

车林睿, 余金杰, 王铁柱, 等. 宁芜北段与梅山铁多金属矿床有关的辉长闪长玢岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对岩浆热液成矿系统时限的约束[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1805-1820.

Che Linrui, Yu Jinjie, Wang Tiezhu, LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from gabbro-diorite porphyry related to the Meishan polymetallic iron deposit in northern Ningwu Basin: Constraints on the age of the magmatic-hydrothermal metallogenic system[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1805-1820(in Chinese with English abstract).

宁芜北段与梅山铁多金属矿床有关的辉长闪长玢岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对岩浆热液成矿系统时限的约束

车林睿^{1,2} 余金杰¹ 王铁柱¹ 陆邦成² 王贤伟²

(1. 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, 北京 100037;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:梅山铁多金属矿床是宁芜盆地内代表性矿床之一,其Fe-Cu-Au-Mo矿化与辉长闪长玢岩密切相关。本文对含矿辉长闪长玢岩及矿体下部的辉长闪长玢岩进行LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得年龄分别为(137.8±1.7) Ma、(141.2±1.0) Ma。因此辉长闪长玢岩形成时间应在138~141 Ma,伴随的Fe-Cu-Au-Mo矿化稍晚,都属于早白垩世,受区域岩石圈伸展和减薄作用制约。根据年代学和地质事实证据,初步认为宁芜盆地早白垩世火山活动从北段开始,火山活动持续时间至少为7~10 Ma。辉长闪长玢岩中古老锆石年龄变化于1898~1903 Ma、1163 Ma和292~296 Ma,时代分别为古元古代、新元古代和早二叠纪,暗示着岩浆上侵过程中基底岩石对岩浆可能有混染作用,表明长江中下游成矿带存在早元古代结晶基底和中一晚元古代褶皱基底的“双层结构”。

关键词:锆石U-Pb年龄;辉长闪长玢岩;古老锆石;梅山铁多金属矿床;宁芜北段

中图分类号:P 618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014) 06-1805-16

1 引言

长江中下游成矿带位于扬子板块北缘,是中国东部重要的铁铜金多金属资源产地之一,这些铁铜金成矿作用与中生代燕山期的岩浆作用密切相关^[1-7]。该区大致经历了太古宙—古元古代变质基底发育、震旦纪—晚三叠世盖层沉积和中新元古代板内变形三个阶段,区内的岩浆活动和成矿作用受特提斯和太平洋两大中生代构造体系的联合控制^[1-2,8-9],中生代燕山期构造运动、岩浆活动和成矿作用大致可分为

两期:一是产于隆起区(断隆区)的高钾钙碱性花岗岩类及与之相关的斑岩-矽卡岩型矿床;二是产于火山岩断陷盆地(断凹区)的橄榄安粗岩系及与之相关的磁铁矿-磷灰石矿床^[1-2,6,9-10]。其中火山岩断陷盆地自东向西依次展布着溧水盆地、溧阳盆地、滁州盆地、宁芜盆地、繁昌盆地、庐枞盆地、怀宁盆地和金牛盆地等(图1)。位于长江中下游成矿带东部的宁芜盆地是与橄榄安粗岩系相关的磁铁矿-磷灰石矿床的主产地,也是中国重要的富铁矿基地之一。根据该区火山-次火山岩与铁矿的时空及成因

收稿日期:2014-11-08;改回日期:2014-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41372091)和国家重点基础研究发展计划“973计划”(2012CB416803)联合资助。

作者简介:车林睿,男,1989年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail: 815597523@qq.com。

通讯作者:余金杰,男,1966年生,研究员,主要从事金属矿床成矿作用研究;E-mail: yjchina@sina.com。

关系,前人归纳总结出了著名的“玢岩铁矿”成矿模式^[1],近年来该区深部和外围找矿勘查不断取得新进展,例如宁芜北段的南门头Cu矿床^[12],梅山Cu-Au-Mo矿床^①等。梅山铁矿主矿体外围大王山组安山质凝灰岩中新发现的Cu-Au-Mo矿床,时空上与铁矿显示出密切的成因联系,应属于同一成矿系列^[13]。

一般认为与铁矿床有关的次火山岩辉长闪长玢岩是大王山旋回后期的产物^[1,6,11]。20世纪70-80年代宁芜地区的火山-次火山岩及相关矿床的同位素测年方法主要是K-Ar法^[11,14-15],所得年龄范围宽泛(160~90 Ma),K-Ar法测定的年龄显然不能代表火山-次火山岩的成岩时代。近年来,随着实验仪器设备的更新和实验技术水平的提高,针对宁芜盆地的火山-次火山岩及相关矿床的成岩成矿时代已经产生了一批高精度的同位素年龄数据^[16-35],得出龙王山组年龄在135~131 Ma^[18,28],大王山组年龄在132~127 Ma^[18,22,28],姑山组年龄在130~128 Ma^[22,28],娘娘山组年龄在131~127 Ma^[21,28],与成矿有关的辉长闪长玢岩年龄为132~123 Ma^[22,24,27,29,32-34],矿床的成矿年龄为135~126 Ma^[16-17,19,23,35]。但是,上述成岩成矿时代研究工作主要针对宁芜盆地中南段,盆地北段

梅山铁多金属矿床的成岩成矿时代仍缺乏资料。本文对宁芜盆地北部梅山铁多金属矿床下部的成矿母岩辉长闪长玢岩进行LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年代学的测定,试图精确厘定成矿母岩体的侵位时代,为探讨宁芜盆地铁多金属矿床的时空分布规律及其地球动力学背景提供新的资料。

2 地质背景

宁芜盆地北起南京,南至芜湖,是一个NNE向展布的菱形中生代继承性火山岩断陷盆地,以长江断裂带(西边)、方山-小丹阳断裂带(东边)、南京-湖熟断裂(北边)、芜湖断裂(南边)为边界,盆地长约60 km,宽约20 km,总面积超过1000 km²(图2)。盆地内地层由老到新发育有三叠系、侏罗系、白垩系、古近-新近系及第四系^[1],其基底为三叠系青龙群(T_{2q})海相碳酸盐、周冲村组(T_{2z})白云质灰岩和膏盐层、黄马青组(T_{3h})砂页岩和侏罗系象山群(J_{1-3x})陆相砾岩和砂页岩、西横山组(J_{3x})类磨拉石建造的海-陆相沉积建造,盖层白垩纪火山岩地层在本区发育比较广泛,由老至新分为龙王山(K_{1l})、大王山(K_{1d})、姑山(K_{1g})和娘娘山(K_{1n})4个喷发旋回,且以龙王山

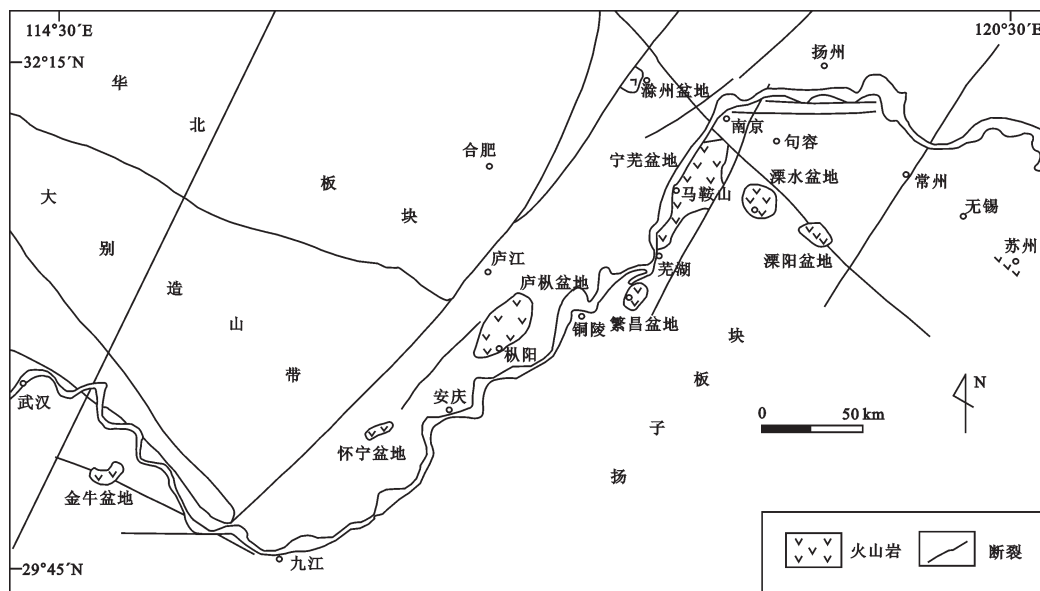


图1 长江中下游火山岩盆地分布简图(据文献[2]修改)

Fig.1 Sketch geological map of distribution of volcanic basins in the middle-lower reaches of the Yangtze River (modified after reference [2])

①陈华明,孙喜华,蔡卫东,等.江苏省南京市梅山铁矿接替资源勘查报告[R].南京:江苏省地质矿产局第一地质大队,2011.
http://geochina.cgs.gov.cn 中国地质,2014,41(6)

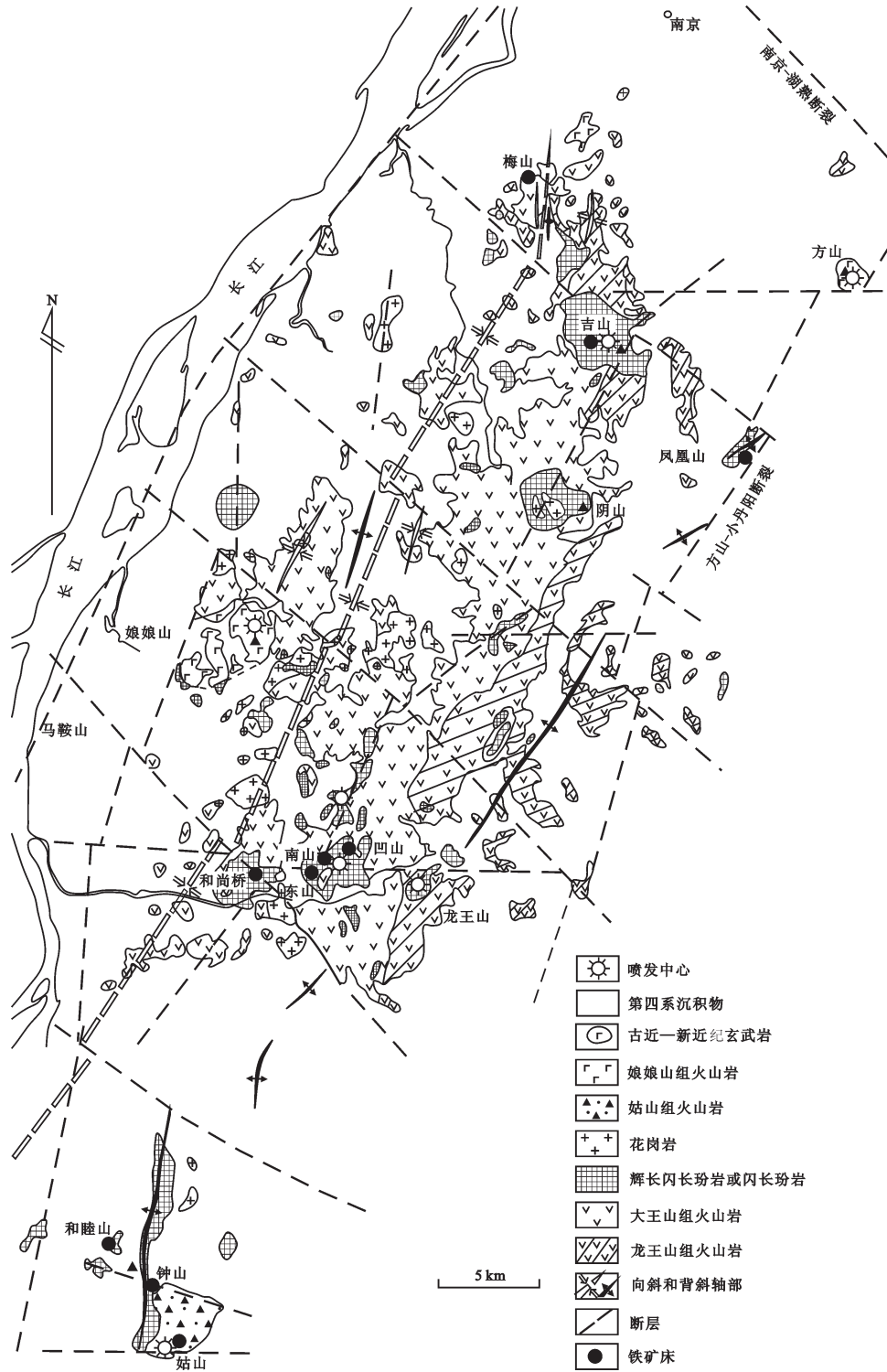


图2 宁芜盆地地质简图(据文献[11]修改)

Fig.2 Simplified geological map of the Ningwu Basin (modified after reference [11])

组(25%)和大王山组火山岩为主(75%)^[6], 姑山组和娘娘山组火山岩很少(不到5%)。龙王山旋回火山岩主要发育在盆地的东部和北部, 爆发相较为发

育, 岩性主要为紫褐色凝灰角砾岩、紫色安山质沉积块岩、沉火山角砾岩等; 之后是溢流相, 岩性主要是安山质角砾熔岩; 最后以沉积-喷发复合相结束

该旋回(主要岩性是紫红色粉砂岩与安山质熔岩、角砾熔岩、角砾凝灰岩的互层)。大王山组火山岩在盆地内分布最广,厚度最大(可达3000 m),主要以溢流相为主,岩性为黑云母辉石安山岩、辉石黑云母安山岩(北段)和角闪安山质熔岩(中段)等。姑山组火山岩主要发育在盆地的南段和北段,主要岩性为粉砂岩、凝灰质粉砂岩和火山角砾岩、石英角闪安山岩、角闪安山质熔岩等。娘娘山组火山岩仅见于娘娘山古火山口及其附近,岩性主要是假白榴石响岩、粗面岩、粗安岩及黝方石响岩等^[11,37]。娘娘山组火山岩以其碱性岩的成分区别于其他三组^[38],前人认为其是橄榄安粗岩系高度分异的产物^[3,38-41]。宁芜盆地火山岩总体上具有以下特点:(1) SiO₂含量较低,属硅近饱和系列;(2) K₂O+Na₂O含量较高,具富钾特征(K₂O/Na₂O≈1);(3) Al₂O₃含量较高;(4) CaO含量较低。在梅山地区,姑山组的角山安山岩中还发现有大王山组次火山角砾和磁铁矿角砾^[24,42]。

宁芜盆地的次火山岩最主要的为大王山旋回末期的辉长闪长玢岩或辉石闪长岩(图2),与本区磁铁矿-磷灰石矿床的形成密切相关。与成矿有关的辉长闪长玢岩或辉石闪长岩侵入于火山岩系中,或侵入于前火山岩系沉积岩中,推测受深部NNE向和NW向两组断裂构造控制^[2],重磁和钻探资料暗示它们在深部可能是彼此相连的^[11],次火山岩以超浅成相(0.5~1.5 km)为主,部分出露地表(0~0.5 km),岩体出露面积0.01~10 km²。另外,花岗质岩石出露于盆地的中、北部(图2),Sr-Nd同位素显示这些花岗质岩石源于EM I型富集地幔源区,Hf同位素则指示其与盆地内的成矿母岩辉长闪长岩类在岩浆起源和演化上存在联系^[30,31]。

梅山铁多金属矿床位于宁芜盆地北部边缘的梅山矿田内,是宁芜盆地最重要的矿床之一。该矿床为一大型-超大型铁矿床(Fe储量约338 Mt、平均品位约39%)和中型铜金矿床(Cu品位0.35%、储量4.7 t,Au品位2.5 g/t、储量5.7 t),铁矿产于辉长闪长玢岩与大王山组辉石安山岩的接触带内及其附近,Cu-Au矿床位于铁矿床上部,产于大王山组安山质凝灰岩中。铁矿与铜金矿之间的关系将另文发表。矿区主要出露地层自下而上分别为白垩系下统龙王山组、大王山组和姑山组。其中龙王山组下部为火山角砾岩和集块岩,中部为安山质凝灰岩和

角闪安山岩,上部为凝灰质砂岩;大王山组下部为黑云母辉石安山岩、中间为凝灰质粉砂岩、上部为辉石黑云母安山岩;姑山组为角闪安山岩夹火山角砾岩。辉长闪长玢岩体受板桥—中华门断裂带和板桥—凤凰山断裂带的联合控制,铁矿体产于辉长闪长玢岩穹状隆起部位,矿体受岩体内部裂隙带控制^[2,3],呈大型不规则透镜体状产于岩体顶部虚脱部位。梅山铁多金属矿床的围岩蚀变强烈,蚀变分带自下而上依次发育矿体底部浅色钠长石化/钠柱石化蚀变带、中部近矿体深色透辉石-磷灰石-钙铁榴石化蚀变带及上部浅色高岭土-碳酸盐-硅化蚀变带^[7,13,43]。主要矿石类型有块状磁铁矿、(稠密)浸染状磁铁矿/赤铁矿矿石、竹叶状磁铁矿矿石、角砾状磁铁矿矿石及斑点状磁铁矿/赤铁矿矿石等。

梅山铁矿床开采时间较早,大量地质现象已不可见,目前主采层位在井下-273m~-330m。在笔者野外考察期间,适逢梅山接替资源二期勘查工程完工,在勘探钻孔中能采到深部的成矿母岩(即蚀变辉长闪长玢岩及新鲜的辉长闪长玢岩),有机会开展成矿母岩的年代学研究。

3 样品与测试方法

3.1 样品特征

辉长闪长玢岩是大王山旋回末期的次火山岩,中基性富钠质,SiO₂平均含量为53.88%,(K₂O+Na₂O)平均为6.97%,Na₂O/K₂O约为2:1,钙碱指数52.5^[44],以明显富集Rb、Sr、Th、U、K等强不相容元素,亏损Nb和Ta为特征^[33]。本文用于锆石U-Pb测年的2件辉长闪长玢岩样品(MS-13-6、MS-13-27)采自梅山矿区,样品采集地点及特征如下:

样品MS-13-6采自TK20-47钻孔44.8~46 m处,为含矿蚀变的辉长闪长玢岩。样品MS-13-27采自梅山接替资源工程420勘探线ZK4202钻孔1245.9~1248.3 m处,为新鲜的辉长闪长玢岩。新鲜岩石手标本呈深灰色-灰绿色,具块状构造,矿化蚀变后呈灰色-浅灰色。显微镜下具斑状结构,斑晶主要是斜长石(约20%),多为中-拉长石,粒度0.5~2.0 mm,呈板状-长柱状(图3),表面常蚀变为绢云母,具钠长石化亮边,环带及聚片双晶发育;其次为辉石(约10%),属透辉石-普通辉石族,粒度0.3~1.0 mm,干涉色二级中部(图3),基质亦为细粒的长石与

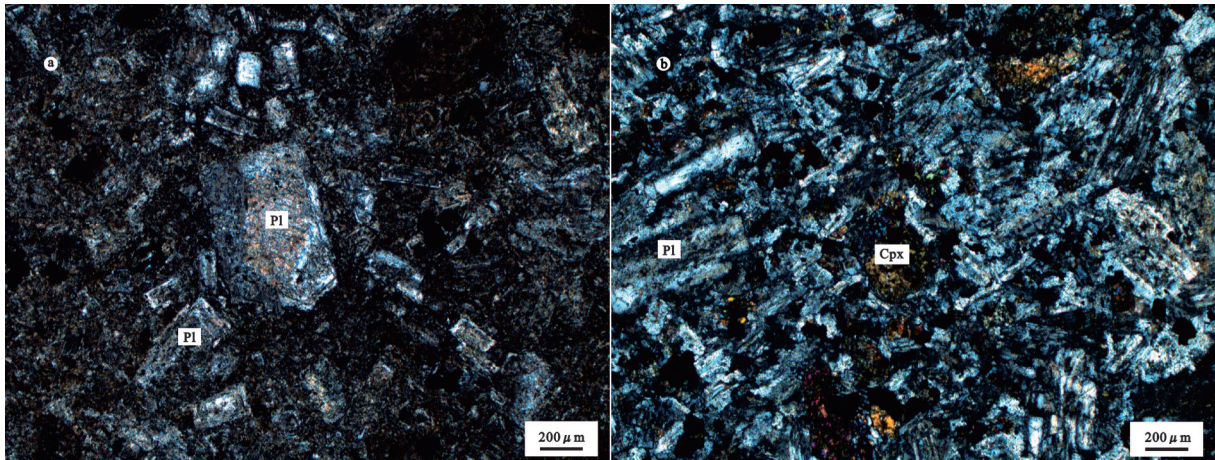


图3 梅山矿区辉长闪长玢岩年龄样品显微镜下特征

a—蚀变的辉长闪长玢岩;b—新鲜的辉长闪长玢岩;Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石

Fig.3 Features of the age samples from the gabbro-diorite porphyry in the Meishan ore district

a-Altered gabbro-diorite porphyry; b-Fresh gabbro-diorite porphyry; Pl-Plagioclase; Cpx-Clinopyroxene

辉石,具似辉绿结构/全晶质结构(深部)。含矿蚀变的辉长闪长玢岩暗色矿物内部及周围有细粒的磁铁矿和黄铁矿的生成,还有少量磷灰石、榍石等。

3.2 测试方法

锆石制靶和锆石阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成。具体过程为先将破碎至80~100目的样品进行常规重力及磁法筛选,然后在双目镜下挑选出晶形较好、无色透明的锆石,并用环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化之后,对其进行抛光,直至锆石露出核部,然后再对锆石进行阴极发光(CL)照相(图4)。在进行锆石U-Pb定年之前,还在大量透反射观察的基础上,通过锆石的CL照片、透射光照片及反射光照片之间的反复比较,对

锆石颗粒进行二次挑选,力求避开锆石内部裂隙及包裹体的影响,以便提高测试精度。测试过程中,激光剥蚀的位置主要选择在锆石形态均一、表面平滑完整、无包裹体和裂隙发育的部位。

锆石U-Pb定年在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,样品测试之前用酒精轻擦其表面,以除去可能的污染。锆石U-Pb定年所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。U-Pb定年激光剥蚀所用斑束直径为25 μm,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J/cm³,以He为载气。信号较小的²⁰⁷Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁴Pb(+²⁰⁴Hg)和²⁰²Hg用离子计数器接收,²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U信号用法拉第杯接收,实现了所有目

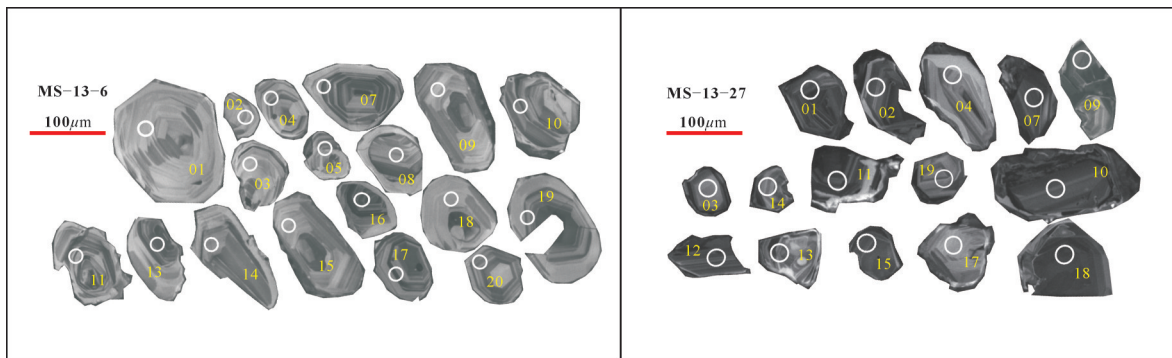


图4 梅山矿区辉长闪长玢岩锆石的阴极发光(CL)图

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircon from the gabbro-diorite porphyry in the Meishan ore district

标同位素信号的同时接收,且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度(2σ)均为2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度在1%(2σ)左右。LA-MC-ICP-MS激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127(U: 923×10^{-6} 、Th: 439×10^{-6} 、Th/U:0.475)^[45]为外标进行校正。在测试过程中每测定10个样品点后,前后重复测定4个锆石标样(2个GJ-1标准、1个91500标准及1个SRM 612标准)进行校正。数据处理采用ICPMADaCa 4.3程序,测试过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通铅的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算式剔除,锆石年龄谐和图用Isoplot 3.2程序获得,表达式中所列单个数据点的误差均为 1σ ,谐和年龄具95%的置信度。详细实验测试过程可参见侯可军等^[46]。

3.3 测试结果

LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年结果见表1。两件辉长闪长玢岩中的锆石颗粒在透射光下多呈无色透明或浅黄褐色,其中矿化蚀变辉长闪长玢岩(MS-13-6)中锆石颗粒自形程度较好,多呈短柱状—长柱状;新鲜辉长闪长玢岩(MS-13-27)中的锆石颗粒自形程度较差,多成短柱状、板状或不规则状。锆石颗粒长约40~200 μm ,长宽比为1:1~3:1。锆石颗粒晶面平滑完整,少数晶面粗糙,具凹坑及熔蚀麻点。阴极发光(CL)图像显示锆石具有明显的震荡环带结构(图4),表明其具有岩浆锆石的特征^[47]。样品锆石的U、Th含量变化较大,U含量为

$114\times 10^{-6}\sim 698\times 10^{-6}$,Th含量为 $67\times 10^{-6}\sim 3767\times 10^{-6}$,大多数Th/U比值大于0.5(表1),不同于变质重结晶锆石的Th/U比值(< 0.1),表明锆石为岩浆成因^[48,49],且锆石群形态单一,为岩浆喷发活动一次结晶而成,能代表火山岩形成的年龄。

对2件样品共40个锆石颗粒进行分析测试,筛选出有效数据共33个。其中矿化蚀变的辉长闪长玢岩(MS-13-6)20个测点中剔除2颗不具实际地质意义的锆石(点6、12)年龄(谐和度(Concordance)低于90%,表1中未列出),得到18个锆石年龄可分为3种,第一种1颗锆石(点8)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(1163 ± 9) Ma,可能为火山喷发时捕获的中元古代锆石。第二种2颗锆石(点9、点15)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为292~296 Ma,可能代表岩浆上涌时捕获的早二叠世锆石。第三种15颗锆石(点1~5、7、10~14、16~20)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值在误差范围内比较一致,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为132~143 Ma,并都位于谐和线上及其附近(图5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为(137.8 ± 1.7) Ma (MSWD = 0.37),在误差范围之内与其谐和年龄一致,故可代表辉长闪长玢岩的侵位年龄或结晶年龄。

新鲜辉长闪长玢岩(MS-13-27)锆石20个测点中有5颗锆石(点5、6、8、16、20,表1中未列出)的年龄谐和度(Concordance)低于90%,故不参与年龄的计算,得到其余15个锆石年龄可以分为2种,第一种2颗锆石(点4、17)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为1827 Ma、1834 Ma,可能为岩浆上升过程中捕获的老锆石。第二种13颗锆石(点1~4、7、9~15、17~19)的年龄一致性较好,且均落在谐和线上及其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为138~145 Ma,加权平均年龄为

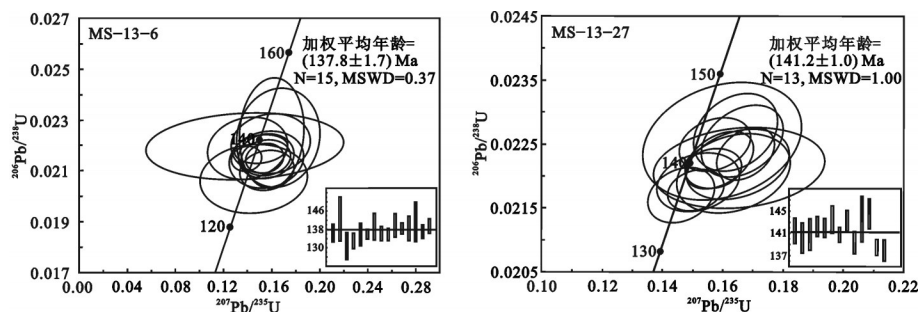


图5 梅山矿区辉长闪长玢岩锆石LA-ICP-MS U-Pb谐和年龄图及加权平均年龄图

Fig. 5 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia age diagram and age diagram of the diorite porphyrite in the Meishan ore district

表1 梅山矿区辉长闪长玢岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄测定结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating data of the gabbro diorite porphyrite from the Meishan ore district

样品及点号	同位素含量/ 10^6			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
MS-13-6 矿化辉长闪长玢岩																
MS-13-6-1	7	119	136	0.88	0.05504	0.00542	0.15578	0.01519	0.02156	0.00057	413	222	147	13	137	4
MS-13-6-2	6	223	245	0.91	0.05409	0.00878	0.16028	0.01742	0.02248	0.00144	376	327	151	15	143	9
MS-13-6-3	4	118	164	0.72	0.0485	0.00906	0.14516	0.02936	0.02071	0.00088	187	378	138	26	132	6
MS-13-6-4	5	159	213	0.75	0.05400	0.00482	0.15595	0.01486	0.02103	0.00050	372	197	147	13	134	3
MS-13-6-5	5	196	217	0.90	0.05391	0.00833	0.15505	0.02073	0.02146	0.00073	369	315	146	18	137	5
MS-13-6-7	17	664	668	0.99	0.04714	0.00297	0.13924	0.00840	0.02148	0.00032	58	141	132	7	137	2
MS-13-6-8	53	177	238	0.74	0.08128	0.00166	2.21024	0.04253	0.19762	0.00167	1228	45	1184	13	1163	9
MS-13-6-9	8	87	158	0.55	0.05844	0.00558	0.36858	0.03386	0.04639	0.00103	546	209	319	25	292	6
MS-13-6-10	6	173	241	0.72	0.04525	0.01674	0.13810	0.05359	0.02198	0.00087	-	-	131	48	140	5
MS-13-6-11	6	203	251	0.81	0.05281	0.00468	0.15513	0.01366	0.02152	0.00047	320	202	146	12	137	3
MS-13-6-13	6	214	240	0.89	0.05272	0.00361	0.15443	0.01061	0.02146	0.00039	317	156	146	9	137	2
MS-13-6-14	5	148	200	0.74	0.05549	0.00846	0.15953	0.0204	0.02206	0.00076	432	344	150	19	141	5
MS-13-6-15	7	67	131	0.51	0.06207	0.00519	0.39961	0.03479	0.04698	0.00112	676	184	341	25	296	7
MS-13-6-16	14	494	540	0.91	0.05037	0.00518	0.15137	0.01528	0.02187	0.00037	213	222	143	13	139	2
MS-13-6-17	6	202	222	0.91	0.04757	0.00857	0.14069	0.02237	0.02187	0.00080	80	378	134	20	139	5
MS-13-6-18	3	91	114	0.80	0.05824	0.00909	0.16688	0.02224	0.02229	0.00129	539	347	157	19	142	8
MS-13-6-19	9	335	356	0.94	0.04927	0.00539	0.14751	0.01644	0.02166	0.00044	161	237	140	15	138	3
MS-13-6-20	5	156	201	0.78	0.04964	0.00531	0.14942	0.01612	0.02202	0.00049	189	220	141	14	140	3
MS-13-27 新鲜辉长闪长玢岩																
MS-13-27-1	15	1140	576	1.98	0.05387	0.00380	0.16457	0.01157	0.02222	0.00034	365	159	155	10	142	2
MS-13-27-2	14	1011	534	1.89	0.05368	0.00401	0.16380	0.01259	0.02203	0.00040	367	164	154	11	140	3
MS-13-27-3	7	386	329	1.17	0.05640	0.00723	0.16549	0.01865	0.02212	0.00042	478	281	156	16	141	3
MS-13-27-4	103	96	388	0.25	0.11648	0.00173	5.25584	0.07714	0.32774	0.00352	1903	27	1862	13	1827	17
MS-13-27-7	14	860	615	1.40	0.05444	0.00205	0.16753	0.00637	0.02234	0.00027	391	85	157	6	142	2
MS-13-27-9	12	808	524	1.54	0.05274	0.00244	0.15981	0.00683	0.02231	0.00026	317	106	151	6	142	2
MS-13-27-10	8	537	359	1.50	0.05415	0.00332	0.16629	0.00927	0.02253	0.00037	376	139	156	8	144	2
MS-13-27-11	26	3767	698	5.39	0.05136	0.00205	0.15652	0.00617	0.02212	0.00020	257	93	148	5	141	1
MS-13-27-12	11	820	523	1.57	0.05098	0.00250	0.15751	0.00789	0.02249	0.00028	239	113	149	7	143	2
MS-13-27-13	7	514	386	1.33	0.05083	0.00314	0.15193	0.00920	0.02190	0.00030	232	143	144	8	140	2
MS-13-27-14	5	282	286	0.98	0.05341	0.00661	0.15956	0.01737	0.02254	0.00061	346	283	150	15	144	4
MS-13-27-15	13	774	683	1.13	0.05279	0.00315	0.16423	0.00924	0.02268	0.00041	320	131	154	8	145	3
MS-13-27-17	74	116	321	0.36	0.11610	0.00188	5.27713	0.08078	0.32909	0.00255	1898	4	1865	13	1834	12
MS-13-27-18	14	1363	682	2.00	0.05010	0.00201	0.15114	0.00620	0.02178	0.00022	198	97	143	5	139	1
MS-13-27-19	7	555	379	1.46	0.04903	0.00243	0.14642	0.00734	0.02170	0.00028	150	117	139	7	138	2

(141.2±1.0) Ma(MSWD = 1.00), 在误差范围内与谐和年龄(141.2±0.52) Ma(MSWD=16)一致, 可视新鲜辉长闪长玢岩的侵位年龄或结晶年龄。

4 讨论

4.1 古老锆石的意义

长江中下游地区被大面积震旦纪—三叠纪海相沉积岩所覆盖, 前震旦系基底变质岩系出露甚

少^[50]。邢凤鸣等^[51]测得安徽怀宁董岭群变质岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 1895~1991 Ma, 属早元古代。袁学诚^[52]对地球物理资料研究后认为相当于崆岭群的物质分布于扬子板块北部的地壳深部, 凌文黎等^[53]获得本区崆岭群斜长角闪岩和副片麻岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为(1958±15) Ma 和(1939±44) Ma, 并推测本区在约 1.85~2.0 Ga 的古元古代时期发生过一次较大规模的区域构造岩浆(热)事件, 形

成了扬子板块最早的地壳和基底岩系。袁海华等^[54]和 Qiu et al.^[55]也都认为扬子克拉通的基底于古元古代晚期形成。高山等^[56]在崆岭高级变质地体奥长花岗岩和变沉积岩中分别获得 2947~2903 Ma 的岩浆侵入年龄和 3.3 Ga 的碎屑锆石年龄,直接证明扬子板块存在太古代陆壳基底物质。柳小明等^[57]在三峡地区震旦纪莲沱组和南沱组的沉积岩中发现的 3319~3508 Ma 碎屑锆石是本区迄今最古老的锆石,代表扬子克拉通中—古太古代的一次岩浆作用事件。

张旗等^[18]、侯可军等^[22]及李锦伟等^[32]在对宁芜盆地火山岩及次火山岩年龄测定过程中都曾获得了古老锆石的年龄。其中张旗等^[18]在龙王山组安粗岩中发现了 1 颗太古代(3232 Ma)及 3 颗新太古代—古元古代(2403~2601 Ma)的古老锆石,表明宁芜地区可能存在新太古代的下地壳基底。侯可军等^[22]在宁芜盆地的花岗岩类侵入体中发现了 3 颗年龄(1787~1984 Ma)的古老锆石,李锦伟等^[32]在吉山辉长闪长玢岩中也发现了 1 颗年龄为(1885±14) Ma 的古老锆石,都证明了宁芜盆地可能存在古元古代基底。闵庆魁^[58]在相邻的宁镇地区丹阳县曾测得埤城群斜长角闪岩中蚀变角闪石的 K-Ar 表面年龄 1771 Ma,并推测埤城群年代应属更早的古元古代,结合本次发现的古老锆石(MS-13-27 样品点 4、17, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 1903 Ma 和 1898 Ma),笔者认为在宁芜盆地存在古元古代基底,可能属于埤城群。

鉴于古老锆石的存在 Pb 丢失的可能性,笔者对年龄值超过 1400 Ma 锆石使用 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值来作为可靠年龄进行讨论。本次测试共获得 5 颗古老锆石,可分为 3 种:第一种 2 颗锆石(MS-13-27-4、MS-13-27-17)Th/U 比值分别 0.25、0.36,环带结构明显,表现出明显的岩浆锆石特征,其 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄分别为 1903 Ma 和 1898 Ma,进一步证明了宁芜盆地可能存在古元古代埤城群基底及曾发生过岩浆事件的可能性。第二种 1 颗锆石(MS-13-6-8)的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(1163±9) Ma, Th/U 比值为 0.74,该年龄代表中元古代岩浆锆石的信息。王文斌等^[59]根据长江中下游侵入岩长石 Pb 同位素特征,曾推断宁芜地区在震旦系—三叠系沉积岩盖层之下存在中元古代上溪群变质基底,上溪群的同位素年龄介于 1.0~1.4 Ga^[59],本文获得的中元古代锆石年龄与其相符;陈江峰和江博明^[60]根据该区中生代花岗岩类 Nd

同位素 1500 Ma 的模式年龄也曾指出扬子地块东南部具有一个中元古代基底。以上两种锆石的发现,印证了长江中下游成矿带存在早元古代结晶基底和中—新元古代褶皱基底的“双层结构”(江北型基底)的观点^[1,2,61]。王元龙等^[38]对比盆地内不同旋回火山岩 Sr-Nd 同位素特征后指出,岩浆上升过程中受到地壳物质的混染,盆地内前寒武纪古老锆石的发现,表明岩浆上侵过程中遭受了古老基底岩石的混染。

第三种 2 颗锆石(MS-13-6-9、MS-13-6-15)的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为(292±6) Ma 和(296±7) Ma,其 Th/U 比值分别为 0.55、0.51,环带比较发育,可能代表岩浆上升过程中捕获的下二叠统栖霞组沉积地层中的岩浆锆石,在南陵丫山镇的该组地层硅质条带灰岩的下部曾发现有薄层的火山碎屑岩,翟裕生等^[2]认为其是微弱火山活动的显示。故此两颗岩浆锆石可能也代表了一期岩浆作用事件。早二叠世岩浆活动在长江中下游是否具有区域性仍需要进一步的研究。

4.2 成岩时代约束

近年来,前人报道了盆地内辉长闪长岩类大量高精度的 U-Pb 定年数据(表 2)。宁芜中南段凹山岩体、陶村岩体、和尚桥岩体、东山岩体、白象山岩体、和睦山岩体和姑山岩体成岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(130.2±2.0) Ma、(130.7±1.8) Ma、(131.1±1.5) Ma、(131.1±3.1) Ma、(130.0±1.4) Ma、(131.1±1.9) Ma 和(129.2±1.7) Ma^[24]。胡劲平等^[27]获得 2 件凹山铁矿成矿母岩蚀变辉长闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(123±1) Ma、(127±3) Ma,东山铁矿成矿母岩辉长闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(125±2) Ma;段超等^[29]测定凹山赋矿辉长闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(131.7±0.7) Ma;Hou et al.^[33]测得凹山辉长闪长玢岩成岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(130.8±0.9) Ma;张燕等^[34]给出凹山含矿辉长闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(127.6±4.4) Ma;侯可军等^[22]报道的吉山铁矿次火山岩辉长闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(128.2±1.0) Ma;李锦伟等^[32]利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得吉山铁矿周边弱蚀变辉长闪长玢岩的年龄为(130.0±1.0) Ma。综上所述,宁芜盆地中南部的辉长闪长玢岩年龄主要集中在 130 Ma 左右,本次获得 138~141 Ma 的梅山辉长

表2 宁芜盆地主要岩体、火山岩及成矿年代一览表

Table 2 Chronological data of main intrusions, volcanic rocks and mineralization in the Ningwu Basin

测试对象	地点	方法	年龄/Ma	来源
龙王山组安粗岩	宁芜中段	锆石 SHRIMP	131±4	文献[18]
龙王山组角闪安山岩	宁芜中南段	锆石 LA-ICP-MS	134.8±1.3	文献[28]
大王山组安粗岩	宁芜中段	锆石 SHRIMP	127±3	文献[18]
大王山组粗面安山岩	陆廊镇	锆石 SHRIMP	130.3±0.9	文献[22]
大王山组角闪安山岩	宁芜中南段	锆石 LA-ICP-MS	132.2±1.6	文献[28]
姑山组粗安岩	姑山、梅山	锆石 SHRIMP	128.2±1.3、128.5±1.8	文献[22]
姑山组角闪辉石安山岩	宁芜中南段	锆石 LA-ICP-MS	129.5±0.8	文献[28]
娘娘山组超钾质火山岩	娘娘山	锆石 LA-ICP-MS	130.6±1.1	文献[21]
娘娘山组黝方石响岩	宁芜中南段	锆石 LA-ICP-MS	126.6±1.1	文献[28]
辉长闪长岩	吉山	锆石 LA-ICP-MS	128.2±1.0	文献[22]
辉长闪长玢岩	吉山	锆石 SHRIMP	130.0±1.0	文献[32]
辉长闪长玢岩	凹山	锆石 LA-ICP-MS	131.7±0.7	文献[29]
辉长闪长玢岩	凹山	锆石 LA-ICP-MS	123±1; 127±3	文献[27]
辉石闪长玢岩	凹山	锆石 LA-ICP-MS	127.6±4.4	文献[34]
(辉石)闪长玢岩	凹山	锆石 LA-ICP-MS	130.2±2.0	文献[24]
(辉长)闪长玢岩	凹山	锆石 LA-ICP-MS	130.8±0.9	文献[33]
(辉长)闪长玢岩	陶村	锆石 LA-ICP-MS	130.7±1.8	文献[24]
(辉石)闪长玢岩	和尚桥	锆石 LA-ICP-MS	131.1±1.5	文献[24]
(辉长)闪长玢岩	东山	锆石 LA-ICP-MS	131.1±3.1	文献[24]
辉长闪长玢岩	东山	锆石 LA-ICP-MS	125±2	文献[27]
(辉长)闪长玢岩	白象山	锆石 LA-ICP-MS	130.0±1.4	文献[24]
(辉长)闪长玢岩	和睦山	锆石 LA-ICP-MS	131.1±1.9	文献[24]
(辉长)闪长玢岩	姑山	锆石 LA-ICP-MS	129.2±1.7	文献[24]
阳起石	东山铁矿	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar等时线	126~129	文献[19]
金云母	钟姑矿田	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	126.7±0.17、127.2±1.63	文献[17]
金云母	白象山铁矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、反等时线	134.9±1.1、133±2	文献[23]
金云母	和睦山矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、反等时线	132.9±1.1、133.9±2.4	文献[23]
金云母	陶村矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar反等时线	128±14	文献[23]
金云母	陶村矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	129.3±1.1、127.5±1.7	文献[36]
钠长石	梅山铁矿	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	122.9±0.6、122.6±0.16	文献[16]
钠长石	陶村铁矿	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	124.89±0.30、124.90±0.29	文献[16]
金云母	陶村矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	129.3±1.1、127.5±1.7	文献[36]
金云母	白象山矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	130.7±1.1、126.7±9.4	文献[36]
金云母	和睦山矿床	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar坪、等时线	129.1±0.9、129.6±1.6	文献[36]

闪长玢岩形成年龄明显大于以上数据。

关于宁芜盆地火山-岩浆活动的时限,张旗等^[18]获得宁芜中段娘娘山附近龙王山组和大王山组的安粗岩锆石 SHRIMP 年龄分别为(131±4) Ma、(127±3) Ma;侯可军等^[22]测定陆廊镇大王山组底部粗面安山岩的锆石 SHRIMP 年龄为(130.3±0.9) Ma,姑山和梅山附近姑山组粗安岩的锆石 SHRIMP 年龄分别为(128.2±1.3) Ma、(128.5±1.8) Ma;周涛发等^[28]系统给出宁芜中南段各组火山熔岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为:龙王山组(134.8±1.3) Ma、大王山组(132.2±1.6) Ma、姑山组(129.5±0.8) Ma 和娘娘山组(126.6±1.1) Ma;闫峻等^[21]得到娘娘山古火山口附近的娘娘山组下部黝方石响岩质含角砾熔结凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(130.6±1.1) Ma。多数学者认为宁芜盆地火山-岩浆活动时限为 135~127 Ma,持续 8~10 Ma(表 2)^[10,13,24,28,31,35],但也有些学者认为该区的火山-次火山岩是在很短的时间内(约 130 Ma)快速喷发形成的^[20-21,26]。一些地质事实表明,宁芜盆地四个火山旋回的喷发持续了较长时间,并且互相之间亦有较长间隔,证据如下:

(1) 四个喷发旋回的标准剖面厚度可达 1900 m 以上,每个旋回岩性变化明显,以多次的喷发不整合、平行不整合及角度不整合相隔。沉积岩系中发育有丰富的孢粉化石,并有从裸子植物向被子植物演化的趋势^[11,62]。喷发旋回内大致是以爆发相开始,溢流相结束,夹以短暂的宁静期^[11]。

(2) 旋回之间也存在较长间隔,大王山旋回与姑山旋回的喷发活动之间存在明显的沉积间断,呈淡水湖相沉积,岩性主要是粉砂岩、泥岩夹凝灰岩和凝灰角砾岩。梅山地区冯圩村姑山组上部角闪安山岩中还发现有大王山组辉长闪长玢岩及磁铁矿角砾^[11,24,42,62],这同样说明两个旋回喷发活动之间有较长时间的间隔,使得岩体和铁矿剥露地表。

(3) 江苏省区测队曾在梅山地区龙王山组火山岩与大王山组火山岩之间划分出了一套火山喷发间隙的内陆湖相、河湖相沉积岩系——云合山组,此套沉积岩系在盆地内分布比较广泛,与下部龙王山旋回火山岩呈不整合接触,云合山组岩性主要为粉砂岩、细砂岩。粉砂质泥岩,夹凝灰质粉砂岩及沉凝灰岩,局部含有火山沉积成因的赤铁矿和磁铁矿层,该沉积岩系的最大厚度为 144 m。这说明龙

王山旋回和大王山旋回喷发之间的间隔具有区域性特征,时间也较长^[11]。

宁芜盆地的喷发旋回可能具有多个喷发中心,且这些火山口的喷发活动有可能不是同时的,盆地的岩浆-构造-成矿作用亦可能是自北部开始。区内的断裂系统不仅控制断陷盆地的形成和分布,还是岩浆上升和火山喷发的通道,因而决定了侵入体和喷发中心的分布^[37]。宁芜研究项目编写小组^[11]提出宁芜断陷盆地是分段逐渐断陷而成的,北部的梅山-韩府山断块形成最早,接受晚侏罗世西横山组沉积,紧接着是板桥-凤凰山断裂的形成,成为梅山矿田的控矿断裂。叶水泉^[42]通过对各旋回火山岩同位素年龄研究对比后认为各组火山活动在时间上存在交叉重叠现象,且各旋回的火山岩系可能由多个火山口的喷发产物组成。结合辉长闪长玢岩年代学的测试结果,梅山铁多金属矿床所在的宁芜北段地区的火山活动时间很有可能要稍早于中南部地区。

初步研究认为,宁芜地区的火山-次火山岩不是集中在某个较短时间段形成的,而是持续、多期次的。闫峻等^[21]曾对宁芜盆地最晚的娘娘山组火山岩进行过系统研究,测得娘娘山组超钾质火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(130.6±1.1) Ma,与本课题组测定的娘娘山组火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 相近(另文发表),故宁芜盆地最晚的火山活动应该在 130 Ma 左右。本文获得的大王山旋回辉长闪长玢岩的锆石 U-Pb 年龄为 138~141 Ma,尽管宁芜北段龙王山组缺乏高精度定年资料,笔者的年龄资料限定宁芜盆地的火山活动持续时间至少介于 7~10 Ma,并且北段火山活动可能比中南段稍早。

4.3 成矿时代约束

在宁芜南段,余金杰等^[16]运用 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年测定陶村铁矿钠长石岩带钠长石坪年龄为(124.89±0.30) Ma,对应的等时线年龄为(124.90±0.29) Ma; Yu and Mao^[17]获得钟姑矿田 ck490 钻孔与磁铁矿共生的金云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为(126.7±0.17) Ma,对应的等时线年龄为(127.21±1.63) Ma;马芳等^[19]测得东山铁矿中新鲜阳起石(黑绿色)的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 等时线年龄在 126~129 Ma;袁顺达等^[23]给出白象山铁矿、和睦山铁矿钻孔富矿石中金云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄分别为(134.9±1.1) Ma、(132.9±1.1) Ma,对应的反等时

线年龄分别为(133±2)、(133.9±2.4) Ma,陶村铁矿采场顶部富矿石中金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar反等时线年龄为(128±14) Ma;Zhou et al.^[35]报道了陶村、白象山及和睦山铁矿床中与磁铁矿共生的金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄分别为(129.3±1.1) Ma、(130.7±1.1) Ma、(129.1±0.9) Ma,对应的等时线年龄分别为(127.5±1.7) Ma、(126.7±9.4) Ma、(129.6±1.6) Ma。目前已发表的与磁铁矿共生的金云母/阳起石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄将宁芜盆地成矿作用时间限定在了135~126 Ma,比本文报道的梅山辉长闪长玢岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄(138~141 Ma)要新,这也从另一方面证实本文获得的岩体年龄是合理、可信的。

与宁芜盆地南段不同,梅山铁矿缺乏与磁铁矿共生的金云母,它的精确成矿年龄仍不清楚。余金杰等^[16]获得梅山主矿体下部钠化带钠长石⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄为(122.6±0.6) Ma,数据明显偏新,目前来看,并不能准确地代表矿床形成的时间。因为斜长石系列Ar同位素体系的封闭温度较低(225~300℃)^[63],而梅山铁矿主成矿阶段磁铁矿的形成温度为640~800℃^[64],远远高于上述温度。梅山铁矿主矿体外围大王山组安山质凝灰岩中新发现的Cu-Au-Mo矿床,其时空上与铁矿显示出密切的成因联系,应属于同一成矿系列。梅山铁多金属矿床具有多阶段成矿的特点,可划分为钠长石化阶段、类矽卡岩阶段(矿物组合为透辉石、钙铁榴石、磁铁矿、磷灰石)、赤铁矿化和菱铁矿化阶段和石英-硫化物阶段(蚀变包括硅化、碳酸岩化、高岭土化和黄铁矿化等)^[65]。梅山铁矿床与钠长石化阶段和类矽卡岩阶段有关,赤铁矿化和菱铁矿化阶段局部形成了赤铁矿和菱铁矿矿石,而最近新发现的Cu-Au-Mo矿床与石英-硫化物阶段有关。空间上,钠长石化阶段和类矽卡岩阶段的蚀变主要是对辉长闪长玢岩的蚀变,而石英-硫化物阶段的蚀变已经上移至大王山组火山岩(浅色蚀变带)中。Fe矿化和Cu-Au-Mo矿化均与辉长闪长玢岩有密切的成因联系,辉长闪长玢岩LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄(138~141 Ma)代表着岩浆-热流系统的下限年龄,上限年龄目前还不清楚,考虑到钠长石⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄为123 Ma^[16],我们认为梅山铁多金属矿化持续时间会很长,可能达到15~18 Ma,一直持续到娘娘山旋回的火山喷发之后。自白垩纪开始中国东部构造体制

由挤压为主向伸展为主转换,长江中下游地区主构造格局由近EW向转变为近NE-NNE向^[8,66-67],伴随大规模的岩浆侵入、火山喷发,发育了包括宁芜盆地在内的一系列陆相火山岩断陷盆地。该时期长江中下游成矿带进入快速伸展时期^[68-70],幔源岩浆携带其活化萃取的Fe、Cu、Au等亲地幔元素上升,在岩浆冷却过程中及喷发-侵位成岩之后,随着物化条件的改变,成矿物质在有利的容矿空间卸载聚集成矿。因此,盆地内火山、次火山岩及Fe-Cu-Au矿化正是在岩石圈减薄的构造背景下岩浆活动及岩浆热液成矿作用的产物。

5 结 论

本文对与梅山铁多金属矿床有关的辉长闪长玢岩进行了年代学研究,得到了以下结论:

(1)与梅山铁多金属矿床有关的梅山辉长闪长玢岩的LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄为138~141 Ma,代表着梅山铁矿的下限年龄,成岩成矿均属早白垩世,对应的大地构造背景是中国东部中生代岩石圈大规模减薄事件。

(2)辉长闪长玢岩中古老锆石年龄变化于1898~1903 Ma、1163 Ma和292~296 Ma,时代分别为古元古代、新元古代和早二叠世,前两组古老锆石表明长江中下游成矿带存在早元古代结晶基底和中一新元古代褶皱基底的“双层结构”。

(3)宁芜盆地的火山-岩浆活动可能从北段开始,整个过程持续的时间至少介于7~10 Ma。

致谢:本文在野外工作中得到了江苏省地质调查院黄建平所长、王丽娟副所长、宝钢梅山地测车间宋革文主任、赵海技术员、李虎技术员等的大力支持和帮助。样品年龄测试得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士的帮助,在此一并致以诚挚谢意。

参考文献(References):

- [1] 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游地区铜铁成矿带[M].北京:地质出版社,1991:1-379.
Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. The Copper-iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-379(in Chinese with English abstract).
- [2] 翟裕生,姚书振,林新多,等.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M].北京:地质出版社,1992:1-235.

- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, et al. Fe - Cu - Au Metallogeny of the Middle - Lower Changjiang Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-235 (in Chinese).
- [3] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社, 1998: 1-351.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits along the Changjiang Area of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-351(in Chinese with English abstract).
- [4] 段超, 李延河, 毛景文, 等. 宁芜火山岩盆地凹山铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1874-1884.
- Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, et al. Zircon trace element characteristics of intrusions in the Washan iron deposit of Ningwu volcanic basin and their geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1874-1884(in Chinese with English abstract).
- [5] Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29: 307-324.
- [6] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 712-730.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 712-730 (in Chinese with English abstract).
- [7] Yu Jinjie, Chen Yuchuan, Mao Jingwen, et al. Review of geology, alteration and origin of iron oxide - apatite deposits in the Cretaceous Ningwu basin, Lower Yangtze River Valley, eastern China: Implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43: 170-181.
- [8] 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良, 等. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 183-190.
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Yang Zhuliang, et al. Mesozoic petro-tectonic associations and records of the geodynamic processes in Southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(4): 183-190 (in Chinese with English abstract).
- [9] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1665-1678.
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng. Advances on petrogenesis and metallogenic study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1665-1678(in Chinese with English abstract).
- [10] Mao J W, Xie G Q, Duan C, et al. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 294-314.
- [11] 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京:地质出版社, 1978: 1-196.
- Ningwu Research Group. Porphyry Iron Deposits in Ningwu Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 1-196(in Chinese).
- [12] 周小栋, 郭坤一, 陈国光, 等. 宁芜北部脉状铜矿床地质与成矿流体特征研究[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1622-1633.
- Zhou Xiaodong, Guo Kunyi, Chen Guo Guang. Geological and ore-forming fluid characteristics of vein type copper deposits in northern Ningwu area[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1622-1633(in Chinese with English abstract).
- [13] 毛景文, 段超, 刘佳林, 等. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 1-14.
- Mao Jingwen, Duan Chao, Liu Jialin, et al. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [14] 中国科学院地质研究所同位素研究室. 宁芜火山岩地区同位素地质年代学研究[C]//宁芜火山岩铁铜矿床会议论文集. 1975. Isotope research laboratory of IGCAS. Isotopic geochronology research in Ningwu volcanic rocks area[C]//Papers of Iron-copper Deposits in Ningwu Volcanic Rocks Area. 1975(in Chinese).
- [15] 李坤英. 中国东南部中生代火山岩的同位素年龄、时间和空间演化及其原始物质来源[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1982, 3(1): 98-118.
- Li Kunying. Isotopic ages, temporal and spatial evolution and their original material source of the Mesozoic volcanic rocks in Southeast China[J]. Journal of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources of CAGS, 1982, 3(1): 98-118(in Chinese).
- [16] 余金杰, 毛景文. 宁芜玢岩铁矿钠长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年及意义[J]. 自然科学进展, 2002, 12(10): 1059-1063.
- Yu Jinjie, Mao Jingwen. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of albite from the porphyry iron deposits in the Ningwu basin and its significance[J]. Progress in Nature Science, 2002, 12(10): 1059-1063(in Chinese).
- [17] Yu Jinjie, Mao Jingwen. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basin in East-central China and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 435-442.
- [18] 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(4): 309-314.
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, et al. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications[J]. Science in China(Series D), 2003, 46(8): 830-837.
- [19] 马芳, 蒋少涌, 薛怀民. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床中阳起石的激光 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 283-289.
- Ma Fang, Jiang Shaoyong, Xue Huaimin. Early Cretaceous mineralizations in Ningwu basin: Insight from actinolite $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ laser dating results[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(2): 283-289

- (in Chinese with English abstract).
- [20] 闫峻, 俞永飞, 陈江峰. 宁芜地区娘娘山组火山岩Rb-Sr同位素定年及其意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 121-125.
Yan Jun, Yu Yongfei, Chen Jiangfeng. Rb-Sr isotopic dating of volcanic rocks from the Niangniangshan Formation in the Nanjing - Wuhu area and its geological implications[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 121-125(in Chinese with English abstract).
- [21] 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 等. 长江中下游繁昌-宁芜火山岩盆地锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1716-1724.
Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuangzhong, et al. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang - Ningwu volcanic basins in the Lower Yangtze region and its geological implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(12): 1716-1724(in Chinese with English abstract).
- [22] 侯可军, 袁顺达. 宁芜盆地火山岩-次火山岩的锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 888-902.
Hou Kejun, Yuan Shunda. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the igneous rocks in the Ningwu basin and their geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 888-902 (in Chinese with English abstract).
- [23] 袁顺达, 侯可军, 刘敏. 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[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 797-808.
Yuan Shunda, Hou Kejun, Liu Min. Timing of mineralization and geodynamic framework of iron-oxide-apatite deposits in Ningwu Cretaceous basin in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, China: Constraints from Ar-Ar dating on phlogopites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 797-808 (in Chinese with English abstract).
- [24] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2715-2728 (in Chinese with English abstract).
- [25] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代: 金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年代学研究[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 810-820.
Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ningwu basin: Evidence from ⁴⁰Ar-³⁹Ar phlogopite dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 810-820(in Chinese with English abstract).
- [26] 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 694-714.
Xue Huaimin, Ma Fang, Guan Haiyan, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle-lower Yangtze region[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 694-714(in Chinese with English abstract).
- [27] 胡劲平, 蒋少涌. 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[J]. 高校地质学报, 2010, 16(3): 294-308.
Hu Jinping, Jiang Shaoyong. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of porphyrites from the Ningwu basin and their geological implications[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(3): 294-308(in Chinese with English abstract).
- [28] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学(D辑), 2011, 41(7): 960-971.
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China[J]. Science in China(Series D), 2011, 54(2): 185-196.
- [29] 段超, 毛景文, 李延河, 等. 宁芜盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩和花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1159-1171.
Duan Chao, Mao Jingwen, Li Yanhe, et al. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from Washan iron deposit in Ningwu basin, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1159-1171(in Chinese with English abstract).
- [30] Duan Chao, Li Yanhe, Hou Kejun, et al. Late Mesozoic ore-forming event in the Ningwu Ore district, Middle-Lower Yangtze River polymetallic ore belt, East China: Evidences from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the granodioritic stocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 719-736.
- [31] 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 宁芜盆地花岗岩类的锆石U-Pb年龄、同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 821-833.
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Zircon U-Pb ages and isotopic characteristics of the granitoids in the Ningwu basin, China, and their significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 821-833(in Chinese with English abstract).
- [32] 李锦伟, 陈津华, 曾键年, 等. 宁芜盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩SHRIMP锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(6): 1227-1236.
Li Jinwei, Chen Jinhua, Zeng Jiannian, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of gabbro-diorite porphyrite in Jishan iron ore deposit of Ningwu basin and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(6): 1227-1236 (in Chinese with English abstract).
- [33] Hou Tong, Zhang Zhaochong, Encarnacion J, et al. Geochronology/geochemistry of the Washan dioritic porphyry associated with Kiruna-type iron ores, Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China: implications for petrogenesis/mineralization[J]. International Geology Review, 2012, 54(11): 1332-1352.
- [34] 张燕, 郭坤一, 曾键年. 宁芜盆地凹山铁矿含矿玢岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 资源调查与环境, 2013,

- 34(4): 228–233.
Zhang Yan, Guo Kunyi, Zeng Jiannian. Zircon U–Pb dating of the ore-bearing porphyries and its geological significance for the Washan iron deposit, Nanjing–Wuhu basin[J]. Resources Survey and Environment, 2013, 34(4): 228–233(in Chinese with English abstract).
- [35] Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Geology and geochronology of magnetite–apatite deposits in the Ning–Wu volcanic basin, eastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 90–107.
- [36] 徐志刚, 盛继福, 孙善平. 关于“橄榄安粗岩系列(组合)”特征及某些问题的讨论[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 43–62.
Xu Zhigang, Sheng Jifu, Sun Shanping. A discussion on characteristics of shoshonite rock series(association) and some problems[J]. Geological Review, 1999, 45(Sup.): 43–62 (in Chinese).
- [37] 中国科学院地球化学研究所. 宁芜型铁矿床形成机理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1–152.
Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Ore-forming mechanism of Ninwu Type Iron Deposits[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1–152 (in Chinese).
- [38] 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2001, 17: 565–575.
Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 565–575(in Chinese with English abstract).
- [39] 薛怀民, 陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地质意义[J]. 江苏地质, 1989, (4): 9–14.
Xue Huaimin, Tao Kuiyuan. New view on the Mesozoic volcanic sequences in Ning–Wu area[J]. Jiangsu Geology, 1989, 4: 8–14 (in Chinese with English abstract).
- [40] 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 23–34.
Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, et al. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite Province, Eastern China, and their metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(1): 23–34 (in Chinese with English abstract).
- [41] 邢凤鸣. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因——岩石学与Nd、Sr、Pb同位素证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(2): 126–137.
Xing Fengming. Petrological and Nd, Sr, Pb isotopic evidence for genesis of Mesozoic rocks in Nanjing–Wuhu area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(2): 126–137(in Chinese with English abstract).
- [42] 叶水泉. 宁芜北段姑山组火山岩系的时代讨论[J]. 江苏地质, 2000, 24(4): 210–214.
Ye Shuiquan. Discussion of the timing of Gushan Formation volcanic series from Northern Ningwu Basin[J]. Jiangsu Geology, 2000, 24(4): 210–214 (in Chinese with English abstract).
- [43] 陈毓川, 盛继福, 艾永德. 梅山铁矿——一个矿浆热液矿床[J]. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊, 1981, 2(1): 26–48.
Chen Yuchuan, Sheng Jifu, Ai Yongde. Meishan iron deposit——An ore magma–hydrothermal deposit[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1981, 2(1): 26–48(in Chinese with English abstract).
- [44] 长江中下游火山岩区铁矿研究组. 玢岩铁矿——安山质火山岩地区铁矿床的一组成因模式[J]. 地质学报, 1977, 1: 1–18.
Iron Research Group of Volcanic Regions in the Middle–Lower Reaches of the Yangtze River. Porphyrite iron deposits——a genetic model of iron deposits in andesitic volcanic area[J]. Acta Geologica Sinica, 1977, 1: 1–18(in Chinese with English abstract).
- [45] Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U. Plesovice zircon——A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249: 1–35.
- [46] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位U–Pb定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481–492.
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U–Pb zircon dating using laser ablation–multi ion counting–ICP–MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481–492(in Chinese with English abstract).
- [47] Vavra G, Gebauer D, Schmid R. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulite of the Ivrea zone(South Alps): an ion microprobe(SHRIMP)study[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 122: 337–358.
- [48] Hoskin P W, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid–state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 423–439.
- [49] Belousova E A, Griffin W L, O’Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602–622.
- [50] 王文斌, 李文达, 范洪源. 长江中下游地区变质基底及地壳形成时间[J]. 火山地质与矿产, 1996, 17(3/4): 42–50.
Wang Wenbin, Li Wenda, Fan Hongyuan. Time of formation for metamorphic basement and crust in the middle–lower reaches of Yangtze River[J]. Volcanology and Mineral Resources, 1996, 17(3/4): 42–50(in Chinese with English abstract).
- [51] 邢凤鸣, 徐祥, 李志昌. 长江中下游早元古代基底的发现及意义[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1883–1886.
Xing Fengming, Xu Xiang, Li Zhichang. The discovery of Paleoproterozoic basement in the middle–lower Yangtze River valley and its significance[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1883–1886(in Chinese).
- [52] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构和蘑菇云构造模型[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 209–215.
Yuan Xuecheng. Speed and structure of the Qingling lithosphere and its mushroom tectonic model[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 209–215(in Chinese).

- [53] 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通演化[J]. 科学通报, 2000, 45(21): 2343-2348.
Ling Wenli, Gao Shan, Zhang Benren, et al. A tectothermal event in the Late Paleoproterozoic of Yangtze continental nucleus and the evolution of the Yangtze craton[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21): 2343-2348 (in Chinese).
- [54] 袁海华, 张志兰, 刘炜, 等. 直接测定颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的方法[J]. 矿物岩石, 1991, 11: 72-79.
Yuan Haihua, Zhang Zhilan, Liu Wei, et al. Direct dating method of zircon grains by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ [J]. Mineralogy and Petrology, 1991, 11: 72-79(in Chinese with English abstract).
- [55] Qiu Y, Gao S, Mcnaughton N J, et al. >3.0 Ga continental crust in the Yangtze craton, South China: SHRIMP U-Pb zircon and Nd isotopic evidence[J]. Geology, 2000, 28(1): 11-14.
- [56] 高山, Qiu Yumin, 凌文黎. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb年代学研究. 中国科学(D辑), 2001, 31(1): 27-35.
Gao Shan, Qiu Yumin, Ling Wenli. SHRIMP U - Pb geochronology of single grain zircon in Kongling high grade metamorphic terrane[J]. Science in China (Series D), 2001, 31(1): 27-35(in Chinese).
- [57] 柳小明, 高山, 凌文黎, 等. 扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1334-1337.
Liu Xiaoming, Gao Shan, Ling Wenli, et al. The discovery of 3500 Ma detrital zircon in the Yangtze craton and its geological significance[J]. Progress in Nature Science, 2005, 15(11): 1334-1337(in Chinese).
- [58] 闵庆魁. 宁镇山脉发现前震旦系——埠城群[J]. 地层学杂志, 1987, 11(2): 130-134.
Min Qingkui. The discovery of presinian in Ningzhen Mountains—the Picheng Group[J]. Journal of Stratigraphy, 1987, 11(2): 130-134(in Chinese).
- [59] 邢凤鸣, 陈江峰, 徐祥, 等. 皖南浅变质岩和沉积岩的铅同位素特点及其大地构造意义[J]. 现代地质, 1991, 5(3): 290-299.
Xing Fengming, Chen Jiangfeng, Xu Xiang, et al. Nd isotopic characteristics of lower metamorphic and sedimentary rocks from south Anhui Province and their significance in tectonics[J]. Geoscience, 1991, 5(3): 290-299(in Chinese with English abstract).
- [60] 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[C]//郑永飞主编. 化学地球动力学论文集. 北京: 科学出版社, 1999: 262-287.
Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotopic tracing and crust evolution of southeast China continent[C]//Zheng Yongfei. Chemical Geodynamics Papers. Beijing: Science Press, 1999: 262-287(in Chinese).
- [61] 董树文, 吴宣志, 高锐, 等. 大别造山带地壳速度结构与动力学[J]. 地球物理学报, 1998, 41(3): 349-361.
Dong Shuwen, Wu Xuanzhi, Gao Rui, et al. On the crust velocity levels and dynamics of the Dabieshan orogenic belt[J]. Acta Geophysica Sinica, 1998, 41(3): 349-361(in Chinese with English abstract).
- [62] 赵玉琛. 宁芜地区中生代火山岩地层划分及其特征[J]. 地质科学, 1990, 3: 243-258.
Zhao Yuchen. Stratigraphic division of Mesozoic volcanic strata and their characteristics in Nanjing—Wuhu area[J]. Scientia Geologica Sinica, 1990, 3: 243-258(in Chinese with English abstract).
- [63] William S. Cassata, Paul R. Renne, David L. Shuster. Argon diffusion in plagioclase and implications for thermochronometry: A case study from the Bushveld Complex, South Africa[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009(73): 6600-6612.
- [64] 李秉伦, 谢奕汉. 宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式[J]. 中国科学(B辑), 1984, 1: 80-86.
Li Binglun, Xie Yihan. Origins, classification and metallogenic models of Ningwu style iron deposits in Ningwu area[J]. Science in China (Series B), 1984, 1: 80-86(in Chinese).
- [65] 王铁柱, 车林睿, 余金杰, 等. 梅山铁矿床矿物的电子探针分析和稀土元素地球化学特征[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1964-1985.
Wang Tiezhu, Che Linrui, Yu Jinjie, et al. EPMA and REE geochemical characteristics of minerals in the Meishan iron deposit[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1964-1985(in Chinese with English abstract).
- [66] 李曙光. 长江中下游中生代岩浆岩及铜铁成矿带的深部构造背景[J]. 安徽地质, 2001, 11(2): 118-122.
Li Shuguang. Infrastructure of Mesozoic magmatic rocks and copper-iron metallogenic belt in the Middle and Lower Yangtze River Reaches[J]. Geology of Anhui, 2001, 11(2): 118-122(in Chinese with English abstract).
- [67] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1449-1461 (in Chinese with English abstract).
- [68] Yuan Feng, Zhou Taofa, Liu Jun, et al. Petrogenesis of volcanic and intrusive rocks of the Zhuanqiao stage, Luzong Basin, Yangtze metallogenic belt, East China: implications for ore deposition[J]. International Geology Review, 2011, 53: (5-6), 526-541.
- [69] Deng Jianghong, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, et al. Petrology, geochemistry, and tectonic significance of Mesozoic shoshonitic volcanic rocks, Luzong volcanic basin, eastern China[J]. International Geology Review, 2012, 54(6): 714-736.
- [70] 袁学诚, 李善芳, 管焯. 瑞雷-泰勒不稳定性与中国东部岩石圈——三论岩石圈地幔蘑菇云构造[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 1-11.
Yuan Xuecheng, Li Shanfang, Guan Ye. Rayleigh - Taylor instability and lithosphere of eastern China[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 1-11(in Chinese with English abstract).

LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from gabbro-diorite porphyry related to the Meishan polymetallic iron deposit in northern Ningwu Basin: Constraints on the age of the magmatic-hydrothermal metallogenic system

CHE Lin-rui^{1,2}, YU Jin-jie¹, WANG Tie-zhu¹, LU Bang-cheng², WANG Xian-wei²

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: The Meishan polymetallic iron deposit is one of the representative deposits in Ningwu Basin, with its Fe-Cu-Au-Mo mineralization related closely with the gabbro-diorite porphyry. In this paper, the authors conducted LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of the ore-bearing gabbro-diorite porphyry and the fresh gabbro-diorite porphyry under the orebody, and obtained the U-Pb ages of (137.8 ± 1.7) Ma and (141.2 ± 1.0) Ma, respectively, suggesting that the gabbro-diorite porphyry was formed in 138~141Ma, the accompanying Fe-Cu-Au-Mo mineralization might have taken place later, and both occurred in Early Cretaceous, constrained by a tectonic regime extension and lithospheric thinning environment. Depending on the chronology and geological facts evidence, the authors put forward a new viewpoint that the volcanic-magmatism of Ningwu Basin began from the north and lasted for 7~10 Ma at least. The U-Pb ages of the older zircons from the gabbro-diorite porphyry range from 1903 to 1898 Ma, 1163 Ma and 296 to 292 Ma, suggesting Paleoproterozoic, Neoproterozoic and Early Permian. These data imply that the basement rocks made some contribution to the magmatism and there existed the so-called double layer structure of the Paleoproterozoic crystalline basement plus the Mesoproterozoic-Neoproterozoic fold basement in the Middle-Lower Yangtze River valley metallogenic belt (YRB).

Key words: zircon U-Pb dating; gabbro-diorite porphyry; Meishan, older zircons; northern Ningwu Basin

About the first author: CHE Lin-rui, male, born in 1989, master candidate, majors in mineralogy, petrology and ore mineralogy; E-mail: 815597523@qq.com.

About the corresponding author: YU Jin-jie, male, born in 1966, senior researcher, engages in the study of metal deposits metallogenesis; E-mail: yjjchina@sina.com.