

宁芜盆地花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、同位素特征及其意义

袁峰¹⁾, 周涛发^{1,2)}, 范裕¹⁾, 张乐骏^{1,2)}, 马良¹⁾, 钱兵¹⁾

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009;

2) 澳大利亚塔斯马尼亚大学优秀矿床研究中心(CODES), 霍巴特, 79 邮箱

内容提要:宁芜盆地中花岗岩类侵入体出露零星, 以石英二长岩和花岗岩为主, 研究程度薄弱。本文对盆地内主要的 5 个花岗岩类侵入体牛迹山岩体、霍里岩体、姑山岩体(姑山铁矿床钻孔中)、小石山岩体和娘娘山岩体进行了年代学、锆石 Lu-Hf 同位素、Nd-Sr 同位素分析研究。这 5 个花岗岩类侵入体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄依次为 128.0 ± 1.7 Ma、 126.4 ± 1.3 Ma、 129.8 ± 1.6 Ma、 130.1 ± 1.5 Ma、 128.3 ± 1.8 Ma, 形成于 126~130 Ma 之间, 均为早白垩世岩浆活动的产物, 与姑山、娘娘山旋回火山岩活动时限相当, 略晚于玢岩型铁矿的成矿时代。Nd-Sr 同位素指示, 宁芜盆地花岗岩类源于交代地幔源区, 其性质接近于 EMI 型富集地幔, 其形成与古板块的俯冲交代作用有关; Lu-Hf 同位素指示, 宁芜盆地花岗岩类与成矿的闪长(玢)岩在岩浆起源和演化上存在联系。盆地中的花岗岩类形成于中国东部岩石圈减薄高峰期的地球动力学背景, 为典型张性构造应力体制的产物。

关键词:LA-ICPMS U-Pb 定年; 锆石; 同位素; 花岗岩类; 宁芜盆地

长江中下游地区是我国重要的铜、铁、金多金属成矿带(常印佛等, 1991), 其中, 宁芜盆地是最重要的铁资源产地, 同时还是“玢岩铁矿”模式的发源地(宁芜玢岩铁矿编写组, 1978; 翟裕生等, 1992)。长期以来, 众多学者对宁芜盆地进行了广泛而深入的构造-岩浆-成矿系统研究, 在岩浆岩的形成时代(张旗等, 2003; 闫峻等, 2009; 侯可军等, 2010; Zhou et al., 2011)、岩浆作用过程(徐夕生等, 2005; Mao et al., 2005; 王元龙等, 2001; 谢智等, 2007; 范裕等, 2008; 许继峰等, 2001; Yuan et al., 2011)、成矿年代学(马芳等, 2006; 余金杰等, 2002; 马芳等, 2010; 胡劲平等, 2010; 范裕等, 2010; 袁顺达等, 2010; 薛怀民等, 2010)及成矿作用(宁芜玢岩铁矿编写组, 1978; 陈毓川等, 1981; 常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 邢凤鸣等, 1999; Pan et al., 1999; 林新多, 1999; 余金杰, 2003; 卢冰等, 1990; 胡文瑄, 1991; Hou et al., 2009, 2010; 余金杰等, 2007)等方面均

取得了重要的成果和进展。

然而, 以往对宁芜盆地内岩浆岩的研究主要集中在中生代火山岩(龙王山、大王山、姑山、娘娘山旋回)及次火山岩(赋矿闪长玢岩系)上, 而对于盆地内出露较少的侵入体尤其是花岗岩类侵入体研究程度薄弱, 制约了对盆地内岩浆-成矿作用过程的完整理解。因此, 本文针对宁芜盆地内的花岗岩类侵入体, 开展了年代学、锆石 Lu-Hf 同位素、Nd-Sr 同位素分析研究。

1 区域地质背景

长江中下游地区位于扬子地块东北缘, 地处华北地块、大别造山带和扬子地块三大构造单元交汇处。区内 EW 向和 NNE 向两组构造最发育, 两组构造的交汇部位明显控制着燕山期岩浆活动; 出露的地层有零星分布的前震旦纪变质基底和震旦纪碎屑岩、白云岩和硅质岩, 广泛发育的寒武纪至早三叠

注: 本文为国家自然科学基金项目(40830426, 40803015)、国家“深部探测技术与实验研究专项计划”专题(编号: SinoProbe-03-02-05)、国土资源部公益性行业科研专项项目课题(编号: 201011047 07)、中国地质调查局地质调查工作项目(编号 1212011121115)及新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0324)、安徽省地质勘查专项费项目(2005-51, 2007-1, 2009-g-22, 2009-13)资助的成果。

收稿日期: 2011-01-21; 改回日期: 2011-02-12; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 袁峰, 男, 1971 年生。博士, 教授。矿物学岩石学矿床学专业。通讯地址: 230009, 合肥工业大学资源与环境工程学院; Email: yf_hfur@163.com。

DOI: CNKI:11-1951/P. 20110512.0910.016 网络出版时间: 2011-5-12 9:10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110512.0910.016.html>

世的碎屑岩、碳酸盐岩以及侏罗纪—白垩纪的陆相火山岩夹碎屑岩(常印佛等,1991;翟裕生等,1992)。

宁芜盆地处于长江中下游断陷带内、郟庐断裂带南段,以方山-小丹山断裂、长江断裂带、芜湖断裂和南京-湖熟断裂为边界断裂(图1)。盆地中地层主要由三叠系中上统至侏罗系中下统组成,分布有三叠纪的青龙群、周冲村组、黄马青组及侏罗纪的象山群、西横山组以及火山岩系。宁芜盆地中生代陆相火山岩广泛发育,形成的火山-沉积岩系岩性、岩相变化较大,划分为四个喷溢堆积旋回,即龙王山旋回、大王山旋回、姑山旋回和娘娘山旋回(宁芜研究项目编写小组,1978;中国科学院地球化学研究所,1987;胡文瑄等,1991;Zhou et al., 2011);而侵入岩出露较少(图1)。

2 侵入岩地质特征

宁芜盆地侵入岩主要包括花岗岩类和辉长岩类。

花岗岩类侵入体出露零星,主要发育于盆地中段,大致北起施川、南达青山-四合山,西至宁芜铁路一线,东到南山、陶村及围屏山一带(图1)。花岗岩类侵入体大多呈小岩体产出,钻探和物探显示它们在深部可能相连,呈长轴35°方向的似橄榄形大岩基。岩性以石英二长岩(包括石英二长岩、石英闪长岩、石英二长斑岩、石英闪长玢岩、二长斑岩、石英斑岩等)和花岗岩(包括黑云母花岗岩、文象花岗岩、花岗斑岩等)为主。在牛落山南约26~2.5km的杨前一带,可见石英二长岩侵入于大王山旋回火山岩中,形成烘烤边和硅化蚀变;在西毗夏和南山等地,石英二长岩侵入含矿辉长闪长玢岩中;在霍里北约3.5km的小泉塘附近,娘娘山旋回火山角砾岩中部分角砾成分为硅化绢云母化石英二长岩;这些野外接触关系指示,石英二长岩侵入体可能形成于大王山旋回末期或姑山旋回,并晚于含矿的辉长闪长玢岩。在部分矿区可见黑云母花岗岩侵入穿切石英二长岩;在霍里山和十里长山地区文象花岗岩中有石英二长岩捕虏体;这些野外接触关系指示,花岗岩体侵入晚于石英二长岩体,可能形成于姑山旋回之后,与娘娘山旋回时代相近。

辉长岩类目前已知仅有4个岩体,均是在验证航磁异常时发现的隐伏岩体,即北段的高古山和大栏杆岩体、中段的阳湖塘岩体、南段801孔岩体(钟山西南2.5km)。

3 样品特征及测试方法

3.1 样品特征

本次工作选择了宁芜盆地内主要的5个花岗岩类侵入体:牛迹山岩体、霍里岩体、姑山岩体(姑山铁矿床钻孔中)、小石山岩体和娘娘山岩体,采集新鲜样品进行锆石年代学、锆石原位Lu-Hf同位素分析和Nd-Sr同位素分析,样号分别为NJS-01、LT-01、SGS-02、XSS-01、LT-02。各样品特征如下:

NJS-01(采样坐标N31°42′11.5″, E118°37′15.5″):牛迹山花岗斑岩,岩石呈肉红色,斑状结构,块状构造,主要矿物为条纹长石(60%)、石英(30%)、斜长石(约10%)及少量的黑云母等(<1%)。钾长石呈半自形-它形晶,可见聚片双晶,一般晶径2~3mm左右、最大达6mm。斜长石呈斑晶,粒径2~3mm,自形半自形板状,具不同程度的绢云母化、泥化;石英主要为它形晶,晶径约0.5~1mm,最大可达2mm。

LT-01(采样坐标N31°42′11.5″, E118°37′15.5″):霍里中粒文象花岗岩,岩石呈肉红色,文象结构,块状构造,岩石的主要矿物为条纹长石(70%)、石英(20%)、斜长石(约10%)及少量的黑云母等(<1%)。钾长石呈半自形它形晶,可见聚片双晶,一般晶径1~2mm左右、最大达4mm。斜长石呈似斑晶,粒径2~3mm,自形半自形板状,具不同程度的绢云母化、泥化;石英主要为它形晶,晶径约0.5~1mm,最大可达2mm。

SGS-02(采样坐标N31°42′11.5″, E118°37′15.5″):姑山岩体,样品采自姑山铁矿床中的钻孔,为中粒似斑状黑云母花岗岩,岩石呈肉红色,中粒似斑状花岗结构,块状构造。岩石主要矿物为钾长石(60%),半自形板柱状,它形粒状,粒径2~20mm,斜长石(10%),自形-半自形柱状板状,粒径2~4mm;石英(25%),它形粒状,粒径2~4mm;黑云母,片状,粒径2~5mm,含量5%。

XSS-01(采样坐标N31°42′11.5″, E118°37′15.5″):小石山石英正长岩,岩石呈暗红色,中粗粒结构,块状构造,偶见暗色岩石包体。岩石的主要矿物成分为正长石(80%)、斜长石(10%)、石英(8%)及少量黑云母等(<1%)。正长石呈它形粒状分布,粒径0.5~3mm,部分发生绢云母化、绿泥石化;斜长石含量较少,粒径1~3mm,自形半自形板状,部分高岭土化;石英呈它形颗粒,粒径0.2~0.8mm,充填于长石颗粒间隙中;暗色矿物以黑云母为

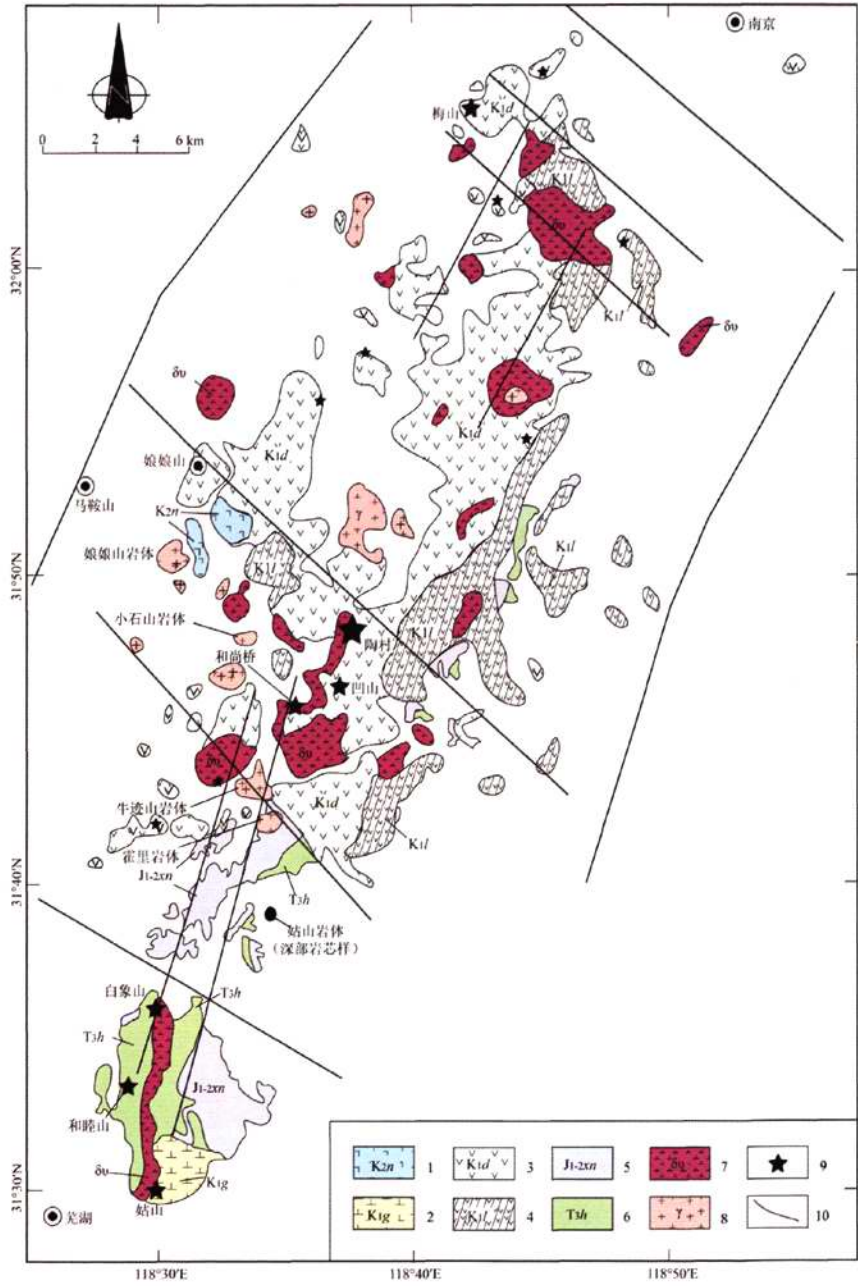


图 1 宁芜盆地地质略图(据宁芜研究项目编写小组,1978 修编)

Fig.1 Sketch geological map of the Ningwu volcanic basin (modified after Ningwu Research Group, 1978)

1—白垩系娘娘山组;2—白垩系姑山组;3—白垩系大王山组;4—白垩系龙王山组;5—侏罗系象山群;6—三叠系黄马青组;
7—闪长玢岩;8—花岗岩;9—矿床;10—断裂

1—Cretaceous Niangniangshan group; 2—Cretaceous Gushan group; 3—Cretaceous Dawangshan group; 4—Cretaceous Longwangshan group;
5—Jurassic Xiangshan group; 6—Triassic Huangmaqing group; 7—diorite porphyry; 8—granite; 9—ore deposit; 10—fault

主,呈半自形柱状。

LT-02 (采样坐标 N31° 42' 11. 5",

E118°37'15.5"):娘娘山碱长花岗岩,似斑状结构,块状构造。岩石的主要矿物为条纹长石(70%)、石

英(20%)、斜长石(8%)及少量的霓石、钠铁闪石和黑云母等(<2%)。条纹长石呈半自形它形晶,可见聚片双晶,一般晶径1~2 mm左右、最大达3 mm。斜长石呈似斑晶,粒径2~3 mm,自形-半自形板状,具不同程度的绢云母化,泥化;石英主要为它形晶,晶径约0.2~0.5 mm,最大可达2 mm。

3.2 测试方法

年代学测试采用锆石 LA-ICPMS 测年,同步进行锆石原位 Lu-Hf 同位素分析。测年样品首先经过破碎、浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石,然后在双目显微镜下挑纯,选样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石,粘于环氧树脂表面,经抛光后进行透射光和反射光照相,据此选择晶体特征良好的锆石进行阴极发光(CL)分析,最后根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行分析。

锆石 LA-ICPMS 测年和锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,采用 Agilent 公司的 Agilent 7500a ICPMS 和 MicroLas 公司的 GeoLas200M(193 nm)激光器,对样品进行一次性剥蚀完成,所得信号分别由 ICP-MS 与 MC-ICP-MS 两台仪器同时采集。激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气,斑束直径为 44 μm ,频率为 10 Hz,激光能量为 90 mJ,每个分析点的气体背景采集时间为 30 s,信号采集时间为 40 s。具体测试流程及数据采集分析参见第五春荣等(2008)、Yuan et al. (2008)文章。普通铅校正采用 Black et al. (2004)和 Harris et al. (2004)的方法,锆石谐和图用 Isoplot 程序(ver 3.0)获得(Harris et al., 2004)。 ϵ_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11}/\text{year}$,球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 、 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ (吴福元等, 2007);Hf 亏损地幔模式年龄(t_{DM1})的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ 。

Nd-Sr 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室进行,采用 Finnigan MAT262 质谱计测试。

4 测试结果

4.1 年代学

宁芜盆地花岗岩类侵入体中锆石为无色透明或浅黄色,结晶较好,呈典型的长柱状晶形(图2)。锆石中的 Th/U 比值(表1)均大于 0.1,属于典型的岩浆成因锆石(Belousova et al., 2002)。从锆石的阴极发

光图像(图2)可见,所有锆石均具有清晰的内部结构和典型的岩浆震荡环带,不具有核-幔结构,无后期变质壳,表明这些锆石是岩浆形成后一次结晶形成的,其形成年龄可以代表岩浆冷却结晶的年龄。

锆石 LA-ICP MS 测年数据见表1,谐和图见图3。牛迹山岩体(NJS-01)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $128.0 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=0.40);霍里岩体(LT-01)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $126.4 \pm 1.3 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=0.40);姑山岩体(SGS-02)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $129.8 \pm 1.6 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=0.80);小石山岩体(XSS-01)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $130.1 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=0.70);娘娘山岩体(LT-02)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $128.3 \pm 1.8 \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=0.80)。测试结果显示,宁芜盆地主要花岗岩类侵入岩的形成年龄在 126~130 Ma 之间。

4.2 同位素

宁芜盆地花岗岩类的 Nd-Sr 同位素及锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果见表2、表3。

花岗岩类的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 范围在 0.512102~0.512354 之间,平均值为 0.512255; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 范围在 0.704957~0.708725 之间,平均值为 0.706629; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 范围在 -7.25~-2.33 之间,平均值为 -4.25; $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 范围在 8.60~62.15 之间,平均值为 32.37;花岗岩类均具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 。

花岗岩类的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282420~0.283092 之间,平均为 0.282599; $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.010812~0.090526 之间,平均为 0.038644; $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.000395~0.002956 之间(小于 0.002),指示这些锆石在形成后放射成因 Hf 的积累极低。 $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 值为 -12.435~11.300,平均为 -6.102; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -9.840~13.910,平均值为 -3.407;单阶段模式年龄 t_{DM1} 平均为 931 Ma;两阶段模式年龄 t_{DM2} 平均为 1397 Ma; $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值在 -0.99~-0.91 之间,平均为 -0.96。其中,姑山岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 均为正值(4.973~11.300), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值(7.644~13.910)。

5 讨论

5.1 宁芜盆地花岗岩类的形成时代

近年来对宁芜火山岩盆地的研究在成岩、成矿同位素精确定年方面取得了重要进展。获得了一系列成矿年代学数据:凹山和东山铁矿床磷灰石的 Pb 同

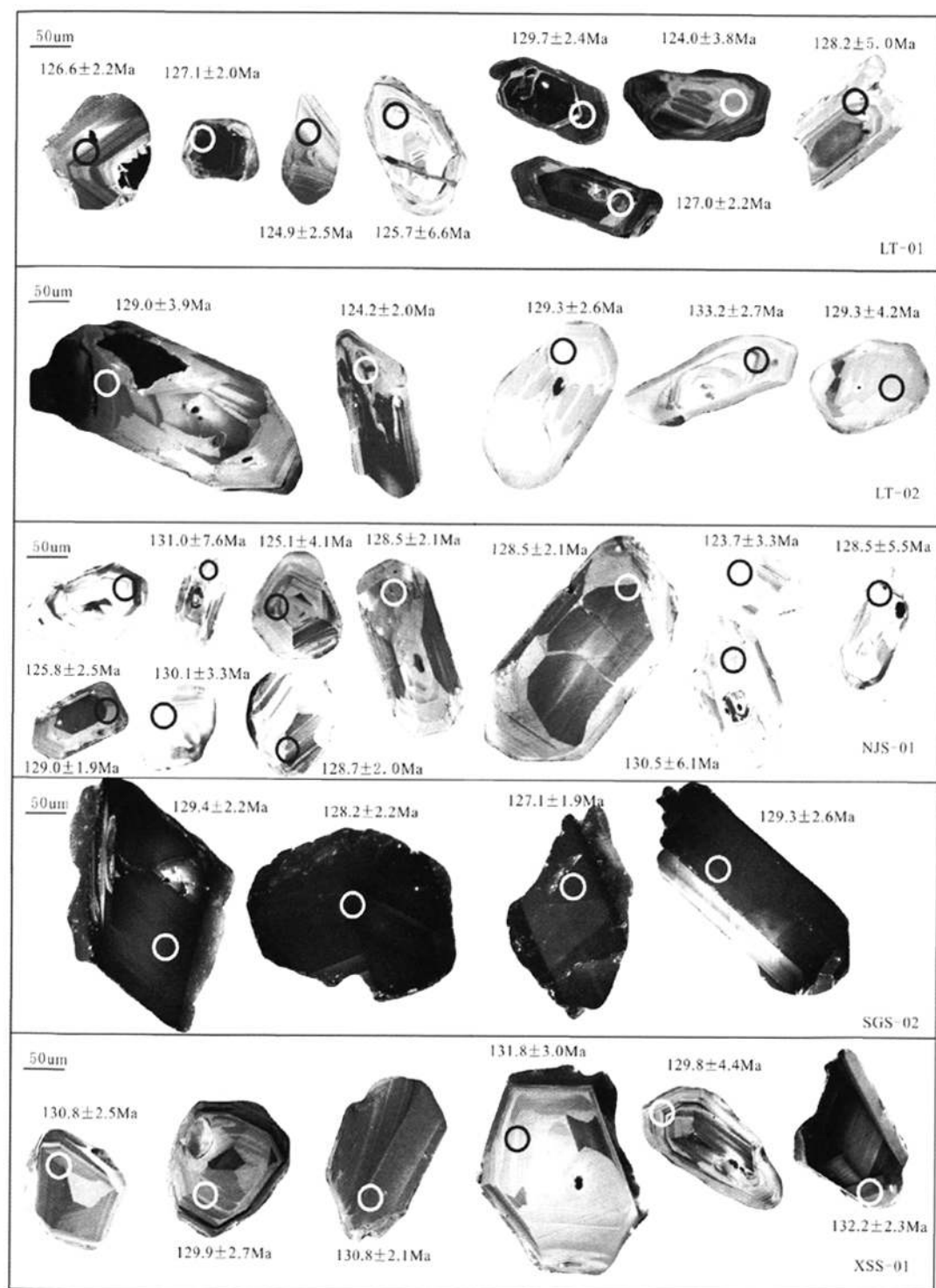


图2 宁芜盆地花岗岩类部分锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 2 CL images of zircons from the granitoids in the Ningwu basin, the circles are analytical points

表 1 宁芜盆地花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating for the zircon from the granitoids in the Ningwu basin

分析点	质量分数/10 ⁻⁶			n(²⁰⁷ Pb) /n(²⁰⁶ Pb)		n(²⁰⁷ Pb) /n(²³⁵ U)		n(²⁰⁶ Pb) /(n(²³⁸ U)		n(²⁰⁸ Pb) /n(²³² Th)		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	U	Th	Th/U	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
娘娘山岩体(LT-01)																	
LT 01-01	664	791	1.19	0.0493	0.0046	0.1363	0.0133	0.0201	0.00045	0.00483	0.00017	128.3	2.9	129.7	11.8	97.3	3.5
LT-01-02	333	441	1.33	0.0489	0.0022	0.1336	0.0064	0.0198	0.00035	0.00650	0.00018	126.6	2.2	127.3	5.7	130.9	3.6
LT-01-03	239	97.9	0.41	0.0491	0.0031	0.1321	0.0086	0.0196	0.00039	0.00573	0.00017	124.9	2.5	126.0	7.7	115.5	3.5
LT-01-04	322	11.4	0.04	0.0496	0.0113	0.1344	0.0313	0.0197	0.00105	0.00578	0.00092	125.7	6.6	128.0	27.9	116.4	18.5
LT 01-05	350	262	0.75	0.0487	0.0013	0.1325	0.0038	0.0198	0.00031	0.00623	0.00015	126.2	1.9	126.3	3.4	125.5	2.9
LT-01-06	327	545	1.67	0.0493	0.0059	0.1317	0.0163	0.0194	0.00060	0.00689	0.00036	124.0	3.8	125.6	14.5	138.8	7.3
LT-01-07	1348	2231	1.65	0.0492	0.0079	0.1360	0.0224	0.0201	0.00079	0.00650	0.00035	128.2	5.0	129.5	19.9	130.9	7.0
LT 01-08	694	324	0.47	0.0505	0.0012	0.1358	0.0035	0.0195	0.00030	0.00665	0.00015	124.6	1.9	129.3	3.1	134.0	3.1
LT-01 09	517	21.2	0.04	0.0504	0.0021	0.1380	0.0061	0.0199	0.00034	0.00646	0.00020	127.0	2.2	131.3	5.4	130.1	4.1
LT-01-10	1367	2810	2.06	0.0505	0.0027	0.1413	0.0078	0.0203	0.00038	0.00778	0.00020	129.7	2.4	134.2	6.9	156.7	4.0
LT-01-11	2247	2811	1.25	0.0496	0.0021	0.1330	0.0059	0.0195	0.00034	0.00639	0.00016	124.5	2.1	126.8	5.2	128.7	3.1
LT-01 12	2210	2899	1.31	0.0495	0.0015	0.1357	0.0045	0.0199	0.00032	0.00639	0.00015	127.1	2.0	129.2	4.0	128.7	3.1
LT-01 13	832	27.5	0.03	0.0490	0.0010	0.1344	0.0032	0.0199	0.00030	0.00633	0.00014	127.3	1.9	128.0	2.9	127.5	2.9
LT-01-14	457	451	0.99	0.0513	0.0164	0.1386	0.0453	0.0196	0.00144	0.00512	0.00083	125.2	9.1	131.8	40.2	103.3	16.6
霍里岩体(LT-02)																	
LT 02 01	161	164	1.02	0.0486	0.0024	0.1331	0.0067	0.0199	0.00035	0.00651	0.00021	127.1	2.2	126.9	5.9	131.1	4.2
LT-02-02	191	189	0.99	0.0575	0.0090	0.1598	0.0251	0.0201	0.00082	0.00841	0.00057	128.3	5.2	150.5	21.9	169.3	11.4
LT-02-03	1162	1693	1.46	0.0565	0.0019	0.1519	0.0053	0.0195	0.00032	0.00757	0.00024	124.2	2.0	143.6	4.7	152.4	4.8
LT-02-04	1459	1366	0.94	0.0493	0.0031	0.1419	0.0089	0.0209	0.00042	0.00658	0.00026	133.2	2.7	134.7	7.9	132.6	5.2
LT 02-05	268	229	0.85	0.0486	0.0065	0.1356	0.0183	0.0203	0.00067	0.00697	0.00043	129.3	4.2	129.1	16.3	140.3	8.6
LT-02 06	2076	1423	0.69	0.0525	0.0028	0.1464	0.0080	0.0202	0.00039	0.00674	0.00029	129.1	2.5	138.7	7.1	135.8	5.9
LT-02-07	236	212	0.90	0.0531	0.0078	0.1498	0.0219	0.0205	0.00075	0.00695	0.00044	130.5	4.7	141.7	19.3	139.9	8.7
LT-02-08	310	286	0.92	0.0514	0.0061	0.1432	0.0170	0.0202	0.00062	0.00630	0.00040	129.0	3.9	135.9	15.0	126.9	7.9
LT-02-09	283	264	0.94	0.0546	0.0092	0.1508	0.0254	0.0200	0.00085	0.00682	0.00055	127.6	5.4	142.6	22.4	137.4	11.1
LT-02-10	321	249	0.78	0.0514	0.0044	0.1432	0.0123	0.0202	0.00049	0.00747	0.00044	129.1	3.1	135.9	10.9	150.5	8.8
LT-02-11	420	329	0.78	0.0496	0.0031	0.1385	0.0089	0.0203	0.00041	0.00758	0.00041	129.3	2.6	131.7	7.9	152.6	8.1
牛迹山岩体(NJS-01)																	
NJS-01-01	218	271	1.24	0.0563	0.0039	0.1532	0.0106	0.0197	0.00040	0.00650	0.00019	125.8	2.5	144.7	9.3	131.0	3.9
NJS-01-02	122	87.9	0.72	0.0612	0.0143	0.1739	0.0403	0.0205	0.00121	0.01084	0.00099	131.0	7.6	162.8	34.7	218.0	19.8
NJS-01 03	124	81.9	0.66	0.0531	0.0070	0.1435	0.0191	0.0196	0.00064	0.00678	0.00044	125.1	4.1	136.2	16.9	136.7	8.9
NJS-01 04	103	81.7	0.79	0.0490	0.0025	0.1359	0.0071	0.0201	0.00033	0.00693	0.00019	128.5	2.1	129.4	6.3	139.6	3.8
NJS-01-05	160	140	0.87	0.0572	0.0022	0.1598	0.0062	0.0202	0.00031	0.00690	0.00017	129.0	1.9	150.5	5.4	139.0	3.5
NJS-01-06	99.1	74.7	0.75	0.0488	0.0051	0.1369	0.0143	0.0204	0.00053	0.00720	0.00034	130.1	3.3	130.3	12.7	145.0	6.9
NJS-01-07	138	129	0.93	0.0536	0.0022	0.1492	0.0062	0.0202	0.00031	0.00679	0.00018	128.7	2.0	141.2	5.4	136.9	3.5
NJS-01-08	97.8	68.6	0.70	0.0531	0.0056	0.1420	0.0150	0.0194	0.00053	0.00710	0.00036	123.7	3.3	134.8	13.3	142.9	7.2
NJS 01 09	122	103	0.85	0.0586	0.0065	0.1630	0.0182	0.0201	0.00060	0.00786	0.00041	128.5	3.8	153.3	15.8	158.2	8.3
NJS-01-10	147	119	0.81	0.0534	0.0104	0.1506	0.0295	0.0205	0.00096	0.00695	0.00065	130.5	6.1	142.4	26.0	139.9	13.1
NJS-01-11	132	106	0.80	0.0615	0.0103	0.1714	0.0286	0.0201	0.00087	0.00672	0.00052	128.5	5.5	160.6	24.7	135.4	10.4
姑山岩体(SGS-02)																	
SGS-02-01	689	845	1.23	0.0497	0.0024	0.1405	0.0069	0.0205	0.00033	0.00730	0.00017	130.8	2.1	133.5	6.1	147.0	3.4
SGS-02 02	1292	1447	1.12	0.0505	0.0028	0.1400	0.0077	0.0201	0.00035	0.00645	0.00016	128.2	2.2	133.0	6.9	130.0	3.3
SGS-02-03	1726	1864	1.08	0.0488	0.0020	0.1338	0.0056	0.0199	0.00030	0.00636	0.00016	127.1	1.9	127.5	5.0	128.2	3.2
SGS-02-04	1828	2650	1.45	0.0495	0.0021	0.1416	0.0059	0.0208	0.00032	0.00790	0.00020	132.4	2.0	134.5	5.3	159.1	4.0
SGS-02-05	1277	1875	1.47	0.0489	0.0036	0.1364	0.0100	0.0203	0.00042	0.00622	0.00021	129.3	2.6	129.8	8.9	125.3	4.2
SGS-02-06	952	1307	1.37	0.0497	0.0025	0.1388	0.0069	0.0203	0.00034	0.00654	0.00020	129.4	2.2	132.0	6.2	131.9	4.0
SGS-02 07	57.3	19.2	0.34	0.0486	0.0023	0.1378	0.0066	0.0206	0.00034	0.00833	0.00025	131.4	2.2	131.1	5.8	167.7	5.0
小石山岩体(XSS-01)																	
XSS-01-01	399	356	0.89	0.0538	0.0034	0.1523	0.0095	0.0205	0.00040	0.00688	0.00021	130.8	2.5	143.9	8.4	138.5	4.3
XSS-01-02	126	108	0.85	0.0503	0.0076	0.1496	0.0228	0.0216	0.00078	0.00740	0.00045	137.9	5.0	141.6	20.1	149.1	9.1
XSS-01-03	232	246	1.06	0.0514	0.0023	0.1454	0.0065	0.0205	0.00033	0.00659	0.00016	130.8	2.1	137.8	5.7	132.9	3.2
XSS-01-04	357	414	1.16	0.0523	0.0029	0.1494	0.0082	0.0207	0.00037	0.00629	0.00017	132.2	2.3	141.4	7.3	126.8	3.4
XSS 01 05	141	105	0.74	0.0536	0.0072	0.1506	0.0201	0.0203	0.00069	0.00662	0.00040	129.8	4.4	142.4	17.7	133.3	8.0
XSS-01-06	122	102	0.83	0.0495	0.0031	0.1363	0.0086	0.0200	0.00036	0.00657	0.00020	127.6	2.3	129.7	7.7	132.4	4.0
XSS-01-07	115	113	0.98	0.0493	0.0075	0.1419	0.0218	0.0209	0.00076	0.00739	0.00042	133.4	4.8	134.7	19.3	148.8	8.5
XSS-01-08	118	101	0.86	0.0497	0.0044	0.1414	0.0125	0.0207	0.00048	0.00750	0.00029	131.8	3.0	134.3	11.1	151.1	5.8
XSS-01 09	160	162	1.01	0.0485	0.0028	0.1332	0.0078	0.0200	0.00036	0.00632	0.00019	127.4	2.3	127.0	7.0	127.4	3.7
XSS-01 10	120	113	0.94	0.0478	0.0047	0.1361	0.0134	0.0207	0.00052	0.00667	0.00028	132.2	3.3	129.6	11.9	134.3	5.7
XSS-01-12	135	119	0.88	0.0508	0.0036	0.1424	0.0102	0.0204	0.00043	0.00647	0.00025	129.9	2.7	135.2	9.1	130.3	5.0
XSS-01-14	133	131	0.98	0.0478	0.0044	0.1327	0.0122	0.0201	0.00048	0.00642	0.00026	128.6	3.0	126.5	10.9	129.3	5.3
XSS 01 15	134	111	0.83	0.0509	0.0028	0.1411	0.0077	0.0201	0.00037	0.00644	0.00022	128.3	2.3	134.0	6.9	129.7	4.4

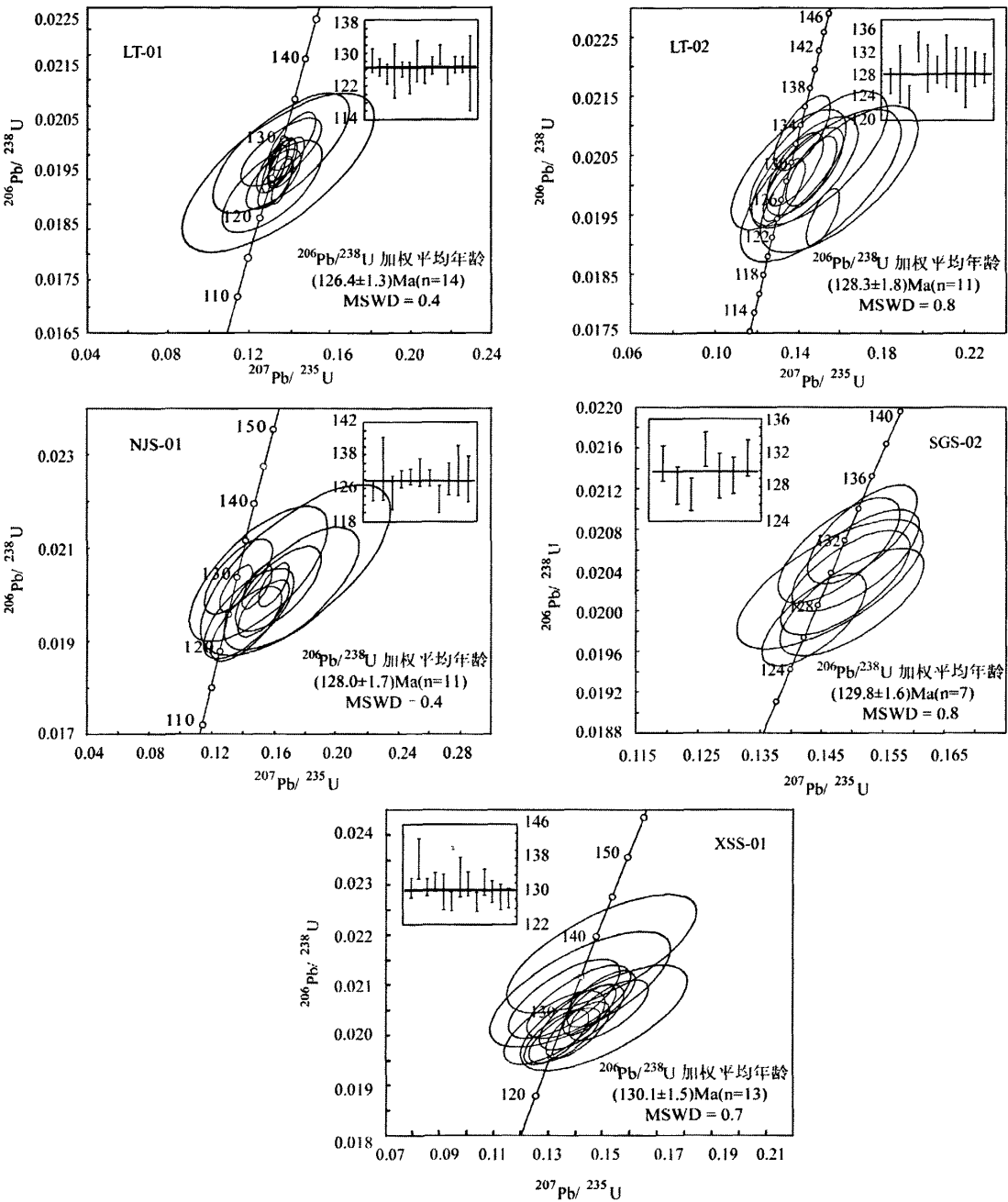


图 3 宁芜盆地花岗岩类锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig. 3 Pb-U concordia diagrams of zircons from the granitoids in the Ningwu basin

位素年龄为 124 Ma(马芳等,2006);梅山和陶村铁矿床钠长石 Ar-Ar 年龄分别为 122.90 Ma、124.89 Ma(余金杰等,2002);东山铁矿床中新鲜阳起石 Ar-Ar 年龄为 126~129 Ma、凹山铁矿床中蚀变阳起石 Ar-Ar 年龄为 114 Ma(马芳等,2010);凹山铁

矿床赋矿辉石闪长玢岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 123~127 Ma(胡劲平等,2010);凹山、陶村、和尚桥、东山、白象山、和睦山、姑山铁矿床中赋矿闪长玢岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄分别为 130.2 Ma、130.7 Ma、131.1 Ma、131.1 Ma、130.0 Ma、

表 2 宁芜盆地花岗岩类 Nd-Sr 同位素组成

Table 2 Nd-Sr isotopic compositions of the granitoids in the Ningwu basin

岩体名称	小石山岩体	娘娘山岩体	霍里岩体	牛迹山岩体	姑山岩体
样号	XXS-01	LT-01	LT-02	NJS-01	SGS-02
Sm($\times 10^{-6}$)	6.79	19.42	3.93	3.51	3.75
Nd($\times 10^{-6}$)	37.56	106.77	25.11	17.42	21.46
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.109297	0.109932	0.120400	0.121960	0.113810
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512392	0.512446	0.512395	0.512204	0.512320
(2σ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) _i	0.512299	0.512354	0.512295	0.512102	0.512223
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)(\text{‰})$	-3.36	-2.33	-3.51	-7.25	-4.83
TDM	1109.15	1036.35	1235.30	1572.00	1268.04
T ₂ DM	1197.96	1112.74	1207.56	1512.46	1317.74
Rb($\times 10^{-6}$)	4.18	180.32	293.20	183.10	168.00
Sr($\times 10^{-6}$)	407.02	534.93	97.17	160.60	362.30
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.029745	0.975668	8.744801	3.301623	1.115000
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706794	0.707641	0.720667	0.712868	0.710782
(2σ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i	0.706739	0.705861	0.704957	0.706861	0.708725
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)(\text{‰})$	33.96	21.47	8.60	35.66	62.15

131.1 Ma、129.2 Ma(范裕等,2010);白象山、和睦山、陶村铁矿床中与磁铁矿共生的金云母 Ar-Ar 年龄分别为 134.9 Ma、132.9 Ma、128 Ma(袁顺达等,2010);阴山辉石闪长玢岩(与铁矿化有关)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 127.8 Ma(薛怀民等,2010);陶村、白象山、和睦山矿床中与磁铁矿共生的金云母 Ar-Ar 年龄分别为 129.3 $\pm$ 1.1 Ma、130.7 $\pm$ 1.1 Ma 和 129.1 $\pm$ 0.9 Ma(范裕等,2011)。在成岩年代学方面,基本厘定了宁芜盆地火山岩的时间格架:张旗等(2003)给出龙王山组和大王山组锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 131.0 $\pm$ 4.0 Ma、127.0 $\pm$ 3.0 Ma;闫峻等(2009)测得娘娘山组锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 130.6 $\pm$ 1.1 Ma;侯可军等(2010)获得大王山组粗安岩锆石 U-Pb 年龄为 130.3 $\pm$ 0.9 Ma,姑山组两个粗安岩锆石 U-Pb 年龄分别为 128.2 $\pm$ 1.3 Ma 和 128.5 $\pm$ 1.8 Ma;Zhou et al.(2011)系统确定了宁芜盆地龙王山、大王山、姑山、娘娘山 4 个旋回火山岩的活动时限在 134.8 $\pm$ 1.3~126.6 $\pm$ 1.1 Ma,并指出其完全可与庐枞盆地的龙门院、砖桥、双庙、浮山 4 个旋回火山岩的形成时限(134.8 $\pm$ 1.8~127.1 $\pm$ 1.2 Ma,Zhou et al.,2008)对比。有关宁芜盆地侵入岩的年代学资料较少,侯可军等(2010)最近测得了朱门镇附近的侵入花岗斑岩、石山村附近的斜长花岗岩、吉山铁矿中的辉长闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 127.1 $\pm$ 1.2 Ma、128.3 $\pm$ 0.6 Ma、128.2 $\pm$ 1.0 Ma。

本文对宁芜盆地内主要的花岗岩类侵入体牛迹

山岩体、霍里岩体、姑山岩体、小石山岩体和娘娘山岩体进行了 LA-ICPMS 法锆石 U-Pb 精确测年,获得其形成时间分别为 128.0 $\pm$ 1.7 Ma、126.4 $\pm$ 1.3 Ma、129.8 $\pm$ 1.6 Ma、130.1 $\pm$ 1.5 Ma、128.3 $\pm$ 1.8 Ma。结合已有的部分花岗岩类侵入体年龄数据,可以认为,宁芜盆地的花岗岩类形成于 126~130 Ma 之间,均为早白垩世岩浆活动的产物;对比宁芜盆地火山岩的时间格架,花岗岩类侵入体与姑山、娘娘山旋回火山岩的活动时限相当;同时,略晚于目前获得的玢岩型铁矿的成矿时代。

5.2 岩浆起源与演化的同位素制约

宁芜盆地花岗岩类具有较高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值(均值 0.706629)和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(均值 -4.25‰),显示同位素富集特征(Zindler et al.,1986),可能与岩浆来源于交代地幔或幔源岩浆受壳源物质混染有关,同时, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 范围在 -7.25‰~-2.33‰之间,高于扬子克拉通富集型岩石圈地幔的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-8 左右,薛怀民等,2010),指示有部分软流圈地幔物质的加入。在 $I_{\text{Sr}}-(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 关系由(图 4a)中可见,宁芜盆地花岗岩类岩浆均位于 EMI 型富集地幔和洋岛玄武岩过渡区域,远离亏损地幔和 EM II 型富集地幔端元,显示源区与 EMI 型富集地幔特征相近。刘洪等(2002)、袁峰等(2008)对于庐枞盆地火山岩的研究中,均有源区具有 EMI 型富集地幔特征的认识,袁峰等(2008)进一步指出庐枞盆地火山岩在形成过程中还受到了结晶分异和同化混染的共同作用。对于具 EMI 富集特征的洋岛玄武岩,

表 3 宁芜盆地花岗岩类锆石 Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Lu-Hf isotopic compositions of zircons from the granitoids in the Ningwu basin

样号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	e _{Hf} (0)	e _{Hf} (t)(‰)	2σ	T _{DM1} (Ma)	T _{DM2} (Ma)	f _{Lu/Hf}
小石山岩体(XXS-01)												
XSS-01-01	0.031495	0.000243	0.001120	0.000007	0.282659	0.000022	-4.013	-1.258	0.767	844	1263	-0.97
XSS-01-02	0.014624	0.000104	0.000508	0.000005	0.282627	0.000026	-5.111	-2.303	0.908	874	1329	-0.98
XSS-01-03	0.025851	0.000588	0.000857	0.000019	0.282690	0.000020	-2.907	-0.128	0.710	794	1191	-0.97
XSS-01-04	0.016036	0.000333	0.000534	0.000009	0.282677	0.000026	-3.360	-0.554	0.906	805	1218	-0.98
XSS-01-05	0.011749	0.000084	0.000404	0.000002	0.282670	0.000022	-3.601	-0.784	0.784	812	1233	-0.99
娘娘山岩体(LT-01)												
LT-01-01	0.062600	0.000246	0.002069	0.000012	0.282420	0.000040	-12.435	-9.840	1.417	1211	1803	-0.94
LT-01-02	0.050588	0.000902	0.001664	0.000027	0.282454	0.000027	-11.250	-8.620	0.947	1150	1726	-0.95
LT-01-02	0.024466	0.000514	0.000909	0.000021	0.282541	0.000029	-8.160	-5.467	1.029	1004	1527	-0.97
LT-01-04	0.057340	0.000141	0.001785	0.000004	0.282522	0.000033	-8.849	-6.229	1.172	1056	1575	-0.95
LT-01-05	0.024251	0.000206	0.000906	0.000005	0.282722	0.000031	-1.757	0.938	1.079	749	1120	-0.97
LT-01-06	0.067383	0.000146	0.002275	0.000004	0.282451	0.000022	-11.361	-8.782	0.777	1173	1736	-0.93
LT-01-07	0.012574	0.000167	0.000451	0.000004	0.282583	0.000025	-6.683	-3.950	0.880	934	1431	-0.99
LT-01-08	0.070497	0.001054	0.002400	0.000030	0.282438	0.000027	-11.803	-9.234	0.951	1196	1764	-0.93
LT-01-09	0.054783	0.000539	0.001795	0.000012	0.282480	0.000030	-10.332	-7.713	1.048	1116	1669	-0.95
LT-01-10	0.022715	0.000152	0.000748	0.000006	0.282552	0.000029	-7.793	-5.086	1.023	985	1503	-0.98
LT-01-11	0.082498	0.000842	0.002140	0.000026	0.282471	0.000033	-10.638	-8.048	1.180	1139	1690	-0.94
LT-01-12	0.050502	0.000417	0.001709	0.000014	0.282524	0.000031	-8.755	-6.128	1.095	1050	1568	-0.95
LT-01-13	0.090526	0.000765	0.002959	0.000030	0.282517	0.000040	-9.023	-6.501	1.414	1098	1592	-0.91
LT-01-14	0.042968	0.000669	0.001553	0.000029	0.282517	0.000028	-9.008	-6.368	0.974	1056	1584	-0.95
LT-01-15	0.051389	0.000090	0.001837	0.000003	0.282481	0.000030	-10.300	-7.685	1.069	1116	1667	-0.94
LT-01-16	0.077739	0.001667	0.002559	0.000033	0.282422	0.000023	-12.393	-9.838	0.808	1225	1802	-0.92
霍里岩体(LT-02)												
LT-02-01	0.017377	0.000140	0.000617	0.000005	0.282544	0.000023	-8.064	-5.305	0.820	993	1518	-0.98
LT-02-02	0.049435	0.000322	0.001754	0.000010	0.282436	0.000021	-11.896	-9.234	0.750	1179	1766	-0.95
LT-02-03	0.015567	0.000307	0.000550	0.000012	0.282548	0.000023	-7.913	-5.148	0.812	985	1508	-0.98
LT-02-04	0.086784	0.002580	0.002922	0.000077	0.282428	0.000039	-12.151	-9.588	1.393	1228	1788	-0.91
LT-02-05	0.045354	0.000400	0.001634	0.000013	0.282474	0.000020	-10.530	-7.858	0.715	1120	1679	-0.95
LT-02-06	0.016343	0.000031	0.000593	0.000002	0.282513	0.000024	-9.173	-6.412	0.845	1036	1588	-0.98
LT-02-07	0.017968	0.000165	0.000663	0.000007	0.282512	0.000026	-9.191	-6.437	0.912	1038	1590	-0.98
LT-02-08	0.037651	0.000765	0.001407	0.000025	0.282438	0.000026	-11.810	-9.119	0.929	1164	1759	-0.96
LT-02-09	0.013757	0.000573	0.000492	0.000020	0.282468	0.000026	-10.747	-7.978	0.930	1095	1687	-0.99
LT-02-10	0.017688	0.000360	0.000615	0.000011	0.282445	0.000026	-11.564	-8.806	0.911	1130	1739	-0.98
LT-02-11	0.014688	0.000088	0.000527	0.000004	0.282461	0.000029	-11.005	-8.239	1.043	1106	1704	-0.98
LT-02-12	0.010812	0.000201	0.000395	0.000006	0.282476	0.000029	-10.470	-7.693	1.014	1081	1669	-0.99
LT-02-13	0.012044	0.000146	0.000424	0.000005	0.282543	0.000028	-8.107	-5.331	0.992	989	1520	-0.99
牛迹山岩体(NJS-01)												
NJS-01-01	0.036989	0.000717	0.001255	0.000024	0.282647	0.000022	-4.407	-1.707	0.779	863	1290	-0.96
NJS-01-02	0.018939	0.000110	0.000667	0.000003	0.282654	0.000023	-4.164	-1.415	0.812	840	1271	-0.98
NJS-01-03	0.033902	0.000635	0.001162	0.000021	0.282629	0.000024	-5.066	-2.359	0.865	887	1331	-0.96
NJS-01-04	0.039630	0.000366	0.001309	0.000010	0.282696	0.000041	-2.695	0.000	1.457	795	1181	-0.96
NJS-01-05	0.024646	0.000582	0.000876	0.000022	0.282693	0.000024	-2.787	-0.055	0.832	790	1185	-0.97
NJS-01-06	0.022074	0.000325	0.000780	0.000008	0.282585	0.000027	-6.610	-3.871	0.948	939	1427	-0.98
NJS-01-07	0.034280	0.000513	0.001206	0.000019	0.282682	0.000025	-3.180	-0.476	0.875	813	1211	-0.96
NJS-01-08	0.020863	0.000097	0.000745	0.000005	0.282628	0.000023	-5.084	-2.342	0.815	878	1330	-0.98
NJS-01-09	0.034794	0.000345	0.001182	0.000010	0.282655	0.000027	-4.155	-1.449	0.962	851	1273	-0.96
NJS-01-10	0.015509	0.000073	0.000542	0.000002	0.282621	0.000030	-5.330	-2.571	1.061	883	1344	-0.98
NJS-01-11	0.026297	0.000362	0.000937	0.000013	0.282690	0.000029	-2.910	-0.183	1.014	796	1193	-0.97
NJS-01-12	0.023020	0.000159	0.000814	0.000008	0.282616	0.000027	-5.509	-2.772	0.944	897	1357	-0.98
NJS-01-13	0.028385	0.000292	0.000993	0.000012	0.282674	0.000025	-3.478	-0.756	0.868	820	1229	-0.97
姑山岩体(SGS-02)												
SGS-02-01	0.075262	0.000523	0.002362	0.000023	0.283018	0.000021	8.715	11.362	0.738	343	457	-0.93
SGS-02-02	0.058708	0.000520	0.001831	0.000011	0.282963	0.000021	6.748	9.439	0.745	419	581	-0.94
SGS-02-03	0.086253	0.000247	0.002804	0.000006	0.283092	0.000038	11.300	13.910	1.346	238	294	-0.92
SGS-02-04	0.062034	0.000065	0.002055	0.000006	0.282913	0.000022	4.973	7.644	0.777	495	695	-0.94
SGS-02-05	0.069849	0.000522	0.002197	0.000019	0.283012	0.000026	8.479	11.140	0.915	352	472	-0.93

Weaver et al. (1986) 认为是板块俯冲将深海沉积物 带入地幔并与正常洋岛玄武岩的源区物质混合而

成, Tatsumoto et al. (1991)、许文良等(2004)用与古板块俯冲带有关的地幔交代作用机制来解释中国东北、日本海及部分日本岛弧具 EMI 特征玄武岩的成因。因此 Nd-Sr 同位素指示, 宁芜盆地花岗岩类源于交代地幔源区, 其性质接近于 EMI 型富集地幔, 其形成与古板块的俯冲交代作用有关。

宁芜盆地花岗岩类的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围为 $-9.840\text{‰} \sim 13.910\text{‰}$, 其中, 姑山岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值 ($7.644\text{‰} \sim 13.910\text{‰}$), 均位于球粒陨石线之上、亏损地幔线之下 (图 4b); 其余 4 个花岗岩类岩体 (牛迹山岩体、霍里岩体、小石山岩体和娘娘山岩体) 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-9.840\text{‰} \sim 0.938\text{‰}$, 均值为 -4.908‰ , 主要数据点均在球粒陨石线之下, 变化于球粒陨石与地壳演化线之间 (图 4b), 显示岩浆源区为富集地幔或者幔源岩浆受地壳物质混染的特点。侯可军等(2010)测得宁芜盆地大王山组粗安岩、姑山组粗安岩、朱门镇附近侵入花岗斑岩、石山村附近斜长花岗岩、吉山铁矿中辉长闪长岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-6.9\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$, 认为其岩浆源自于岩石圈富集地幔部分熔融并在上升过程中受地壳物质的混染。胡劲平等(2010)获得宁芜盆地凹山铁矿赋矿辉长闪长玢岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-8.6\text{‰} \sim -6.3\text{‰}$, 指出该岩石的形成可能与富集岩石圈地幔熔融及地壳物质混合有关, 同时, 与侯可军等(2010)的数据对比后认为, 凹山铁矿赋矿辉长闪长玢岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值更低, 指示其受到了更多的地壳物质

混染, 进一步指示该岩浆可能在地壳中停留的时间较长、结晶时间较晚, 而这一特征很可能有利于铁等成矿元素早期较少进入暗色硅酸盐矿物而倾向于晚期独立富集成矿。本文的数据显示, 牛迹山、霍里、小石山和娘娘山等花岗质岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与吉山铁矿辉长闪长岩、凹山铁矿赋矿辉长闪长玢岩相似, 指示宁芜盆地花岗岩类与成矿的闪长(玢)岩在岩浆起源和演化上存在联系; 而姑山岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值, 可能指示了更多的地幔组分参与成岩。

5.3 地球动力学背景

长江中下游地区自晋宁期以来, 经历了古生代盖层沉积阶段和中生代板内变形阶段, 受特提斯构造域、古太平洋构造域和深部壳幔作用过程复合形成的中生代转换构造背景控制, 长期的构造-岩浆作用形成了断隆区和断凹区的次级构造格局以及一系列陆相火山断陷盆地 (常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 周涛发等, 2008)。长江中下游地区中生代岩浆岩的形成受中国东部中生代燕山期地球动力学背景的制约, 侏罗纪—白垩纪之交, 太平洋板块开始向欧亚大陆俯冲, 大致向西的俯冲导致大体南北向的拉张, 扬子—华北岩石圈边界这一薄弱地带的拉张达到了较大的深度, 导致了地幔上涌、岩石圈熔融以及地壳部分熔融 (Li et al., 2003; Ling et al., 2009; Sun et al., 2010)。吴福元等(2003)认为中国东部岩石圈减薄发生在晚中生代, 且在 $150 \sim 120 \text{ Ma}$ 的早白垩世达到高潮; 而郯庐断裂带于早白垩世初

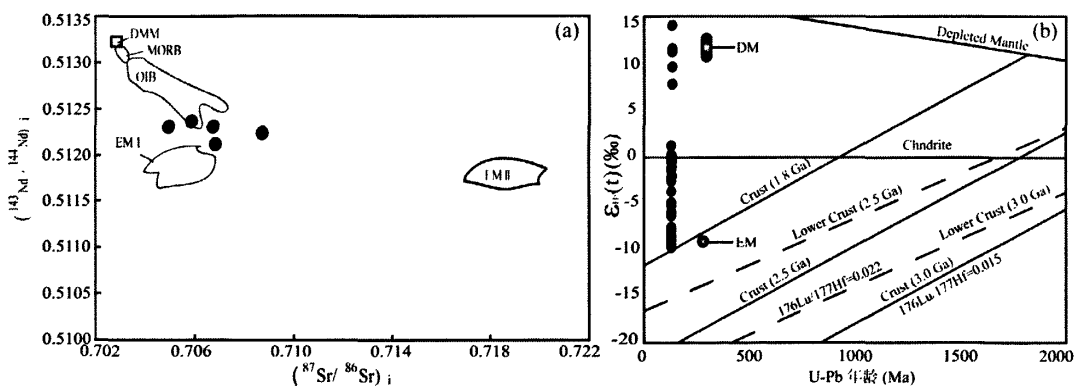


图 4 宁芜盆地花岗岩类 Nd-Sr 同位素(a)及锆石 Hf 同位素(b)特征

Fig. 4 Nd-Sr (a) and Zircon Hf (b) isotopic features of the granitoids in the Ningwu basin

(a): 底图据 Zindler et al., 1986; MORB—洋脊玄武岩, OIB—洋岛玄武岩, EMI—富集地幔端元, DMM—亏损地幔端元;

(b): EM—华北克拉通岩石圈地幔 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (Chen et al., 2008), DM—东准噶尔地区亏损地幔 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (唐红峰等, 2008)

(a): After Zindler et al., 1986; MORB—mid-ocean ridge basalt, OIB—ocean island basalt, EMI—enriched mantle components, DMM—depleted mantle component. (b): EM— $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ for lithosphere mantle of Northern China Craton (from Chen et al., 2008), DM— $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ for depleted mantle of Eastern Junggar (from Tang et al., 2008)

(143 Ma)发生了大规模的左行平移(朱光等,2004,2005);袁峰等(2008)识别了庐枞盆地早白垩世存在由挤压-拉张过渡背景转为典型张性背景的构造转换,转换时间为130.5 Ma左右;庐枞和宁芜盆地火山活动的持续时间较短、没有明显的时间间隔,暗示了130 Ma前后处于拉张的峰期(周涛发等,2007;范裕等,2008;闫竣等,2009);繁昌盆地火山活动时间(135~128 Ma)同样处于中国东部岩石圈减薄的高峰期(袁峰等,2010)。而机械拆沉可能是中国东部岩石圈减薄的主要机制(薛怀民等,2010;刘海泉等,2010)。宁芜盆地的花岗岩类形成于126~130 Ma之间,与姑山、娘娘山旋回火山岩的活动时限相当,同样处于中国东部岩石圈减薄高峰期的地球动力学背景,为典型张性的构造应力体制产物。

6 结论

(1)宁芜盆地内主要的花岗岩类侵入体牛迹山岩体、霍里岩体、姑山岩体、小石山岩体和娘娘山岩体的LA-ICPMS锆石U-Pb年龄分别为 128.0 ± 1.7 Ma、 126.4 ± 1.3 Ma、 129.8 ± 1.6 Ma、 130.1 ± 1.5 Ma、 128.3 ± 1.8 Ma,均为早白垩世岩浆活动的产物;盆地内花岗岩类侵入体形成于126~130 Ma之间,与姑山、娘娘山旋回火山岩活动时限相当,略晚于玢岩型铁矿的成矿时代。

(2)Nd-Sr同位素指示,宁芜盆地花岗岩类源于交代地幔源区,其性质接近于EMI型富集地幔,其形成与古板块的俯冲交代作用有关;Lu-Hf同位素指示,宁芜盆地花岗岩类与成矿的闪长(玢)岩在岩浆起源和演化上存在联系。

(3)宁芜盆地花岗岩类形成于中国东部岩石圈减薄高峰期的地球动力学背景,为典型张性构造应力体制的产物。

致谢:本文的研究工作得到了常印佛院士、唐永成教授和李建设教授的指导和帮助,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌.1991.长江中下游铜铁成矿带:地质出版社.
- 陈毓川,盛继福,艾永德.1981.梅山铁矿——一个矿浆热液矿床.中国地质科学院矿床地质研究所文集,(2):26.
- 第五春荣,孙勇,袁洪林,王洪亮,钟兴平,柳小明.2008.河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成及其地质意义.科学通报,53(18):1923~1934.
- 范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明,Cooke D R.2008.安徽庐江-枞阳地区A型花岗岩的LA-ICP-MS定年及其地质意义.岩石学报,24(8):1715~1724.
- 范裕,周涛发,袁峰,张乐骏,钱兵,马良,Cooke D R.2010.宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义.岩石学报,26(9):2715~2728.
- 范裕,周涛发,袁峰,张乐骏,钱兵,马良,谢杰,杨西飞.2011.宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代:金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学研究.地质学报,本期.
- 侯可军,袁顺达.2010.宁芜盆地火山-次火山岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义.岩石学报,26(3):888~902.
- 胡幼平,蒋少涌.2010.宁芜盆地浅成侵入岩的锆石U-Pb年代学和Hf同位素研究及其地质意义.高校地质学报,16(3):294~308.
- 胡文瑛.1991.宁芜和庐枞地区陆相火山喷气沉积-热液叠加改造型铁、硫矿床.北京:地质出版社.
- 林新多.1999.岩浆-热液过渡型矿床.武汉:中国地质大学出版社.
- 刘海泉,闫竣,赵建新,安亚军.2010.中国东部部分地区新生代岩石圈地幔的成因:主量和微量元素制约.岩石学报,26(09):2850~2868.
- 刘洪,邱检生.2002.安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约.地球化学,31(2):129~140.
- 卢冰,蔺雨时.1990.宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨.矿床地质,9(1):13~25.
- 马芳,蒋少涌,姜耀辉,王汝成,凌洪飞,倪培.2006.宁芜地区玢岩铁矿Pb同位素研究.地质学报,80(2):279~286.
- 马芳,蒋少涌,薛怀民.2010.宁芜盆地四山和东山铁矿床中阳起石的激光 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代学研究.矿床地质,29(2):283~289.
- 宁芜玢岩铁矿编写组.1978.宁芜玢岩铁矿.北京:地质出版社.
- 唐红峰,赵志瑞,黄荣生,韩玉捷,苏玉平.2008.新疆东准噶尔A型花岗岩的锆石Hf同位素初步研究.矿物学报,28(4):335~342.
- 王元龙,张旗,王焰.2001.宁芜火山岩的地球化学特征及其意义.岩石学报,17(4):565~575.
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽.2003.中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题.地学前缘,10(3):51~60.
- 吴福元,李献华,郑永飞,高山.2007.Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185~220.
- 谢智,李全忠,陈江峰,高天山.2007.庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义.高校地质学报,13(2):235~249.
- 邢凤鸣,徐祥.1999.安徽扬子岩浆岩带与成矿.合肥:安徽人民出版社,1~170.
- 徐夕生,谢昕.2005.中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用.高校地质学报,11(3):318~334.
- 许继峰,王强,徐义刚,赵振华,熊小林.2001.宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学:亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制.岩石学报,17(4):576~584.
- 许文良,王冬艳,王清海,裴福萍,林景仟.2004.华北地块中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 ^{40}Ar / ^{39}Ar 定年:对岩石圈减薄时间的制约.地球化学,34(5):221~232.
- 薛怀民,董树文,马芳.2010.长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄.岩石学报,26(9):2653~2664.

- 同峻, 刘海泉, 宋传中, 徐夕生, 安亚军, 刘佳, 戴立群. 2009. 长江中下游繁昌-宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 54(12): 1716~1724.
- 余金杰, 毛景文, 张长青. 2007. 地幔流体与宁芜岩体铁矿成矿——碳、锶同位素证据. 自然科学进展, 17(9): 1216~1221.
- 余金杰, 毛景文. 2002. 宁芜岩体铁矿钠长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及意义. 自然科学进展, 12(10): 1059~1063.
- 余金杰. 2003. 宁芜地区凹山和太山铁矿床中磷灰石 Sr 同位素特征及意义. 地质论评, 49(3): 272~276.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(8): 1691~1702.
- 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 2010. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义. 岩石学报, 26(3): 797~808.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京: 地质出版社, 1~145.
- 张旗, 简平, 刘敦一, 王元龙, 钱青, 王焰, 薛怀民. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. 中国科学: D 辑, 33(4): 309~314.
- 中国科学院地球化学研究所. 1987. 宁芜型铁矿床形成机理. 北京: 科学出版社.
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665~1678.
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘璐, 吴明安. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10): 583~591.
- 朱光, 牛漫兰, 刘国生, 王勇生, 谢成龙, 李长城. 2005. 郯庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年. 地质学报, 79(3): 308~316.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 牛漫兰, 宋传中. 2004. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学, 39(1): 36~49.
- Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. 1998. Trace Element Composition and Catholuminescence Properties of Southern African Kimberlitic Zircons. Mineralogical Magazine, 62: 355~366.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Charlotte M A, Donald W D, John N A, John W V, Roland M, Ian H C, Russell J K, Ian S W and Chris F. 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, LA-ICP-MS, and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. Chemical Geology, 205(1): 115~140.
- Chen Bin, Tian Wei and Chen Zhichao. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and insitu Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusive complex in the South Taihang orogen, north China craton: Evidence for hybridization between mantle- and crust-derived magmas. Lithos, 102: 118~137.
- Harris A C, Allen C M, Bryan S E, Campbell I H, Holcombe R J and Palin J M. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of regional volcanism hosting the Alumbrera Cu-Au deposit: implications for porphyry-related mineralization. Mineralium Deposita, 39(2): 46~67.
- Hou Tong, Zhang Zhaochong, Du Yangsong, Li Shunting. 2009. Geology of the Gushan iron oxide deposit associated with dioritic porphyries, eastern Yangtze craton, SE China. International Geology Review, 51(6): 520~541.
- Hou Tong, Zhang Zhaochong, Encarnacion J, Du Yangsong, Zhao Zhidan, Liu Junlai. 2010. Geochemistry of Late Mesozoic dioritic porphyries associated with Kiruna-style and stratabound carbonate-hosted Zhonggu iron ores, Middle-Lower Yangtze Valley, Eastern China: Constraints on petrogenesis and iron sources. Lithos, 119(3-4): 330~344.
- Li Shuguang and Yang Wei. 2003. Decoupling of surface and subsurface suture in the Dabie orogen and a continent-collisional lithospheric-wedging model: Sr-Nd-Pb isotopic evidence of Mesozoic igneous rocks in eastern China. Chinese Science Bulletin, 48(8): 831~838 (in Chinese with English abstract).
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xing, Hu Yanhua, Zhou Jibin, Zartman R E, Yang Xiaoyong and Sun Weidong. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. Economic Geology, 104: 303~321.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, Li Xiaofeng, Wang Yitian, Zhang Changqing and Li Yongfeng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169~188 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yuanming, Dong Ping. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Reviews, 15(4): 177~242.
- Sun Weidong, Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Ding Xing, Liang Huaying. 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview. Science China Earth Science, 53(4): 475~484.
- Tatsumoto M, Nakamura Y. 1991. DUPAL anomaly in the sea of Japan; Pb, Nd and Sr isotopic variation at the eastern Eurasian continental margin. Geochim Cosmochim Acta, 55: 3697~3708.
- Weaver B L, Wood D A, Tarney J, Joron J L. 1986. Role of subducted sediment in the genesis of ocean island basalts: Geochemical evidence from south Atlantic ocean islands. Geology, 14: 275~278.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, Gunther D, Fontaine G H, Liu Xiaoming and Diwu Chunrong. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS. Chemical Geology, 247: 100~117 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Liu Jun, Fan Yu, Cooke D R, Jowitt S M. 2011. Petrogenesis of volcanic and intrusive rocks of the Zhuanqiao stage, Luzong Basin, Yangtze metallogenic belt, east China: implications for ore deposition. International

Geology Review, 53, 526~541.

Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Lu Sanming, Shang Shigui, Cooke D R, Meffre S, Zhao Guochun. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(10): 1470~1482.

Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Zhang Lejun, Qian Bin, Ma Liang, Yang Xifei, Cooke D R. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China. Science China (Earth Sciences), 54(2): 185~196.

Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical Geodynamics. Annu Review of Earth and Planet Science, 14: 493~571.

Zircon U-Pb Ages and Isotopic Characteristics of the Granitoids in the Ningwu Basin, China, and their Significance

YUAN Feng¹⁾, ZHOU Taofa^{1,2)}, FAN Yu¹⁾, ZHANG Lejun^{1,2)}, MA Liang¹⁾, QIAN Bing¹⁾

1) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009;

2) Centre of Excellence in Ore Deposits (CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

Abstract

Granitic intrusions in the Ningwu basin, outcropping sporadically, consist mainly of quartz monzonite and granite. Few works have been done on these granitic intrusions. This paper presents a detail study of some granitic intrusions by means of LA-ICPMS zircon dating, Lu-Hf zircon isotope, and Sr-Nd isotope analyses. The U-Pb zircon ages for five granitic intrusions are 128.0 ± 1.7 Ma for Niujishan pluton, 126.4 ± 1.3 Ma for Huoli pluton, 129.8 ± 1.6 Ma for Gushan pluton (sampling from drill core in the Gushan iron deposit), 130.1 ± 1.5 Ma for Xiaoshishan pluton, and 128.3 ± 1.8 Ma for Niangniangshan pluton. These date indicate that the granitic intrusions emplaced in 126~130Ma, suggesting that they were the products of magmatic activity in early Cretaceous. The ages are similar to those of the Gushan and Niangniangshan Formations volcanic rocks and slightly younger than the mineralization ages of the porphyrite iron deposits in the Ningwu basin. The Nd-Sr isotope results suggest that the granitic intrusions derived from the metasomatic mantle, compositionally closing to the EMI, which has relationship with the subduction of the Pacific Plate. The Lu-Hf isotope results imply that the granitic plutons have genetic and evolutionary relationship with the mineralized diorites or porphyry diorites. The granitic plutons in the Ningwu basin formed in an extensional geodynamic setting, and were products of the lithospheric thinning in eastern China.

Key words: LA-MC-ICP MS dating; zircon; isotope; granitoids; Ningwu basin