

论文

宁芜(南京-芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义

周涛发^{①②*}, 范裕^①, 袁峰^①, 张乐骏^{①④}, 钱兵^①, 马良^①, 杨西飞^③,
David R COOKE^④

① 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009;

② 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

③ 安徽省化工地质勘查院, 马鞍山 243031;

④ Centre of Excellence in Ore Deposits (CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

* E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn

收稿日期: 2010-05-21; 接受日期: 2010-11-08

国家自然科学基金(批准号: 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)、安徽省公益性地质项目(批准号: 2007-1)、新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-10-0324)和澳大利亚塔斯马尼亚大学国家优秀矿床研究中心科研基金(编号: CODES2009 P2.N3)资助

摘要 宁芜盆地是长江中下游地区最重要的火山岩盆地之一, 发育有龙王山、大王山、姑山和娘娘山 4 组以安山质火山岩为主的地层. 通过对 4 组火山岩中熔岩的锆石 LA-ICP MS 同位素定年, 得到各组火山岩形成的时间分别为: 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. 宁芜盆地内火山岩皆形成于早白垩世, 火山岩浆活动发生的起止时间约为 135~127 Ma, 持续时间在 8~10 Ma 左右. 包括宁芜盆地在内的长江中下游地区各火山岩盆地均不存在侏罗纪火山岩浆活动. 研究结果为进一步探讨和认识长江中下游及中国东部中生代构造-岩浆-成矿作用提供了新的年代学成果.

关键词LA-ICP MS 同位素定年
火山岩
形成时代
宁芜盆地

长江中下游地区是中国重要的铜铁多金属成矿带^[1~4], 该区中生代岩浆活动和成矿作用强烈, 形成以铜陵地区为代表的高钾钙碱性中酸性侵入岩和以宁芜和庐枞地区为代表的橄榄安粗岩系火山岩, 以及铜陵、宁芜和庐枞等多个铜铁多金属矿集区^[1,2,5~17]. 其中, 沿长江深断裂串珠状排列的断陷盆地是火山岩系集中分布区, 构成了特征的断陷火山岩盆地^[4], 由北东向南西顺次有溧水、溧阳、宁芜、繁昌、滁县、庐枞、怀宁和金牛盆地等(图 1), 其中又以宁芜和庐枞火山岩盆地最大, 出露最好, 矿化最强. 盆地区的火山岩和隆起区(如铜陵和安庆等)中的侵入岩是中

国东部中生代燕山期岩浆大爆发的产物^[15,18~20], 与长江中下游铜铁多金属矿床的形成关系密切^[1,10,11], 火山岩与侵入岩在岩石化学、地球化学、成因及其与成矿的关系等方面既存在共性, 又有很多差异. 近年来, 长江中下游地区岩浆作用的年代、地球化学特征、构造背景和深部过程的相关研究取得了重要进展^[15~18,21,22], 宁芜盆地中火山岩和侵入岩的研究工作虽有报道^[23,24], 相关研究仍然严重滞后和不足. 前人对该区曾进行了大量的 K-Ar 和 Rb-Sr 等同位素测年, 但由于传统的 K-Ar 和 Rb-Sr 等同位素测年方法无法准确测定火山岩的形成时代, 包括宁芜盆地在内的

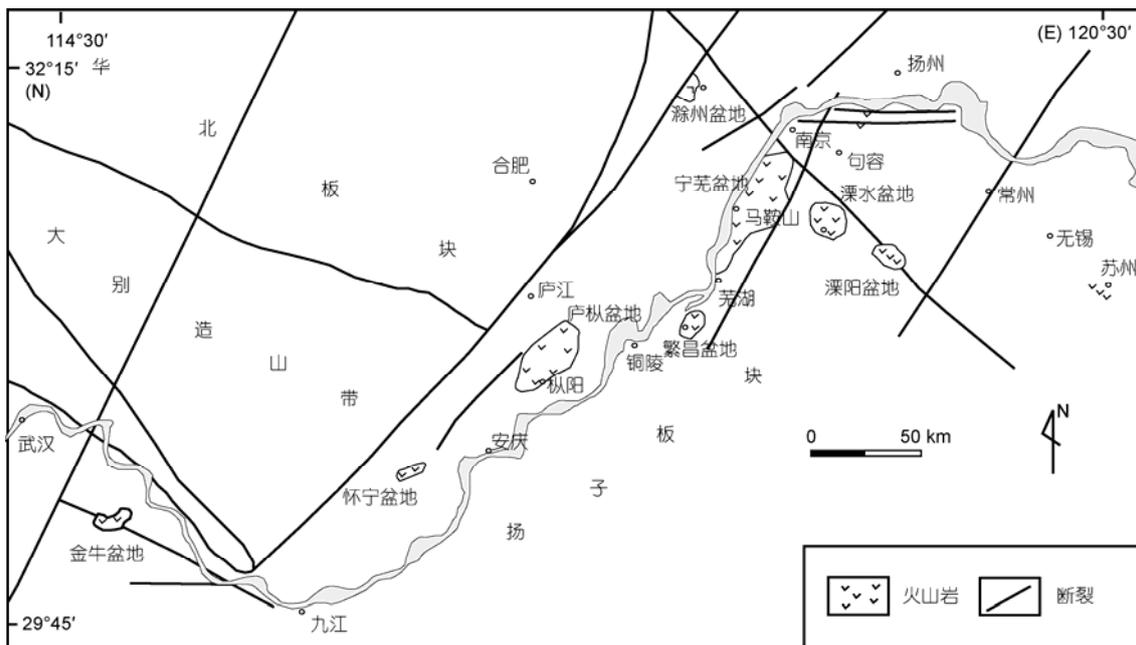


图1 长江中下游地区火山岩盆地分布略图

据翟裕生等^[2]简化

长江中下游地区不同旋回火山活动的精确时间及时限还有待更多的精确年代学制约。近年来报道的相关工作,或只对其中一个组开展定年工作,或定年结果与地质事实不完全吻合,因而,盆地内不同旋回火山岩和次火山岩以及花岗岩的时间关系尚缺乏深入系统的年代学研究工作和精确的年代学数据支持,火山岩及其与侵入岩之间的成因及演化关系尚不清晰,盆地内火山岩形成的动力学背景、壳幔作用过程以及岩浆作用与成矿作用的关系等研究也亟待加强。为此,本文以宁芜盆地为主要研究对象,在前人研究和本次深入细致的野外地质工作的基础上,应用LA-ICP MS同位素测年方法,对宁芜火山盆地中4组火山岩进行了锆石 U-Pb 精确定年,试图确定火山岩的形成时代,重新厘定火山岩形成的时空格架,为探讨火山岩及火山岩盆地形成的地球动力学背景和过程提供新的证据。

1 火山岩地质特征

宁芜盆地位于长江中下游成矿带东部(图1),江苏省南京市和安徽省芜湖市之间。宁芜盆地是由北北东向长江断裂(F_1)、方山-南陵断裂(F_2)和北西向为

南京-湖熟断裂(F_3)控制,属于继承式的中生代陆相盆地^[25](图2)。盆地内的断裂大致可分为NNE, EW和NW向3组,构成宁芜盆地的构造骨架。宁芜盆地内前火山岩系地层主要由上三叠统至中侏罗统组成,以断裂与邻区为界,分布有三叠系周冲村组(T_{2z})和黄马青组(T_3h)及侏罗系象山群(J_{1-2xn})和西横山组(J_{3x})(图2)。宁芜盆地内白垩系陆相火山岩广泛发育,火山岩由老至新分为龙王山、大王山、姑山和娘娘山4组^[25],各组之间均为喷发不整合接触,构成4个火山岩旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始,此后溢流相逐渐增多,最后以火山沉积相结束,喷发方式由裂隙-中心式向典型的中心式喷发演化。火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次火山岩组成,火山碎屑岩的总量高于熔岩类。

龙王山旋回火山岩主要分布于盆地的东部和北部,不整合产于西横山组(J_{3x})或象山群(J_{1-2xn})和黄马青组(T_3h)之上,主要为角闪安山质火山角砾岩、沉火山角砾岩和熔岩,夹凝灰质粉砂岩。大王山旋回火山岩在盆地中分布最广,厚度也最大,广泛分布于盆地的中段和北段,假整合产于龙王山旋回火山岩之上,下部为陆相杂色碎屑沉积岩,上部为角闪安山质熔岩、角砾熔岩、火山角砾岩和沉凝灰岩,构成了宁芜

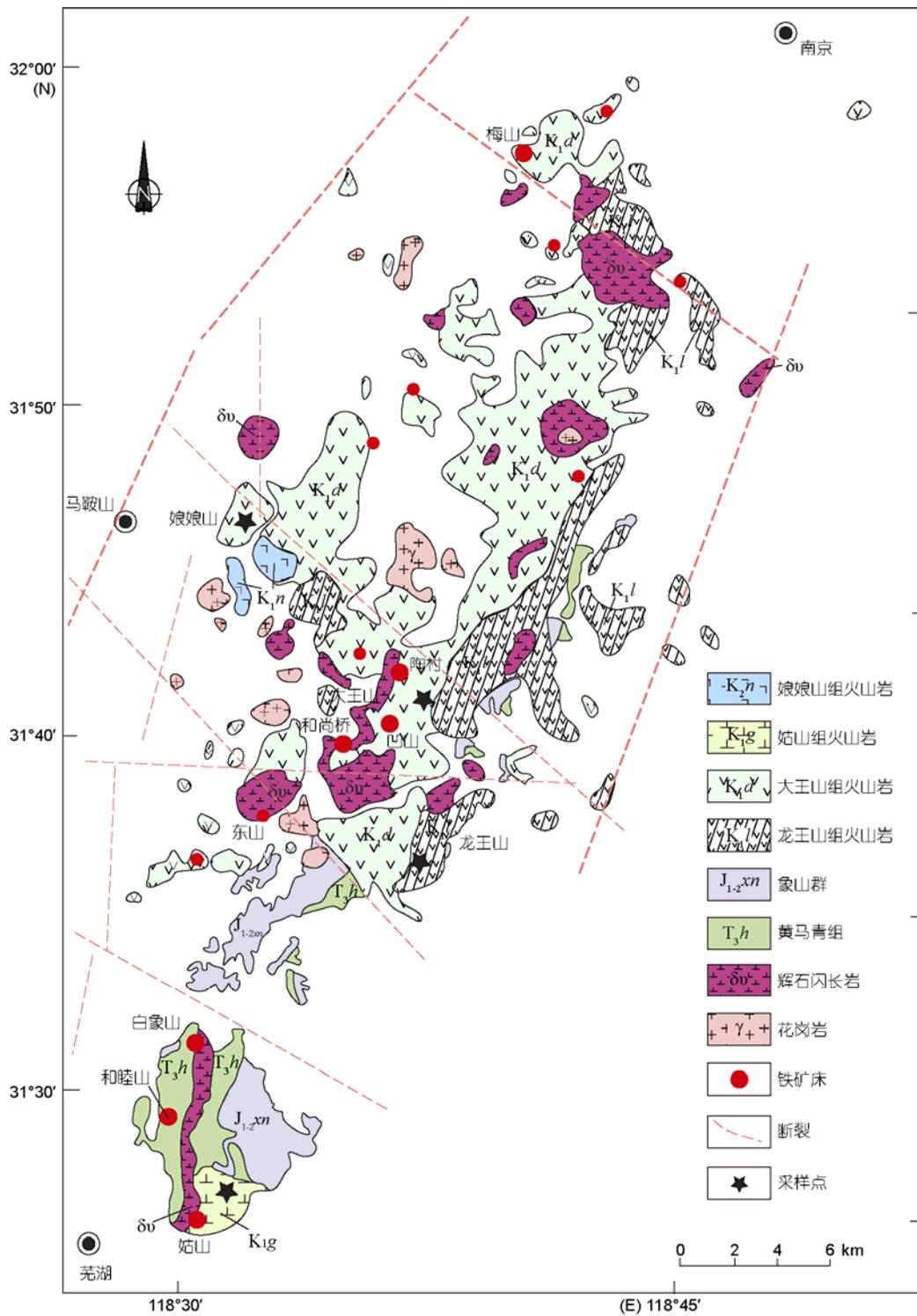


图2 宁芜地区地质矿产略图
据安徽省地勘局322地质队资料修改

盆地火山岩的主体部分. 姑山旋回火山岩主要发育于盆地南段钟姑山地区, 下段为陆相碎屑沉积岩, 上段为安山岩、安山质凝灰角砾岩和凝灰岩. 娘娘山旋回火山岩仅见于盆地中段西部的娘娘山火山口周围, 呈喷发不整合于大王山旋回火山岩之上, 下段主要为假白榴石响岩、集块岩和火山角砾岩, 上段为黝方石响岩和熔结凝灰岩等. 4组火山岩的分层、厚度及岩性特征见图3.

宁芜盆地中次火山岩体广泛发育, 主要以超浅成相侵入体为主, 侵入深度约0.5~1.5 km左右, 岩体出露面积为0.01~10 km². 4个旋回的次火山岩与相应旋回的火山岩在成分上相似. 龙王山旋回次火山岩主要为粗安玢岩和粗面斑岩; 大王山旋回次火山岩以富钠质的中偏基性的辉长闪长岩-辉长闪长玢岩为主; 姑山旋回次火山岩主要为角闪安山玢岩和黑云角闪安山玢岩; 娘娘山旋回次火山主岩要为粗面斑岩. 次火山岩大多形成于每一旋回的晚期. 其中大王山旋回次火山岩体与铁矿床在空间和时间上关系密切, 前人将这类铁矿床统称为玢岩型铁矿床. 对应姑山旋回和娘娘山火山岩浆活动在宁芜盆地内还形成

了大量花岗岩类侵入岩, 主要呈隐伏岩体产于盆地深部, 在盆地中部和北部地区局部出露地表.

2 火山岩锆石 LA-ICP MS 定年

2.1 样品地质特征

本次工作分别采集了4组代表性火山岩样品 LWS-03, DWS-05, SGS-01 和 NNS-02 进行年代学测定, 采样位置见图2和3. 样品的地质特征如下:

LWS-03(采样坐标 31°36'24.5"N, 118°37'41.2"E): 龙王山组上段角闪安山岩. 岩石呈灰黑色, 斑状结构, 基质具交织结构, 块状构造. 主要矿物为斜长石和角闪石. 斜长石属中-拉长石, 斑晶呈板柱状, 粒径约0.2~2.0 mm, 表面具绢云母化. 角闪石斑晶呈柱状, 切面呈六边形, 暗化边发育, 粒径约0.2~1.0 mm, 常沿一定方向排列. 基质由针状斜长石微晶和玻璃质组成, 斜长石微晶呈半平行排列于玻璃质之中, 呈典型的玻晶交织结构.

DWS-05(采样坐标 31°42'11.5"N, 118°37'15.5"E): 大王山组上段角闪安山岩. 岩石呈灰黑色, 少斑结构,

组	厚度(m)	岩性柱	采样位置	主要岩性
娘娘山组	上段 652		← NNS-02	黝方石响岩和熔结凝灰岩等
	下段 230			假白榴石响岩、集块岩和火山角砾岩
姑山组	上段 185		← SGS-01	上部为安山质熔岩, 下部为安山质火山角砾岩, 其中夹有火山沉积岩薄层
	下段 102			凝灰质粉砂岩、泥砾岩夹凝灰岩
大王山组	上段 883		← DWS-05	上部为沉凝灰岩、安山质熔岩、角砾熔岩、火山角砾岩; 下部为熔岩夹火山角砾岩; 底部为角砾凝灰岩
	下段 144			杂色粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩夹凝灰质粉砂岩
龙王山组	513		← LWS-03	角闪安山质熔岩、火山角砾岩, 沉火山角砾岩, 夹凝灰质粉砂岩薄层, 底部为粉砂岩, 砂砾岩

图3 宁芜盆地火山岩地层柱状图

块状构造. 主要矿物为斜长石和角闪石. 仅见稀疏几粒斜长石及角闪石斑晶, 粒径约 0.5~2 mm, 分布在密集排列的斜长石小板条构成的似粗面结构的基质中, 角闪石已全部暗化, 仅保存其柱状外形.

SGS-01(采样坐标 31°27'26.3"N, 118°32'15.2"E): 姑山组上段角闪辉石安山岩. 岩石呈灰白色, 块状构造, 斑状结构. 主要矿物为斜长石、角闪石和辉石. 斜长石属中-拉长石, 斑晶呈半自形, 粒径 0.5~3.5 mm. 辉石为普通辉石, 他形, 粒径 0.05~0.1 mm, 略带褐色, 具解理, 角闪石斑晶呈柱状, 切面呈六边形, 均已暗化. 基质主要为斜长石微晶, 具有较弱的定向性, 具交织结构.

NNS-02(采样坐标 31°47'02.6"N, 117°32'04.0"E): 娘娘山上段黝方石响岩. 岩石呈灰黑色, 块状构造, 斑状结构, 基质具微晶结构. 主要矿物为钾长石、霓辉石和黝方石. 黝方石斑晶切面呈六方形, 粒径 0.05~0.10 mm, 多熔成港湾状; 钾长石斑晶呈板状或熔蚀成圆形, 粒径 0.3~3.0 mm, 数个钾长石斑晶常聚集在一起, 构成聚斑结构; 霓辉石斑晶呈柱状, 具环带结构, 粒径 0.05~0.10 mm. 基质具微晶结构, 主要由钾长石和霓辉石组成, 钾长石呈细小的板条状.

2.2 测年方法及结果

用于锆石年代学测试的样品首先经过破碎, 经浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石, 然后在双目镜下挑纯, 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阴极发光(CL)分析(部分图像如图 4 所示), 最后根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行 LA-ICP-MS 测年分析, 本文的锆石 U-Pb 年龄在西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 上测定. 分析仪器为 Elan6100DRC 型四极杆质谱仪和德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 型激光剥蚀系统. 该激光剥蚀系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193 nm)和 Detlef Gunther 教授为 MicroLas 公司设计的光学系统组成^[26]. 采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化. 锆石 U-Pb 年龄分析采用的光斑直径为 30 μm ,

并采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 外标校正方法为每隔 4~5 个样品分析点测一次标准, 保证标准和样品的仪器条件完全一致. 样品的同位素数据处理采用 Glitter(4.0 版)软件进行, 普通铅校正采用 Andersen^[27]的方法, 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(3.23 版)进行^[28], 测试中的误差标准为 1σ , 实验的详细流程参见袁洪林等^[26]和 Yuan 等^[29]. 本次实验除去古老锆石及异常的锆石年龄, 有效的测试数据为 51 个, 具体分析结果见表 1.

宁芜盆地火山岩中锆石除极少部分具有浑圆的外形外, 绝大多数结晶较好, 呈典型的长柱状晶形, 具有典型的岩浆震荡环带(图 4), 指示其主体为岩浆结晶的产物. 由锆石的阴极发光图像可以看出(图 4), 所有锆石均具有清晰的内部结构. 尽管少部分锆石显示具有核幔结构, 但大多数锆石具有典型的单期生长的同心环带特征. 锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因. 岩浆锆石的 Th/U 比值一般大于 0.1, 而变质老锆石的 Th/U 比值一般小于 0.1^[30]. 宁芜火山岩锆石中 Th/U 比值均远大于 0.1, 属典型的岩浆成因锆石, 且锆石群形态单一, 多数为喷发期岩浆活动一次结晶而形成的, 能代表火山岩的形成年龄.

由于本次工作用于分选锆石的每个样品采样均较充足(单样重大于 15 kg), 分选出的锆石颗粒较多, 保证了各样品用于 U-Pb 年代学测试的新生锆石均为晶体特征完好、形态类似和无变质壳的颗粒. 4 件样品(LWS-03, DWS-05, SGS-01 和 NNS-02)校正后的有效数据点分别为 13, 16, 20 和 12 个, LA-ICP-MS 法测年数据见表 1, 谐和图见图 5. 4 件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 (134.8 \pm 1.3), (132.2 \pm 1.6), (129.5 \pm 0.8)和(126.6 \pm 1.1) Ma. 因此, 宁芜盆地龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组火山岩的形成的主体时代分别为 134.8, 132.2, 129.5 和 126.6 Ma, 属早白垩世.

3 讨论

3.1 宁芜盆地火山岩的形成时代

前人在 20 世纪 70~80 年代已对宁芜盆地内的火山岩进行了较多的同位素测年工作, 但由于早期测年多为传统的 K-Ar 和 Rb-Sr 方法^[25], 所得年龄的误差值很大, 据此不同学者对宁芜盆地 4 组火山岩的时限得出了明显不同的认识, 对火山岩的分期意见主

表 1 宁芜盆地 4 组火山岩锆石 U-Pb 分析结果

分析点	质量分数(10^{-6})			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
	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	
LWS-03	龙王山组火山岩																	
LWS-03-01	206	157	0.76200	0.05492	0.01727	0.1612	0.04938	0.02129	0.00157	0.00693	0.00079	135.8	9.93	151.8	43.18	139.6	15.9	
LWS-03-02	3561	1682	0.47250	0.04929	0.00342	0.14426	0.00979	0.02122	0.00044	0.00600	0.00024	135.4	2.77	136.8	8.69	121.0	4.7	
LWS-03-03	69.8	87.5	1.25415	0.04823	0.00631	0.14053	0.01795	0.02114	0.00067	0.00543	0.00034	134.8	4.21	133.5	15.98	109.5	6.9	
LWS-03-04	1983	1716	0.86549	0.05871	0.00204	0.17126	0.00591	0.02115	0.00031	0.01044	0.00021	134.9	1.96	160.5	5.12	210.0	4.1	
LWS-03-05	142	185	1.29840	0.05317	0.00251	0.15459	0.00716	0.02108	0.00032	0.00688	0.00017	134.5	2.01	146.00	6.3	138.5	3.4	
LWS-03-06	93.4	146	1.56881	0.06886	0.00621	0.20054	0.01753	0.02112	0.00054	0.00821	0.00039	134.7	3.41	185.6	14.83	165.3	7.8	
LWS-03-07	79.0	130	1.64503	0.07304	0.01117	0.21252	0.03141	0.0211	0.00089	0.01041	0.00077	134.6	5.59	195.7	26.3	209.3	15.4	
LWS-03-08	3855	1289	0.33447	0.04804	0.00306	0.14237	0.00893	0.02149	0.00042	0.01001	0.00048	137.1	2.67	135.1	7.94	201.3	9.6	
LWS-03-09	2313	1009	0.43637	0.0567	0.00414	0.16552	0.01178	0.02117	0.00044	0.00761	0.00021	135.0	2.78	155.5	10.26	153.3	4.1	
LWS-03-10	1276	1065	0.83517	0.08066	0.00428	0.23782	0.01212	0.02138	0.00034	0.00669	0.00029	136.4	2.14	216.6	9.94	134.7	5.7	
LWS-03-11	2260	1760	0.77873	0.05213	0.00147	0.15032	0.00399	0.02091	0.00020	0.00665	0.00020	133.4	1.25	142.2	3.53	133.9	4.0	
LWS-03-12	889	690	0.77611	0.05269	0.00364	0.15406	0.01042	0.0212	0.00041	0.00669	0.00021	135.3	2.57	145.5	9.17	134.7	4.1	
LWS-03-13	188	233	1.23909	0.0474	0.00646	0.13999	0.01869	0.02142	0.00067	0.00683	0.00042	136.6	4.26	133.0	16.65	137.5	8.5	
DWS-05	大王山组火山岩																	
DWS-05-01	83.6	63.35	1.32	0.0538	0.0150	0.1581	0.0429	0.0213	0.00137	0.00972	0.00099	135.8	8.7	149.1	37.6	195.6	19.9	
DWS-05-02	73.6	65.2	1.13	0.0521	0.0173	0.1479	0.0479	0.0206	0.00155	0.00825	0.00110	131.3	9.8	140.1	42.3	166.1	22.0	
DWS-05-03	148	175	0.85	0.0491	0.0041	0.1442	0.0118	0.0213	0.00047	0.00662	0.00023	135.8	2.9	136.8	10.5	133.4	4.6	
DWS-05-04	132	136	0.97	0.0489	0.0033	0.1424	0.0095	0.0211	0.00035	0.00678	0.00018	134.4	2.2	135.1	8.5	136.5	3.6	
DWS-05-05	60.6	54.2	1.12	0.0588	0.0138	0.1662	0.0378	0.0205	0.00118	0.00816	0.00071	130.5	7.5	156.1	32.9	164.3	14.2	
DWS-05-06	148	161	0.91	0.0521	0.0038	0.1470	0.0107	0.0204	0.00036	0.00667	0.00017	130.3	2.3	139.2	9.5	134.4	3.5	
DWS-05-07	66.4	53.0	1.25	0.0501	0.0083	0.1415	0.0229	0.0205	0.00080	0.00576	0.00043	130.6	5.0	134.3	20.3	116.1	8.7	
DWS-05-08	115	112	1.03	0.0516	0.0029	0.1457	0.0081	0.0205	0.00035	0.00565	0.00015	130.5	2.2	138.1	7.1	113.9	3.1	
DWS-05-09	113	106	1.07	0.0529	0.0060	0.1492	0.0166	0.0205	0.00059	0.00603	0.00028	130.5	3.7	141.2	14.7	121.6	5.7	
DWS-05-10	118	138	0.86	0.0488	0.0050	0.1437	0.0144	0.0213	0.00057	0.00676	0.00026	136.0	3.6	136.3	12.8	136.3	5.2	
DWS-05-11	74.5	76.1	0.98	0.0732	0.0285	0.2106	0.0794	0.0209	0.00212	0.01027	0.00141	133.1	13.4	194.0	66.6	206.6	28.3	
DWS-05-12	103	96.5	1.07	0.0815	0.0114	0.2362	0.0318	0.0210	0.00091	0.00589	0.00037	134.0	5.7	215.3	26.1	118.7	7.4	
DWS-05-13	125	163	0.77	0.1688	0.0059	0.5248	0.0175	0.0226	0.00039	0.00877	0.00020	143.8	2.4	428.3	11.7	176.5	4.0	
DWS-05-14	315	213	1.48	0.0507	0.0031	0.1437	0.0085	0.0206	0.00041	0.00564	0.00018	131.4	2.6	136.3	7.5	113.7	3.7	
DWS-05-15	112	97.0	1.15	0.0494	0.0061	0.1434	0.0172	0.0211	0.00068	0.00453	0.00025	134.5	4.3	136.0	15.3	91.4	5.1	
DWS-05-16	66.2	57.3	1.16	0.0829	0.0111	0.2408	0.0307	0.0211	0.00089	0.00534	0.00038	134.6	5.6	219.1	25.2	107.6	7.6	

续(表 1)

分析点	质量分数(10^{-6})			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	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
SGS-01	姑山组火山岩																
SGS-01-01	193	119	1.62	0.0497	0.0012	0.1389	0.0034	0.0203	0.00025	0.00611	0.00010	129.4	1.6	132.0	3.0	123.1	2.0
SGS-01-02	206	137	1.50	0.0487	0.0011	0.1386	0.0033	0.0206	0.00026	0.00636	0.00010	131.6	1.6	131.8	2.9	128.1	2.1
SGS-01-03	175	102	1.72	0.0501	0.0016	0.1403	0.0044	0.0203	0.00027	0.00616	0.00012	129.6	1.7	133.3	3.9	124.1	2.4
SGS-01-04	240	179	1.35	0.0504	0.0014	0.1421	0.0040	0.0204	0.00027	0.00656	0.00012	130.4	1.7	134.9	3.6	132.1	2.4
SGS-01-05	220	200	1.10	0.0521	0.0024	0.1462	0.0065	0.0203	0.00031	0.00654	0.00015	129.8	2.0	138.6	5.8	131.8	3.1
SGS-01-06	175	144	1.22	0.0486	0.0021	0.1334	0.0057	0.0199	0.00029	0.00646	0.00015	127.2	1.9	127.2	5.1	130.2	3.1
SGS-01-07	224	139	1.60	0.0508	0.0017	0.1416	0.0048	0.0202	0.00028	0.00611	0.00011	129.1	1.8	134.5	4.3	123.1	2.3
SGS-01-08	212	172	1.24	0.0470	0.0014	0.1312	0.0038	0.0203	0.00026	0.00643	0.00012	129.3	1.7	125.2	3.4	129.6	2.4
SGS-01-09	324	322	1.01	0.0479	0.0020	0.1339	0.0054	0.0203	0.00029	0.00645	0.00015	129.5	1.8	127.6	4.9	130.0	3.0
SGS-01-10	140	136	1.03	0.0524	0.0023	0.1437	0.0062	0.0199	0.00030	0.00778	0.00018	127.0	1.9	136.3	5.5	156.7	3.6
SGS-01-11	196	111	1.77	0.0501	0.0017	0.1409	0.0046	0.0204	0.00028	0.00643	0.00014	130.2	1.8	133.9	4.1	129.6	2.7
SGS-01-12	285	184	1.55	0.0479	0.0019	0.1347	0.0052	0.0204	0.00029	0.00668	0.00015	130.3	1.9	128.3	4.6	134.5	3.1
SGS-01-13	338	281	1.20	0.0502	0.0023	0.1411	0.0065	0.0204	0.00031	0.00668	0.00018	130.0	2.0	134.0	5.7	134.7	3.7
SGS-01-14	290	233	1.24	0.0508	0.0015	0.1422	0.0041	0.0203	0.00027	0.00658	0.00013	129.6	1.7	135.0	3.7	132.5	2.6
SGS-01-15	222	218	1.02	0.0485	0.0013	0.1353	0.0037	0.0203	0.00027	0.00666	0.00013	129.2	1.7	128.9	3.3	134.2	2.5
SGS-01-16	250	171	1.46	0.0505	0.0062	0.1416	0.0169	0.0204	0.00060	0.00683	0.00039	129.8	3.8	134.5	15.0	137.6	7.8
SGS-01-17	260	245	1.06	0.0477	0.0019	0.1337	0.0052	0.0203	0.00030	0.00646	0.00016	129.6	1.9	127.4	4.7	130.2	3.2
SGS-01-18	227	192	1.18	0.0509	0.0023	0.1419	0.0064	0.0202	0.00031	0.00643	0.00017	129.1	2.0	134.7	5.7	129.6	3.5
SGS-01-19	359	381	0.94	0.0519	0.0022	0.1450	0.0060	0.0203	0.00031	0.00684	0.00018	129.3	1.9	137.5	5.3	137.8	3.6
SGS-01-20	226	140	1.61	0.0482	0.0018	0.1353	0.0049	0.0204	0.00029	0.00680	0.00017	130.0	1.9	128.9	4.4	136.9	3.3
NNS-02	娘娘山组火山岩																
NNS-02-01	409	392	0.96	0.0491	0.0020	0.1337	0.0053	0.0198	0.00029	0.00609	0.00012	126.1	1.8	127.4	4.7	122.7	2.5
NNS-02-02	342	277	0.81	0.0625	0.0037	0.1707	0.0099	0.0198	0.00037	0.00660	0.00020	126.5	2.3	160.0	8.6	132.9	4.0
NNS-02-03	277	323	1.17	0.0592	0.0043	0.1627	0.0115	0.0199	0.00042	0.00621	0.00019	127.1	2.6	153.0	10.0	125.2	3.8
NNS-02-04	555	320	0.58	0.0571	0.0033	0.1558	0.0087	0.0198	0.00035	0.00660	0.00021	126.3	2.2	147.0	7.7	133.0	4.3
NNS-02-05	300	572	1.91	0.0541	0.0020	0.1489	0.0055	0.0200	0.00029	0.00620	0.00011	127.4	1.8	140.9	4.8	124.9	2.2
NNS-02-06	335	636	1.90	0.0496	0.0013	0.1351	0.0035	0.0198	0.00026	0.00618	0.00010	126.2	1.6	128.7	3.1	124.6	1.9
NNS-02-07	722	1129	1.56	0.0477	0.0011	0.1306	0.0032	0.0199	0.00026	0.00872	0.00014	126.8	1.6	124.7	2.9	175.4	2.8
NNS-02-08	846	1925	2.27	0.0498	0.0016	0.1359	0.0042	0.0198	0.00027	0.00926	0.00016	126.3	1.7	129.4	3.8	186.4	3.2
NNS-02-09	76.1	90.7	1.19	0.0490	0.0046	0.1335	0.0123	0.0198	0.00047	0.00634	0.00022	126.2	2.9	127.2	11.0	127.8	4.5
NNS-02-10	272	165	0.61	0.0491	0.0016	0.1347	0.0045	0.0199	0.00028	0.00632	0.00014	126.9	1.8	128.3	4.0	127.3	2.8
NNS-02-11	670	915	1.37	0.0679	0.0054	0.1862	0.0143	0.0199	0.00047	0.00693	0.00023	126.9	3.0	173.4	12.2	139.5	4.6
NNS-02-12	833	776	0.93	0.0497	0.0019	0.1359	0.0051	0.0199	0.00029	0.00603	0.00014	126.7	1.9	129.4	4.5	121.6	2.8

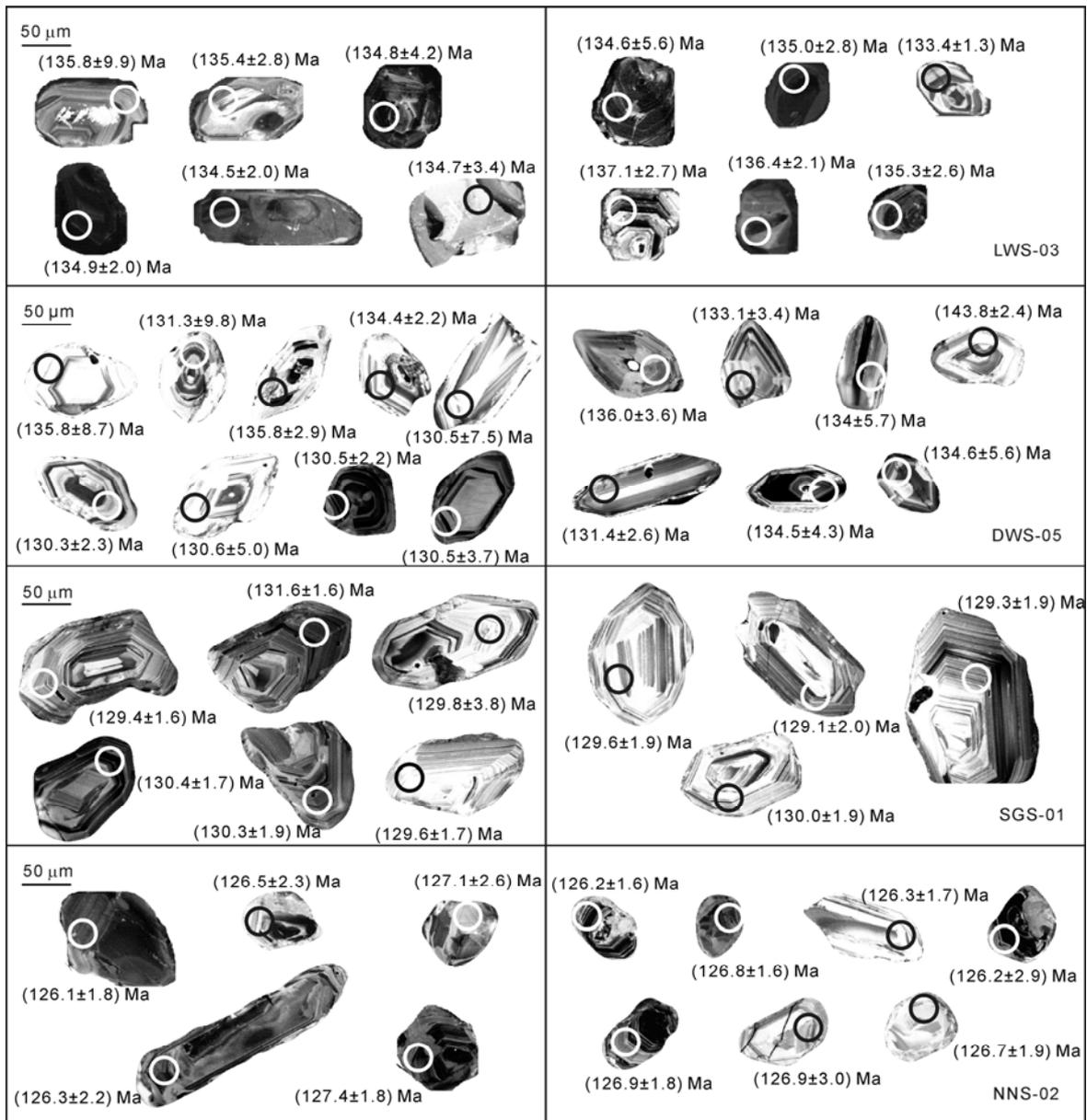


图4 宁芜盆地火山岩样品部分锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

要: 龙王山组 126.8~125.3 Ma; 大王山组 121.4~120.2 Ma; 姑山组 115.7~109.7 Ma; 娘娘山组 105.7~99.8 Ma^[25]. 由此可见, 上述 K-Ar 和 Rb-Sr 同位素年龄测定值极不统一, 变化范围极大, 且许多年龄值和地质事实相矛盾. 张旗等^[31]通过锆石 SHRIMP 定年获得了宁芜盆地内的龙王山和大王山火山岩的年龄分别为(131±4)和(127±3) Ma, 闫峻等^[23]通过锆石 La-ICPMS 定年获得了娘娘山组火山岩的年龄为(130.6±1.1) Ma, 上述工作对宁芜盆地火山岩的年龄

进行了一定的限定, 但龙王山组和大王山组火山岩的年龄跨度明显过大, 娘娘山组火山岩年龄大于大王山组火山岩年龄, 与火山岩地质特征矛盾, 且未能确定姑山组火山岩的年龄, 其年龄值只具有参考价值. 因此, 本次工作系统采集了宁芜盆地内 4 组火山岩代表性样品, 得到龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组火山岩的形成时间分别为(134.8±1.3), (132.2±1.6), (129.5±0.8)和(126.6±1.1) Ma, 其结果较以往数据系统性和可靠性有较大提高, 证据如下:

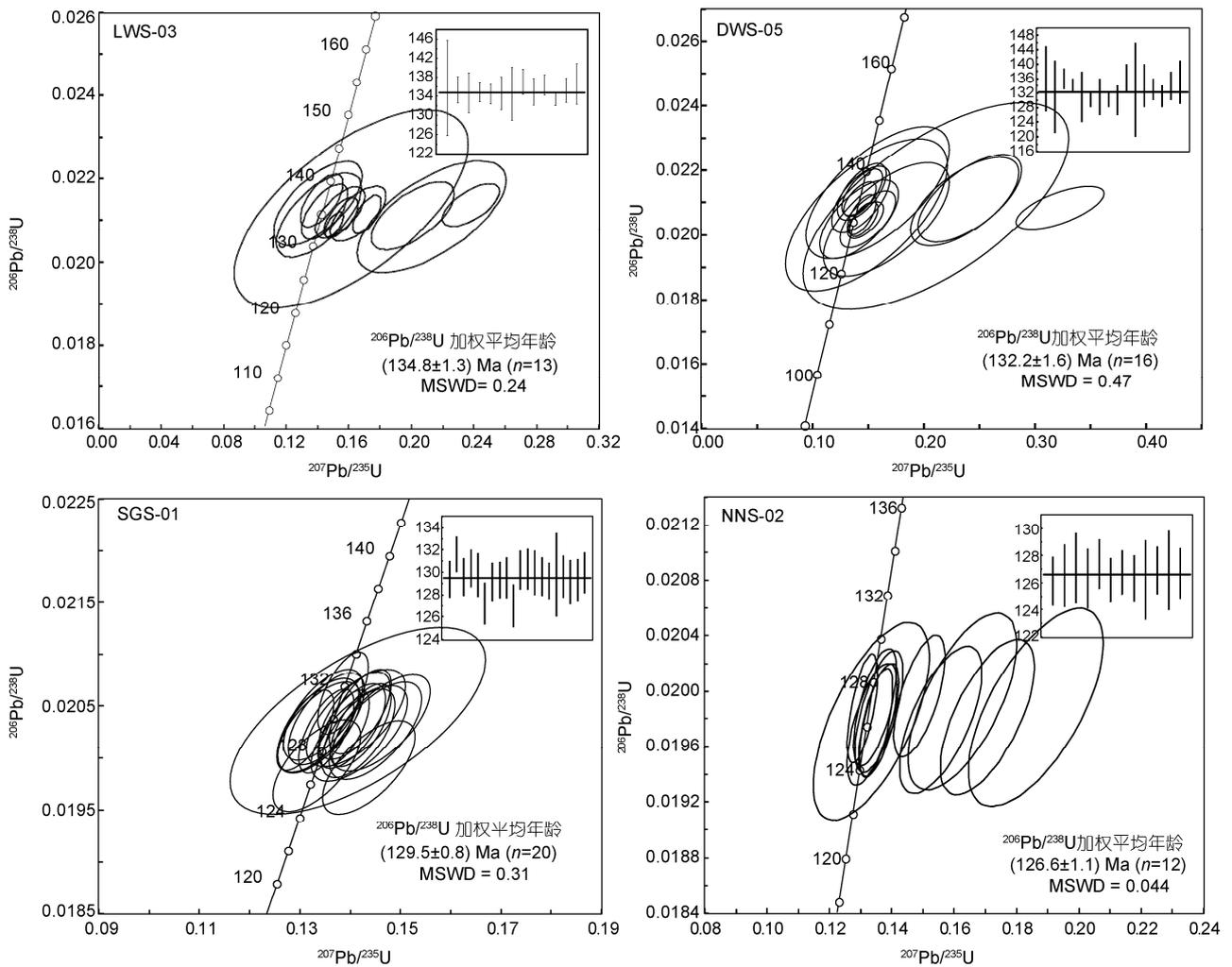


图 5 宁芜盆地火山岩锆石 U-Pb 一致曲线图

宁芜盆地内大王山旋回次火山岩体(闪长玢岩)广泛发育,与铁矿化关系密切,野外地质现象表明这类闪长玢岩为大王山旋回火山活动晚期的产物,早于姑山旋回火山活动.有如下地质证据:在盆地南部,可见姑山旋回底部的岩层以沉积关系与辉长闪长岩的侵蚀面接触,沉积岩层底部含有辉长闪长岩和铁矿石角砾,盆地北部梅山地区的冯圩村,姑山旋回的角闪安山岩中产出磷灰石-透辉石-磁铁矿角砾,在钟九矿区的三板桥、裴谷村、祖山堂和龙巢水库等地(图 2),可见姑山旋回的角闪安山玢岩和黑云母角闪安山玢岩岩脉侵入到辉长闪长玢岩中,在回坟头地区可见黑云母角闪安山玢岩岩脉切穿了辉长闪长玢岩内的磁铁矿脉.盆地内闪长玢岩的测年结果表明它们均形成于 130 Ma 左右^[32],正好介于本次

测得的大王山组火山岩年龄((132.2±1.6) Ma)与姑山组的火山岩年龄((129.5±0.8) Ma)之间.盆地内花岗岩类的形成时代晚于闪长玢岩,为姑山旋回和娘娘山旋回活动的产物.在盆地中部地区,地表可见辉长闪长岩被稍晚的花岗岩类岩体所侵入;和尚桥矿区,花岗闪长岩沿北北东方向呈带状侵入破坏早期的闪长玢岩.花岗岩类侵入体的形成时代约为 127~123 Ma^[32],与本次测得的姑山组火山岩年龄(129.5±0.8) Ma 和娘娘山组火山岩年龄(126.6±1.1) Ma 相吻合.因此,本文的年代学结果与观察到的地质证据完全吻合.上述事实表明,本次年代学测年工作得到的火山岩年龄数据精度和可信度高,可以有效区分时间相近的岩浆活动事件,为确定宁芜盆地岩浆岩的时空格架奠定了坚实的基础.

由本次测年结果可见, 宁芜盆地4组火山岩形成总的时限约在 135~127 Ma 之间, 因此宁芜盆地火山岩均为早白垩世岩浆活动的产物, 而并非前人所认为的龙王山组和大王山组火山岩的时代为晚侏罗-早白垩世, 姑山组和娘娘山组火山岩的时代为白垩纪. 宁芜盆地火山活动持续时间短, 约为 8~10 Ma 左右, 而非前人报道的近 30 Ma 的火山活动持续时间^[25]. 最近, 侯可军和袁顺达^[24]也给出了宁芜盆地部分火山岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄: 大王山组粗安岩 (130.3±0.9) Ma; 姑山组两个粗安岩 (128.2±1.3) 和 (128.5±1.8) Ma, 深化了对这两个组火山岩形成时代的认识, 但定年结果略偏年轻, 且未能识别出大王山组和姑山组火山活动之间的明显时间间断, 因为在宁芜盆地中, 大王山组和姑山组火山活动之间存在明显的火山喷发宁静期, 大王山旋回后, 盆地抬升接受剥蚀, 在盆地南部, 可见姑山旋回底部的岩层以沉积关系与辉长闪长岩的侵蚀面接触, 沉积岩层底部含有辉长闪长玢岩和铁矿角砾, 说明大王山组和姑山组两组火山岩的形成应有明显的时代间隔. 因此, 基于本次工作对 4 个组火山岩的锆石 LA-ICP MS 定年结果, 参考前人已有的同位素年代学研究结果, 特别是遵从宁芜盆地内闪长玢岩和火山岩的野外地质关系观察结果和闪长玢岩的形成时代, 本文认为早期火山岩浆活动(龙王山和大王山旋回)的时限约为 135~130 Ma (130 Ma 为大王山旋回晚期闪长玢岩体的结晶时间^[32]), 晚期火山岩浆活动(姑山和娘娘山旋回)时限约在 130~127 Ma 之间.

3.2 宁芜盆地火山岩与邻区岩浆岩时代对比

长江中下游地区自北东向南西分布有宁芜和庐枞等 8 个火山岩盆地(图 1), 这些盆地内火山岩地层的时代归属和地层对比一直是人们所关注的问题. 根据野外地质特征和少量陆相植物化石, 不同学者曾提出了各自的划分对比方案, 但过去由于上述盆

地内火山岩的高精度年代学数据不足, 无法形成共识. 根据我们对宁芜盆地火山岩的年代学研究结果及与区域火山岩地层的对比分析(表 2), 认为大多数盆地内火山活动都可划分为两期 4 个旋回, 对应 4 组火山岩地层, 不同盆地内的火山旋回在时间上大致可以对应. 从表 2 可见, 宁芜盆地龙王山组、庐枞盆地龙门院组和繁昌盆地中分村组火山岩的形成时代分别为(134.8±1.3), (134.8±1.8)和(134.4±2.9) Ma^[33,34]; 鄂东南地区金牛盆地大寺组火山岩锆石 SHRIMP 年龄为(128±1) Ma^[35], 与宁芜盆地姑山组和庐枞盆地双庙组火山岩年龄相近; 因此, 长江中下游地区相距几百公里的宁芜、庐枞、繁昌和金牛盆地中 4 组火山岩的形成时代基本一致, 各旋回火山活动时间几乎相同, 各陆相火山岩盆地均形成于早白垩世, 区域上不存在侏罗纪火山岩浆活动, 这些火山岩盆地的形成受统一的动力学背景控制.

对高精度的岩浆岩年龄分析(包括 SHRIMP 锆石 U-Pb 法和 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 法)表明, 长江中下游地区的岩浆活动在时空上表现出明显的分区性和演化趋势^[36]. 145~136 Ma 的岩浆活动主要发生在隆起区(如铜陵和安庆地区等), 是铜金矿化的主要时期^[37,38]; 而 135~127 Ma 的岩浆活动主要发生在凹陷区(如宁芜和庐枞盆地等), 是铁矿化的主要时期; 之后的 A 型花岗岩集中形成于 126~123 Ma, 既可以产于隆起区, 又可以产于凹陷区^[36,39,40], 与铀、金矿化有关. 因此, 长江中下游地区岩浆岩的形成时代分期集中在 145~136, 135~127 和 126~120 Ma 等 3 个时期, 宁芜盆地中的火山岩属于其中的第二期岩浆作用产物.

3.3 地球动力学背景

包括宁芜盆地在内的长江中下游地区中生代火山岩是中国东部火成岩省的重要组成部分, 其形成受中国东部中生代燕山期的地球动力学背景制约.

表 2 长江中下游火山岩地层划分对比

宁芜盆地		庐枞盆地		繁昌盆地		金牛盆地	
火山岩地层	成岩时代(Ma)	火山岩地层	成岩时代(Ma)	火山岩地层	成岩时代(Ma)	火山岩地层	成岩时代(Ma)
娘娘山组	126.6±1.1	浮山组	127.1±1.2	三梁山组	128.1±3.1	太和组	
姑山组	129.5±0.8	双庙组	130.5±0.8	蝌蚪山组	130.8±2.2	大寺组	128±1
大王山组	132.2±1.6	砖桥组	134.1±1.6	赤砂组	131.3±1.8	灵乡组	
龙王山组	134.8±1.3	龙门院组	134.8±1.8	中分村组	134.4±2.9	马架山组	

该地区在中生代经历了区域构造体制转换和重大调整的过程, 主构造格局由近 EW 向转换为 NE-NNE 向^[41-43], 在晚中生代该地区可能经历了地壳加厚、拉张、下地壳拆沉、岩石圈减薄、软流圈上涌和壳幔相互作用的动力学演化过程^[10,16,44-46], 其控制因素可能与太平洋板块的俯冲作用有关^[22,44]. 长江中下游地区高钾钙碱性中酸性侵入岩形成时代较早(135~145 Ma)^[38,47], 其中具有埃达克岩性质的岩体被认为形成于加厚下地壳的部分熔融^[31,48], 表明当时地壳较厚^[49], 形成岩体的岩浆在演化过程中经历了复杂的壳幔相互作用过程, 其中有富集性质岩石圈地幔的贡献, 指示其形成于挤压-拉张过渡的构造背景. 长江中下游地区橄榄安粗岩系列火山-侵入岩的形成时代稍晚(134~127 Ma), 地球化学特征显示它们形成于软流圈上涌和岩石圈伸展-减薄环境^[50,51]. 因此, 包括宁芜盆地在内的长江中下游地区在 134~127 Ma 期间已进入快速伸展时期, 导致了区内一系列 NNE 向断陷盆地的形成和强烈的火山活动, 宁芜盆地中火山岩正是这一地球动力背景下深源岩浆活动的产物.

4 结论

(1) 宁芜盆地大王山组、龙王山组、姑山组和娘娘山组火山岩的形成时代均为早白垩世早期, 4 组火山岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 (134.8±1.3), (132.2±1.6), (129.5±0.8)和(126.6±1.1) Ma. 宁芜盆地火山活动持续时间约为 8~10 Ma 左右.

(2) 包括宁芜盆地在内, 长江中下游地区的陆相火山岩盆地均形成于早白垩纪, 区域上不存在侏罗纪火山岩浆活动; 不同火山岩盆地几乎是同时形成的, 各盆地中不同旋回火山活动的时间基本一致.

(3) 宁芜盆地火山岩浆活动时限约在 131~127 Ma 之间, 与侵入岩的形成时间基本相同. 长江中下游地区岩浆岩的形成时代分期集中于 145~136, 135~127 和 126~120 Ma, 以宁芜盆地为代表的断凹区火山岩属于第二期岩浆作用产物.

(4) 包括宁芜盆地在内的长江中下游地区的火山岩是早白垩世岩石圈伸展背景下深源岩浆活动的产物.

致谢 研究工作得到常印佛院士、唐永成、汪祥云和汤加富等专家的悉心指导以及安徽省公益性地质项目管理中心李建设、钱存超和陆三明等同志的大力支持, 野外工作得到安徽省地勘局 322 地质队和安徽省化工勘查地质总院的热情帮助, 两位审稿人提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以衷心的感谢.

参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌, 等. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 1-56
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1992. 12-35
- 顾连兴, 徐克勤. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化物矿床. 地质学报, 1986, 16: 176-188
- 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. 北京: 地质出版社, 1998. 60-85
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京: 地质出版社, 1991. 1-206
- 于学元, 白正华. 庐枞地区安粗岩系. 地球化学, 1981, 5: 57-65
- 陈江峰, 谢智, 郑永飞, 等. 皖东侵入岩矿物 Rb-Sr 和 Ar-Ar 年代学及其与氧同位素平衡之间的关系. 高校地质学报, 2003, 9: 172-184
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 等. 中国东部橄榄安粗岩的火山特征及其成矿作用. 地质学报, 1996, 70: 23-34
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1990. 1-191
- Pan Y M, Dong P. 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 Geol Rev*, 1999, 15: 177-242
- 周涛发, 岳书仓. 长江中下游铜、金矿床成矿流体系统的形成条件及机理. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36: 697-707
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰. 安徽月山矿田成岩成矿作用. 北京: 地质出版社, 2005. 1-186
- 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 2001, 30: 353-362
- 赵振华, 涂光焱. 中国超大型矿床(II). 北京: 科学出版社, 2003. 1-617
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Plant Sci*

Lett, 2005, 233: 103–119

- 16 Mao J W, Wang Y T, 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. *Ore Geol Rev*, 2006, 29: 307–324
- 17 吕庆田, 杨竹森, 严家永, 等. 长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试——以铜陵矿集区为例. *地质学报*, 2007, 81: 865–881
- 18 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨. *矿床地质*, 2000, 19: 289–296
- 19 Zhou T F, Yuan F, Yue S C, et al. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn- and vein-type deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geol Rev*, 2007, 31: 279–303
- 20 刘珺, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的岩石地球化学特征及成因. *岩石学报*, 2007, 23: 2615–2622
- 21 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 等. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27: 218–225
- 22 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533–542
- 23 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. *地质论评*, 2009, 55: 121–125
- 24 侯可军, 袁顺达. 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*, 2010, 26: 888–898
- 25 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社, 1978
- 26 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土成分分析. *科学通报*, 2003, 48: 1511–1520
- 27 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59–79
- 28 Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003. 1–70
- 29 Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostand Newsl*, 2004, 28: 353–370
- 30 Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143: 602–622
- 31 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 209–215
- 32 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. *岩石学报*, 2010, 26: 2715–2728
- 33 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1342–1353
- 34 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 安徽繁昌盆地中生代火山岩锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄及其意义. *岩石学报*, 2010, 26: 2805–2817
- 35 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义. *科学通报*, 2006, 51: 2283–2291
- 36 周涛发, 袁峰, 范裕, 等. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. *岩石学报*, 2008, 24: 1665–1678
- 37 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因. *地球学报*, 2003, 24: 41–48
- 38 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年. *地球学报*, 2004, 25: 423–427
- 39 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 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*, 2008, 24: 1715–1724
- 40 楼亚儿, 杜杨松. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP 测年. *地球科学*, 2006, 35: 359–366
- 41 任纪舜, 牛宝贵, 和政军, 等. 中国东部的构造格局和动力演化. 见: 任纪舜, 杨巍然, 主编. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化. 北京: 原子能出版社, 1998. 1–12
- 42 李曙光, 杨蔚. 大别造山带深部地缝合线与地表地缝合线的解耦及大陆碰撞岩石圈楔入模型: 中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素证据. *科学通报*, 2002, 47: 1898–1905
- 43 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. *地质学报*, 2007, 81: 1449–1461
- 44 Sun W D, Xie Z, Chen J F, et al. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. *Econ Geol*, 2003, 98: 175–180
- 45 Xie G Q, Mao J W, Li R L, et al. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo(W) deposits in southeastern Hubei, China. *Miner Petrol*, 2007, 90: 249–270
- 46 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 等. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 127–137
- 47 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 等. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨. *科学通报*, 2004, 49: 1883–1891
- 48 王强, 赵振华, 简平, 等. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. *岩石学报*, 2005, 21: 795–808
- 49 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Early Cretaceous adakitic granites in the northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 2609–2636
- 50 王元龙, 张旗, 王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及意义. *岩石学报*, 2001, 17: 565–575
- 51 Xie G Q, Mao J W, Li R L, et al. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. *Lithos*, 2008, 104: 216–230