei. 2015. Geochemical Characteristics and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Isotopic Dating of Xiaofan Rock Bodies In the North Dabieshan. Acta Geologica Sinica, 89(4): 692~700 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiangning, Xing Shuwen, Xiao Keyan. 2016. Metallogenic Characteristics and Mineral Resource Potential Analysis of the Wudang-Tongbai-Dabie Mo-REE-Au-Ag-Pb-Zn Metallogenic Belt. Acta Geologica Sinica, 90(7):1447~1457 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei, Han Yinwen. 2002. Geochemistry of the Qinling Orogenic Belt. Beijing: Science Press (in Chinese without English abstract).
- Zhang Guowei. 1991. The Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Xi' an: Northwestern University Press (in Chinese without English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chendong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2007a. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study(3). Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2683~2698(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2007b. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. Acta Petrologica Sinica, 22 (9): 2249~2269(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis. Earth Science Frontiers, 17(1): 267 ~ 286 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei. 2004. Position of South China in configuration of Neoproterozoic supercontinent. Chinese Science Bulletin, 49 (8): 751~753.
- Zheng Yongfei, Zhao Zifu, Wu Yuanbao, Zhang Shaobing, Liu Xiaoming, Wu Fuyuan. 2006b. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. Chemical Geology, 231 (1): 135~158.
- Zhou Jibin, Li Xianhua, Ge Wwenchun, Li Zhengxiang. 2007. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia. Gondwana Research, 12(1): 184~197.
- Zhou Meifu, Kennedy A K, Sun Min, Malpas J, Lesher C M. 2002a. Neoproterozoic arc - related mafic intrusions along the northern margin of South China: implications for the accretion of Rodinia. The Journal of geology, 110(5): 611~618.

- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, Li Yunqian, Ding Jun. 2002b. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. Earth and Planetary Science Letters, 196(1~2): 51~67.
- Zhou Xin. 2009. Metallogenic geologic features and genesis of Fangfan copper deposit. Science & Technology Information (29): 130~131(in Chinese without English abstract).
- Zhu Weifang, Tang Chunjing. 1983. Granite type natural mineral rock chemical conversion method and its application. Guigan: Guizhou People Press.
- Zhu Xiyan, Chen Fukun, Wang Wei, Pham Trung Hieu, Wang Fang, Zhang Fuqin. 2008. Zircon U-Pb ages of volcanic and sedimentary rocks of the Wudang Group in the Qinling orogenic belt within western Henan Province. Acta Geoscientica Sinica, 29(6): 817~829(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyan, Chen Fukun, Nie Hu, Siebel W, Yang Yizeng, Xue Yingyu, Zhai Mingguo. 2014. Neoproterozoic tectonic evolution of South Qinling, China: Evidence from zircon ages and geochemistry of the Yaolinghe volcanic rocks. Precambrian Research, 245: 115~130.

参考文献

- 蔡志勇,罗洪,熊小林,吴德宽,吴贤亮,孙三才,杨军.2006.武 当群上部变沉积岩组时代归属问题:单锆石 U-Pb 年龄的制 约.地层学杂志,30(1):60~63.
- 陈文,万渝生,李华芹,张宗清,戴檀谟,施泽恩,孙敬博. 2012. 同位素地质年龄测定技术及应用.地质学报,85(11):1917 ~1947.
- 费平,赵秀,金海玉.2015.单矿物及地球化学特征浅析——以内 蒙古鄂温克旗头道桥地区糜棱岩为例.价值工程,34(5):307 ~309.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋. 2004. 勉县一略阳带大地构造属性之探 讨. 地质论评,50(3): 295~303.
- 高利娥,曾令森,胡古月.2010. 藏南确当地区高 Sr/Y 比值二云母 花岗岩的形成机制及其构造动力学意义.地质通报,29(2~ 3):214~226.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质(4):481~492.
- 侯可军,李延河,谢桂青. 2007. 锆石 Hf 同位素的 LA-MC-ICP-MS 分析方法. 质谱学报, 28(增刊(无机)): 26~28.
- 侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若,谢桂青.2008. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报 (10): 2595~2604.
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞. 2009. 河南桐柏围山城地区主要 侵入岩年代学与地球化学特征. 地质学报, 83(7):1011~1029
- 赖绍聪,李三忠,张国伟. 2003. 陕西西乡群火山-沉积岩系形成构造环境:火山岩地球化学约束. 岩石学报,19(1):141~152.
- 赖绍聪,杨瑞瑛,张国伟. 2001. 南秦岭西乡群孙家河组火山岩形 成构造背景及其大地构造意义的讨论. 地质科学,36(3):295 ~303.
- 李福林,李益龙,周国华,徐士元,李祖刚,周汉文. 2010. 湖北随

州大狼山群片岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄及其意义. 岩石矿物 学杂志, 29(5): 488~496.

- 凌文黎. 1996. 扬子克拉通北缘元古宙基底同位素地质年代学和地 壳增生历史: I.后河群和西乡群.地球科学:中国地质大学学 报,21(5):491~494.
- 凌文黎,程建萍,王歆华,周汉文.2002.武当地区新元古代岩浆岩 地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示.岩石 学报,18(1):25~36.
- 凌文黎,张本仁,张宏飞,骆庭川. 1996. 扬子克拉通北缘中、新元 古代洋壳俯冲及壳幔再循环作用的同位素地球化学证据. 地球 科学:中国地质大学学报,21(3):332~336.
- 吕培基,郑学信.1993. 郑庐断裂带南段糜棱岩带地球化学特征研 究.中国地质,9:21~23.
- 宋彪,张玉海,万渝生,简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年 龄测定及有关现象讨论. 地质论评,48(1):26~30.
- 苏春乾,胡建民,李勇,刘继庆. 2006. 南秦岭地区存在两种不同构 造属性的耀岭河群. 岩石矿物学杂志, 25(4): 287~298.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平. 2009a. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划 分. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 王宗起,闫臻,王涛,高联达,闫全人,陈隽璐,李秋根,姜春发, 刘平,张英利. 2009b. 秦岭造山带主要疑难地层时代研究的新 进展.地球学报,30(5):561~570.
- 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报,23(6):1217~1238.
- 武昱东,王宗起,王涛,张玉涛,张晗. 2014. 南秦岭武当群变沉积 岩碎屑锆石特征及其地质意义. 2014 年中国地球科学联合学 术年会——专题 46:中央造山带构造演化与成矿论文集.
- 夏林圻.2001.造山带火山岩研究.岩石矿物学杂志,20(3):225~232.
- 夏林圻,夏祖春,李向民,马中平,徐学义.2008. 南秦岭东段耀岭 河群,陨西群,武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因.西北 地质,41(3):1~29.
- 徐备,黄少英,湛胜,邓荣敬,刘兵.2007.试论桐柏造山带与西大别 造山带的对比.地质学报,81(1):32~37
- 徐学义,李婷,陈隽璐,李平,王洪亮,李智佩. 2011. 扬子地台北 缘檬子地区侵入岩年代格架和岩石成因研究. 岩石学报,27 (3):699~720.
- 许志琴,刘福来,戚学祥,张泽明,杨经绥,曾令森,梁凤华.2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录.岩 石学报,22(7):1745~1760.
- 许志琴,李源,梁凤华,裴先治.2015."秦岭-大别-苏鲁"造山带中"古 特提斯缝合带"的连接.地质学报,89(4):671~680
- 薛怀民,马芳. 2013. 桐柏山造山带南麓随州群变沉积岩中碎屑锆 石的年代学及其地质意义. 岩石学报,29(2):564~580.
- 薛怀民,马芳,宋永勤. 2011. 扬子克拉通北缘随(州)-枣(阳)地 区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年 代学研究. 岩石学报,27(4):1116~1130.
- 杨泽强,唐相伟. 2015. 北大别山肖畈岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年. 地质学报,89(4):692~700.
- 阴江宁,邢树文,肖克炎.武当-桐柏-大别 Mo-REE-Au-Ag-Pb-Zn 多金属成矿带主要地质成矿特征及资源潜力分析.地质学报,

2016, 90(7):1447~1457.

- 张本仁,高山,张宏飞,韩吟文. 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京:科学出版社.
- 张国伟. 1991. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安:西北大学出版社.
- 张旗,潘国强,李承东,金惟俊,贾秀勤. 2007a. 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, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2007b. 花岗岩的Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249~2269.

- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究 中的应用. 地学前缘, 17(1).
- 周新. 2009. 芳畈铜矿成矿地质特征及成因浅析. 科技资讯(29): 130~131.
- 朱为方, 唐春景. 1983. 花岗岩类自然矿物岩石化学换算法及其应用. 贵阳:贵州人民出版社.
- 祝禧艳,陈福坤,王伟,Hieu P T,王芳,张福勤.2008. 豫西地区 秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄.地球学 报,29(6):817~829.

Zircon U-Pb Age and Geochemistry of the Fangfan A-Type Granite in Western Dabie Mountains and Their Tectonic Significance

WU Yudong¹, WANG Zongqi¹, LIU Chengxin², JIA Shaohua¹,

ZHANG Yutao¹⁾, WU Bo²⁾, WANG Gang¹⁾

1) MLR Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Hubei institute of Geological Survey, Wuhan, 430034

Abstract

Geochemical analysis and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for the Fangfan granites from two granitic bodies in western Dabie Mountains were conducted in this study. The geochemical characteristics of biotite granite and quartz syenite are generally similar, characterized by high SiO₂ (ave. 77. 2%), peraluminous $(A/CNK \text{ value between } 1.03 \sim 1.13)$, alkalinity ratio $(AR \text{ value between } 5.43 \sim 7.23)$. REE analysis show that granites have an average ΣREE content of 62. 4×10^{-6} , an average (Ce/Yb)_N of 0.67, an average (La/Yb)_N of 0.97 and an average δEu of 0.20, an average Ga/Al of 3.16 and an average Zr+Nb+ Ce + Y of 578. The chondirte-normalized REE pattern displays flat curves. The large ion lithophile elements, such as Rb, Th, U, K are relatively enriched, whereas high HFSE such as Nb, Ta, Sr and Ti are relatively depleted, which indicate residual plagioclase in the granite source area. Temperatures of zircon saturation and REE saturation concentration are around 833~877°C and 773~862°C respectively, indicating a high initial temperature of initial magma. These characteristics show that the Fangfan granites are typical of A-type granite formed in the intraplate extensional setting of middle-upper crust. LA-ICP-MS U-Pb dating analysis for zircons from two types of samples yielded an age of 773. 0 ± 1.6 Ma (MSWD =0.96, n=33) for biotite granite and 759.8±2.3 Ma (MSWD=1.6, n=28) for quarz syntite, indicating they formed in a tectonic background of Neoproterozoic ocean-continent subduction in the Nothern Yangtze block and was probably the product of magmatism of continental marginal arc. The Fangfan granites, which formed earlier than that of their wall rocks, is the transformed m lange belt by late tectonic, with its magmatism no direct relation with copper mineralization.

Key words: Fangfan granites; zircon U-Pb; LA-ICP-MS; western Dabie Mountains; northern Yangtze block; Fangfan copper ore