

长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用

禹尧, 徐夕生*

南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093

摘要: 根据长江中下游地区中生代火山岩与成矿作用的研究现状, 选择研究工作较为薄弱的、最东端的溧水盆地火山岩为研究对象, 进行了详细的锆石 U-Pb 同位素分析, 并结合本区 4 个不同中生代火山盆地火山岩地球化学、岩性地层学资料, 对各盆地中 4 个火山旋回的火山岩进行了对比研究。研究表明: 溧水盆地龙王山组粗面岩的结晶年龄为 128 Ma, 这标志着长江中下游地区由西向东中生代火山作用的全面展开。4 个火山旋回的时代分别为: >125 Ma、125~120 Ma、120~110 Ma 和 110~90 Ma。庐枞盆地的浮山组与宁芜盆地的姑山组+娘娘山组(即溧水盆地的观山组+甲山组)对应较为恰当, 应属第三火山旋回。本区白垩世火山岩的地球化学特征, 反映这些幔源碱性岩浆在上升过程中受到了陆壳物质的混染, 早期火山岩(如溧水盆地龙王山组)则是 Sr 矿的矿源层。

关键词: 溧水盆地; 富碱火山岩; 锆石 U-Pb 定年; 白垩纪; 长江中下游地区。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2009)01-0105-12

收稿日期: 2008-10-17

Cretaceous Alkali-Rich Magmatism in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

YU Yao, XU Xi-sheng*

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: According to previous research achievements of Mesozoic volcanics and mineralizations in the middle and lower reaches of Yangtze River, the less studied volcanics in Lishui basin have been focused on their geochronology, and detailed U-Pb chronological study of zircons in trachyte has been carried out. Combining with geochemical data and lithostratigraphy for the four separated Mesozoic volcanic basins (i. e., Luzong basin, Fanchang basin, Ningwu basin and Lishui basin), volcanics from each basin with four volcanic cycles has been studied comparatively. It shows that, trachytes from the Longwangshan Formation of Lishui basin were formed in the Early Cretaceous with the crystallization age of about 128 Ma, which implies the incipience of extensive eruption of volcanics along the middle and lower reaches of Yangtze River. The ages of four volcanic cycles are: before 125 Ma, during 125–120 Ma, ranging from 120 to 110 Ma and from 110 to 90 Ma, respectively. It is more reasonable that the Fushan Formation of Luzong basin should be considered as the product of third volcanic cycle, and corresponding to the Gushan and Niangniangshan Formation of Ningwu basin (i. e., Guanshan and Jiashan formations of Lishui basin). The geochemical characteristics of Cretaceous volcanics in this area suggest that the mantle derived alkali magma had been contaminated by crustal materials during its eruption, and early volcanics (e. g., the Longwangshan Formation of Lishui basin) could be the source rock of Sr deposit.

Key words: Lishui basin; alkali volcanics; zircon U-Pb age; Cretaceous; middle-lower Yangtze area.

长江中下游地区是中国重要的铜、铁多金属成矿带。中生代以来, 该地区岩浆活动强烈, 各种火山岩一次火山岩覆盖面积在 5 000 km² 以上(常印佛等, 1991)。前人研究认为, 该成矿带的金属成矿与火山岩盆地中燕山期岩浆活动有密切的成因联系, 岩浆活动与成矿均受控于下扬子地区基底左旋剪切、

“陆内拉张”、岩石圈伸展—减薄、软流圈上涌的构造环境(常印佛等, 1991; 赵太平等, 1994; 周金城等, 1994; Li, 2000; 李超文等, 2004)。在空间上, 中生代火山岩分布于多个陆相火山岩断陷盆地中(图 1), 如: (1) 庐枞盆地, (2) 繁昌盆地, (3) 宁芜盆地, (4) 溧水盆地。各盆地中火山岩地层由老至新又可划分为(或对

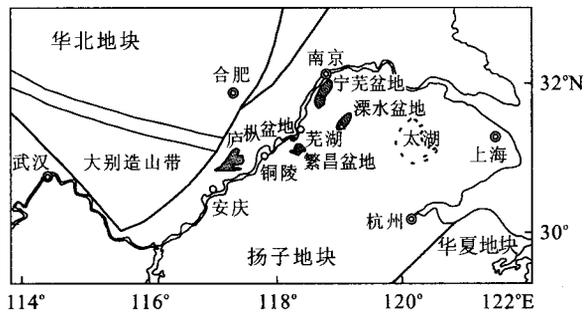


图 1 长江中下游地区晚中生代火山岩盆地分布示意图
(据倪若水等,1998 修改)

Fig. 1 Sketch map showing distributions of Late Mesozoic volcanic basins in the middle-lower Yangtze area

应于):龙王山组、大王山组、姑山组和娘娘山组。

长江中下游火山岩盆地定年工作开展得很早,但鉴于当时实验条件有限,对同一火山岩的分析结果差别较大。有相当多的年龄通过全岩 K-Ar 定年法而得,但由于 Ar 是惰性气体,在矿物晶格中不与其他原子键合,容易造成放射成因 ^{40}Ar 丢失,导致 K-Ar 定年结果偏年轻。用受到蚀变的全岩样品进行 K-Ar 法定年,又由于各矿物抵御热扰动、保存 Ar 的能力各不相同(角闪石最强,黑云母次之,钾长石最差),其所得的年龄结果往往是在不同程度 Ar 丢失情况下的“混合年龄”。随着近年来分析测试技术的革新,精确的 SHRIMP 或 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年工作得以开展(刘洪等,2002;张旗等,2003),使本区火山岩年代学格架更为清晰。总体上看,长江中下游地区火山岩盆地内火山岩的年龄跨度在 91~140 Ma。与此同时,各个火山盆地的地球化学分析数据也在不断积累中(常印佛等,1991;王元龙等,2001;刘洪等,2002;李超文等,2004;高晓峰等,2007)。

然而,对各盆地火山岩的年代学研究并不平衡。以往的研究主要集中在庐枞盆地、繁昌盆地和宁芜盆地,对溧水盆地火山岩年代学研究十分薄弱,仅有一个大王山组高钾安山岩全岩-矿物 Rb-Sr 等时线年龄($125\pm 7\text{ Ma}$;周金城等,1994),其他几组火山岩则尚未开展年代学研究,这制约了对溧水盆地火山岩岩浆旋回起始时间和时代跨度的认识;对各盆地火山岩岩石学和地球化学的对比研究也较为薄弱,所有这些都制约了不同盆地之间地层对应关系的确定及其源区成分差异的研究。

龙王山组作为 4 个喷发旋回中最早的一个,其火山岩年龄代表了火山岩盆地火山活动的开始时间,因而其定年工作极为重要。本文通过对溧水火山

岩盆地中龙王山组粗面岩详细的锆石 U-Pb 年代学研究,结合其他火山岩盆地的年代学和地球化学资料,旨在讨论长江中下游地区中生代火山岩的时代、岩浆作用过程及形成的地球动力学背景。

1 基本地质概况及研究样品

溧水火山岩盆地位于扬子地块的北东缘,西邻郟庐断裂带,是长江中下游断陷带内中生代陆相火山盆地之一(齐文凯,1987;任启江等,1991),也是下扬子沿江火山岩带的重要组成部分。溧水盆地中生代岩系自下而上分为龙王山组、云合山组、大王山组、观山组和甲山组。除云合山组为一套含化石的火山碎屑沉积岩之外,其他 4 组均为火山岩,代表 4 个火山旋回,其中龙王山组和大王山组构成溧水盆地中生代火山岩地层的主体(图 2a)。龙王山组岩性主要为玄武质安山岩、粗面岩和少量角闪安山岩,大王山组下部主要由粗安岩组成;上部主要为粗面岩和角砾凝灰岩(图 2b)。本文研究样品采自龙王山组($31^{\circ}32'32''\text{N}, 119^{\circ}01'41''\text{E}$),为粗面岩(采样剖面见图 2c)。手标本灰红色,致密块状,斑状结构,气孔状构造,肉眼可见肉红色-白色钾长石斑晶。薄片,斑晶含量~35%,主要包括钾长石(60%)、黑云母(20%)、辉石(15%)和其他不透明矿物(磁铁矿),未见角闪石。黑云母、辉石铁镁矿物斑晶常见暗化边,这是由于岩浆喷出地表后压力突然降低,并发生氧化作用而造成的。基质(~65%)主要由钾长石和石英组成。

2 分析方法

首先,从精选的岩石样品中分选出锆石颗粒,将岩石样品破碎到 100 目以下,经重砂淘选和电磁选,分选出无磁性重矿物样品,并在 Nikon 双目镜下挑选出不同形态的锆石颗粒约 100 颗。然后,将锆石颗粒置于环氧树脂制靶,抛光至锆石颗粒中心,制成样品靶。样品靶直径为 1.4 cm。对抛光后的锆石样品,进行显微镜下观察和透、反射光照相,并在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的 JEOL JXA-8100 电子探针仪上进行了 CL 图像分析。工作条件为加速电压 15 kV,束电流 $2\times 10^{-8}\text{ A}$ 。

在通过 CL 图像分析锆石的内部结构后,选择锆石颗粒进行 U-Pb 定年。锆石 U-Pb 年龄测定工作也在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点

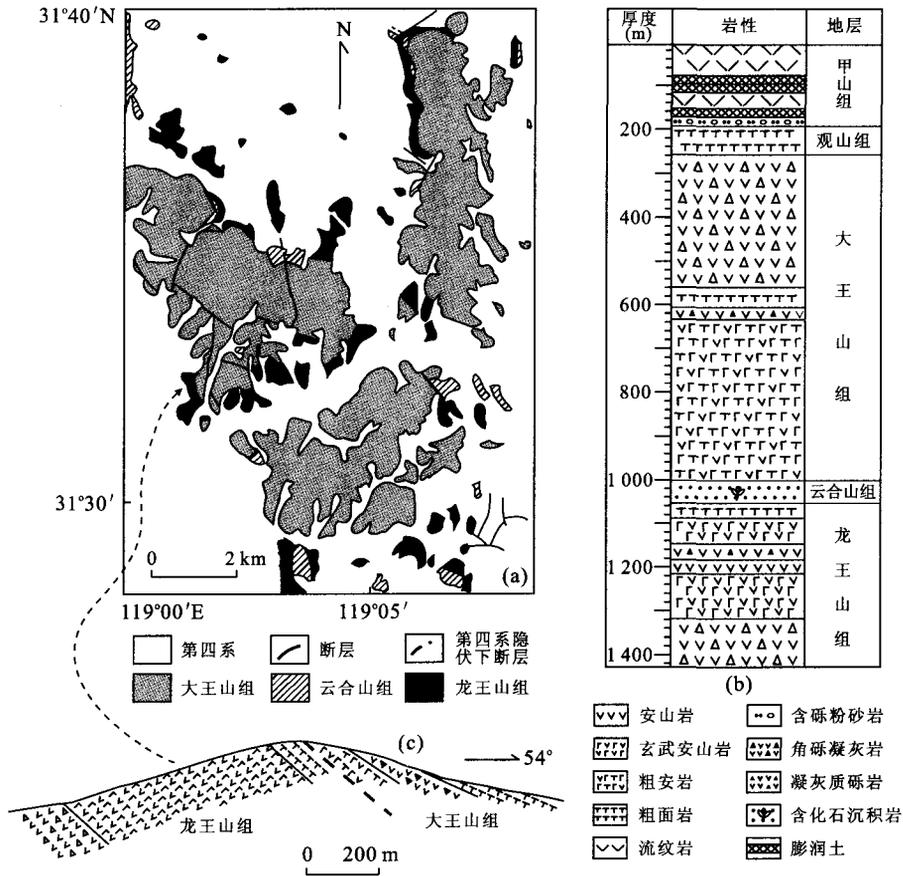


图 2 溧水盆地地质简图(a)(据常州幅①1:20万地质图修改);(b)为溧水盆地中生代火山岩岩性柱状图(据江苏省及上海市区域地质志,1984);(c)为采样剖面图

Fig. 2 Geological sketch map of the Lishui basin

实验室完成. 采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS, 激光剥蚀系统为 New Wave UP213. 工作参数为: 等离子气体 Ar16 L/min, 辅助气体 Ar1 L/min, 剥蚀物质载气 He 0.9~1.2 L/min. 激光剥蚀系统波长 213 nm, 激光脉冲频率 5 Hz, 宽度 5 ns, 剥蚀孔径 40 μm , 剥蚀时间 80 s, 背景测量时间 40 s, 脉冲能量为 10~20 J/cm^2 , ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 的停留时间依次为 15、30、10、10、15 ms. 实验原理和详细测试方法见 Jackson *et al.* (2004). 质谱的分析数据通过即时分析软件 GLITTER(Van Achterbergh *et al.*, 2001) 计算获得相应的同位素比值、年龄以及误差, 上述数据采用 Andersen(2002) 的方法进行普通铅校正, 校正后的最终结果应用 Isoplot 程序(ver. 2.49, Ludwig, 2001) 完成年龄计算和谐和图的绘制.

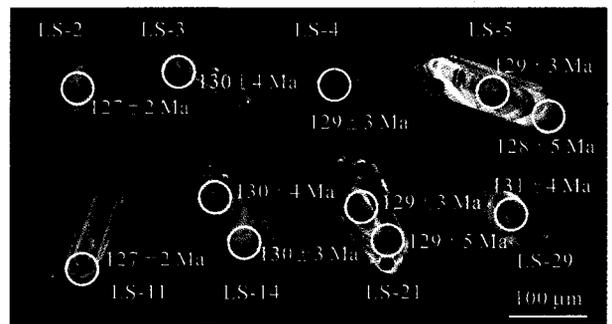


图 3 溧水盆地龙王山组粗面岩中代表性锆石的 CL 图像
Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from trachyte of the Longwangshan Formation, Lishui basin

3 测试结果

从溧水火山岩盆地粗面岩样品(LS01) 中选出的锆石颗粒均较自形, 浅黄色, {100} 4 方柱非常发育, 颗粒大小为 50 μm × 100 μm ~ 50 μm × 200 μm . 代表性锆石颗粒的 CL 图像见图 3, 它们的振荡环带

①安徽省地质调查研究院, 1977. 区域地质调查报告(1:200 000, 常州市幅).

表 1 溧水盆地龙玉山组粗面岩中锆石 LA-ICPMS 定年结果
Table 1 LA-ICPMS U-Pb data of zircons in the trachytes from the Longwangshan Formation of Lishui basin

分析号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素值				年龄(Ma)			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
LS-2	200	249	0.80	0.063 20±0.003 10	0.173 69±0.008 37	0.019 93±0.000 38	0.006 40±0.000 69	715±70	163±7	127±2	129±31
LS-3	113	124	0.91	0.051 65±0.007 16	0.145 64±0.019 72	0.020 44±0.000 70	0.007 66±0.001 57	270±242	138±17	130±4	154±31
LS-4	341	375	0.91	0.073 32±0.005 36	0.203 98±0.014 27	0.020 16±0.000 55	0.009 96±0.003 50	1 023±97	188±12	129±3	200±70
LS-5	99	121	0.82	0.056 35±0.007 77	0.155 86±0.020 90	0.020 05±0.000 73	0.008 01±0.002 47	466±234	147±18	128±5	161±50
LS-6	182	194	0.94	0.055 39±0.003 89	0.154 22±0.010 60	0.020 19±0.000 44	0.006 39±0.001 05	428±114	146±9	129±3	129±21
LS-9	244	310	0.79	0.049 52±0.005 37	0.140 09±0.014 71	0.020 53±0.000 69	0.007 82±0.003 27	173±173	133±13	131±4	157±66
LS-10	143	163	0.88	0.068 32±0.010 96	0.189 54±0.029 25	0.020 12±0.000 97	0.008 27±0.004 12	878±245	176±25	128±6	166±83
LS-11	186	198	0.94	0.061 23±0.009 35	0.165 59±0.025 04	0.019 61±0.000 43	0.006 04±0.000 13	647±347	156±22	125±3	122±83
LS-14	152	174	0.87	0.050 45±0.004 17	0.142 09±0.011 52	0.020 43±0.000 48	0.006 08±0.000 78	216±141	135±10	130±3	123±16
LS-15	159	163	0.97	0.052 27±0.006 34	0.146 27±0.017 25	0.020 30±0.000 68	0.007 99±0.002 37	297±204	139±15	130±4	161±48
LS-16	259	274	0.95	0.053 07±0.002 58	0.147 75±0.007 07	0.020 19±0.000 37	0.006 13±0.000 78	332±75	140±6	129±2	124±16
LS-17	223	242	0.92	0.056 04±0.003 51	0.156 20±0.009 57	0.020 21±0.000 44	0.007 15±0.000 98	454±97	147±8	129±3	144±20
LS-18	377	281	1.34	0.058 76±0.007 05	0.161 12±0.018 54	0.019 93±0.000 75	0.081 00±0.004 15	558±187	152±16	127±5	163±83
LS-19	234	209	1.12	0.059 32±0.005 20	0.163 64±0.013 88	0.020 02±0.000 55	0.009 97±0.003 58	579±137	154±12	128±3	201±72
LS-20	582	461	1.26	0.076 26±0.003 92	0.216 90±0.010 79	0.020 63±0.000 46	0.008 42±0.001 53	1 102±64	199±9	132±3	169±31
LS-21	139	136	1.03	0.066 23±0.009 20	0.184 90±0.024 63	0.020 26±0.000 87	0.009 70±0.004 33	814±210	172±21	129±5	195±87
LS-22	160	152	1.06	0.064 70±0.003 91	0.180 81±0.010 67	0.020 27±0.000 43	0.006 64±0.001 01	765±88	169±9	129±3	134±20
LS-23	354	323	1.10	0.054 06±0.002 65	0.153 51±0.007 37	0.020 60±0.000 40	0.005 38±0.000 33	374±73	145±6	131±3	108±7
LS-24	312	309	1.01	0.063 96±0.003 33	0.180 04±0.009 09	0.020 42±0.000 43	0.006 48±0.000 44	740±71	168±8	130±3	131±9
LS-25	249	272	0.91	0.052 94±0.002 65	0.149 43±0.007 33	0.020 47±0.000 40	0.006 26±0.000 45	326±76	141±6	131±3	126±9
LS-26	300	266	1.13	0.057 69±0.003 12	0.161 70±0.008 53	0.020 33±0.000 43	0.006 07±0.000 48	518±79	152±7	130±3	122±10
LS-27	282	283	1.00	0.065 76±0.003 28	0.185 44±0.008 98	0.020 46±0.000 43	0.006 85±0.000 60	799±66	173±8	131±3	138±12
LS-28	265	256	1.03	0.060 93±0.009 04	0.168 04±0.024 61	0.020 00±0.000 47	0.006 17±0.000 13	637±336	158±21	128±3	124±3
LS-29	164	178	0.92	0.048 75±0.007 20	0.137 78±0.019 97	0.020 50±0.000 57	0.006 49±0.000 53	136±297	131±18	131±4	131±11
LS-30	467	378	1.24	0.056 76±0.002 33	0.157 02±0.006 36	0.020 07±0.000 37	0.006 63±0.000 75	482±57	148±6	128±2	134±15
LS-31	280	256	1.09	0.049 75±0.007 90	0.138 51±0.021 80	0.020 19±0.000 42	0.006 38±0.000 48	183±315	132±19	129±3	129±10
LS-32	227	225	1.01	0.055 75±0.003 19	0.156 76±0.008 78	0.020 40±0.000 43	0.007 85±0.001 11	442±87	148±8	130±3	158±22
LS-33	293	315	0.93	0.048 13±0.008 22	0.130 21±0.022 06	0.019 62±0.000 41	0.006 22±0.000 71	105±314	124±20	125±3	125±14

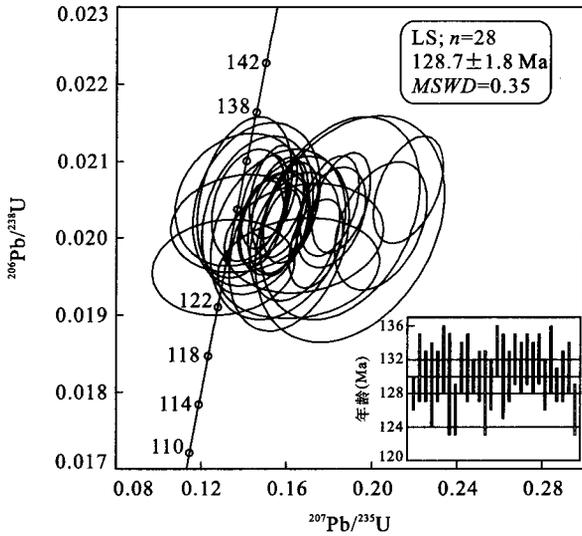


图 4 溧水盆地龙王山组粗面岩中锆石谐和曲线图解
 Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram for trachyte from the Longwangshan Formation of Lishui basin

非常发育,无继承核,为典型的岩浆锆石. 22 颗锆石 28 次年龄分析结果见表 1,相应的谐和曲线投影见图 4. 这些锆石颗粒的 $Th(99 \times 10^{-6} \sim 467 \times 10^{-6})$ 和 $U(121 \times 10^{-6} \sim 461 \times 10^{-6})$ 含量有较大的变化范围,但 Th/U 比值稳定(0.79~1.34),且绝大部分都在 1 附近,说明它们均为岩浆结晶锆石. 全部分析结果均投影在谐和线上或谐和线附近,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化于 125 ± 3 Ma 至 132 ± 3 Ma 之间,加权平均年龄为 128.7 ± 1.8 Ma, MSWD 值为 0.35,代表了该火山岩的结晶年龄,表明溧水盆地火山岩形成于早白垩世.

4 讨论

4.1 年代学

众所周知,锆石由于其稳定性而能够很好地保存其化学及同位素特征,因而在地球科学研究中有广泛的应用(包括定年和地球壳幔演化)(Hancher *et al.*, 1994; Bowring and Housh, 1995; Vervoort *et al.*, 1996). 对结晶岩来说,锆石 U-Pb 年龄因其同位素体系具有较高的封闭温度而不易受后期地质事件叠加或改造的影响,可作为岩石的结晶年龄. 溧水中生代火山岩盆地龙王山组粗面岩的结晶年龄为 128 ± 1.8 Ma, 这一结果与该火山岩盆地大王山组火山岩的年龄 125 ± 7 Ma(全岩 Rb-Sr 等时线年龄,周金城等,1994)相近,表明它们是相继产出的火山岩. 这一年龄也代表了溧水盆地中生代岩浆活动的起始时间为 128 Ma.

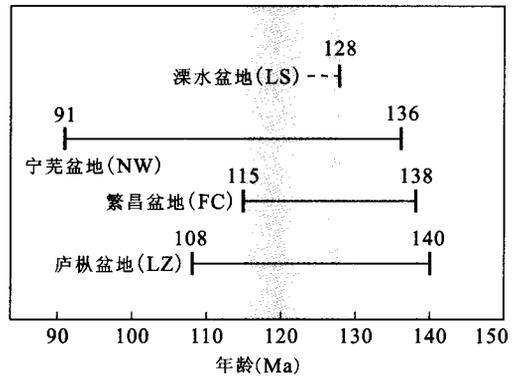


图 5 长江中下游地区白垩纪各火山岩盆地火山岩年龄分布图

Fig. 5 Distribution diagram of the ages of Cretaceous volcanics from separated basins in the middle-lower Yangtze area

图中溧水盆地火山岩年龄 128 Ma 来自本文;其他数据来源:宁芜项目编写小组,1978; Wang and McDougau, 1980; 中科院地质研究所火山岩组,1980;胡华光等,1982;李坤英,1982;吴利仁,1984; McKee, 1988;周金城等,1994;岳文浙等,1999;刘洪等,2002;张旗等,2003;楼亚儿和杜杨松,2006

表 2 为综合收集的长江中下游地区各火山岩盆地火山岩的年龄. 图 5 则以直观的形式表达了庐枞盆地(LZ)、繁昌盆地(FC)、宁芜盆地(NW)以及溧水盆地(LS)中生代火山岩年龄跨度. 庐枞盆地作为这 4 个盆地中最西面的一个,其火山活动开始也是最西的,而溧水盆地位于最东侧的一端,其火山活动开始最晚,这一差异可能与岩石圈伸展开始的时间和程度不同有关. 刘洪等(2002)获得庐枞盆地砖桥组(龙王山组)、双庙组(大王山组)和浮山组(姑山组+娘娘山组)全岩 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄分别为 140.1 ± 0.8 Ma、 125.5 ± 0.8 Ma 和 126.0 ± 3.4 Ma, 但新地层给出老年龄,再次说明选用受后期热事件扰动影响的全岩样品,进行 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 定年可能得不出精确的年龄结果. 对于繁昌盆地,胡华光等(1982)曾对赤砂组(大王山组)和蝌蚪山组(姑山组)进行了全岩 K-Ar 定年,结果分别为 122~125 Ma 和 115 Ma, 但没有人直接对中分村组(龙王山组)开展定年工作,仅有对盆地内与中分村组流纹岩呈侵入接触关系的板石岭黑云母石英二长岩体锆石 SHRIMP 定年,结果为 125 Ma(楼亚儿和杜杨松,2006),说明中分村组火山岩的年龄至少应大于 125 Ma. 张旗等(2003)给出宁芜地区龙王山组和大王山组安粗岩中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 131 Ma 和 127 Ma, 与前人研究结果较为一致(Wang and McDougall, 1980; 胡华光等,1982;李坤英,1982;岳文浙和丁保良,1999).

表 3 长江中下游地区 4 个火山岩盆地火山岩系对比

Table 3 Comparisons of volcanic rock series from four separated basins in the middle-lower Yangtze area

庐枞盆地		繁昌盆地		宁芜盆地		溧水盆地	
浮山组	粗面岩粗面玄武岩、火山碎屑岩、局部见假白榴石响岩	蝌蚪山组	上部:流纹质凝灰熔岩、流纹斑岩	娘娘山组	上部:黟方石响岩、熔结角砾岩、熔结凝灰岩	甲山组	英安流纹岩、流纹质熔结凝灰岩夹凝灰岩和泥砂岩
			中部:粗面岩、安山岩、玄武岩		下部:假白榴石响岩、火山碎屑岩		
双庙组	上部:辉石粗面玄武岩、玄武粗安岩、凝灰质粉砂岩 下部:凝灰角砾岩、粉砂岩、钙质泥岩	赤砂组	粗安岩、英安岩、安山岩夹流纹岩	大王山组	上部:粗面岩、石英粗安岩及火山碎屑岩	大王山组	上部:粗面岩、粗安岩、火山角砾岩
			下部:砂岩、页岩互层		下部:安山岩夹角砾凝灰岩、沉凝灰岩		下部:辉石安山岩、安山岩、熔结凝灰岩
砖桥组	辉石粗安岩、粗安岩夹火山碎屑岩	中分村组	上部:流纹岩及火山碎屑岩	龙王山组	粗安岩、粗面岩、安山岩及火山碎屑岩	龙王山组	粗面玄武岩、玄武质粗面安山岩和少量角闪安山岩
			中部:流纹岩				
龙门院组	安粗质火山岩	组	下部:砂岩、石灰质砾岩	组		组	

注:胡华光等,1982;吴利仁,1984;常印佛等,1991;周金城等,1994;王元龙等,2001;刘洪等,2002;张旗等,2003;李超文等,2004;高晓峰等,2007.

通过年代学对比,结合盆地中各地层岩性特征(表 3)对比分析,笔者认为庐枞盆地龙门院组和砖桥组对应于繁昌盆地的中分村组以及宁芜盆地和溧水盆地的龙王山组,其火山喷发时间 >125 Ma;庐枞盆地双庙组对应于繁昌盆地的赤砂组、宁芜盆地和溧水盆地的大王山组,其年龄为 $125\sim 120$ Ma;繁昌盆地的蝌蚪山组应相当于宁芜盆地的姑山组、溧水盆地的观山组,其年龄为 $120\sim 110$ Ma;宁芜盆地的娘娘山组相当于溧水盆地的甲山组,年龄 <110 Ma. 从年代学对比结果看,将庐枞盆地的浮山组对应于宁芜盆地的姑山组+娘娘山组(即溧水盆地的观山组+甲山组)较为恰当,繁昌盆地则缺少相当于娘娘山组这一期火山喷发旋回。

各盆地龙王山组(砖桥组/中分村组)年龄跨度为 $123\sim 140$ Ma,若剔除采用全岩样品或 K-Ar 法分析(由于本区火山岩有不同程度的后期蚀变)的数据,则可以得到一个较为一致的火山活动起始时间. 即庐枞盆地:130 Ma (Wang and McDougall, 1980);繁昌盆地: >125 Ma (楼亚儿和杜杨松, 2006);宁芜盆地:131 Ma (张旗等, 2003)以及溧水盆地:128 Ma (本文),以上表明长江中下游地区在 ~ 130 Ma 左右进入火山活动期,拉开了该区火山活动的序幕. 自 128 Ma 以后的约 20 Ma (图 5 中阴影

部分),这 4 个盆地均存在岩浆活动,反映了 128 Ma 不仅是溧水盆地岩浆活动的起点,更标志着长江中下游地区早白垩世岩浆活动的全面展开.

4.2 地球化学

既然各火山盆地中龙王山组在时代上代表火山喷发活动的“起始”,那么,在化学组成上,龙王山组与后继喷发的各组火山岩是否存在演化关系? 为此,笔者收集了庐枞盆地、繁昌盆地、宁芜盆地、溧水盆地各期火山岩的主量元素、REE 和微量元素分析数据(常印佛等,1991;王元龙等,2001;刘洪等,2002;李超文等,2004;高晓峰等,2007),并进行了比较和综合分析.

4.2.1 主量元素 长江中下游各盆地火山岩的 SiO_2 含量为 $48.23\%\sim 67.78\%$,其中庐枞盆地 SiO_2 含量整体最高($55.14\%\sim 66.78\%$),宁芜盆地最低($<58\%$),溧水盆地和繁昌盆地则居于两者之间;4 个盆地各火山旋回又以龙王山组火山岩的 SiO_2 含量最低. 全碱含量大多在 $7\%\sim 10.61\%$ 之间,最高可达 12.35% . 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上(图 6a),除少数点位于高钾钙碱性系列外,其他均位于橄榄安粗岩系列甚至超钾系列区域. 除宁芜盆地外,其他各盆地中龙王山组 K_2O 含量最低(图 6a,实心点),而大王山组、姑山组等后期旋回火山岩,随着 SiO_2

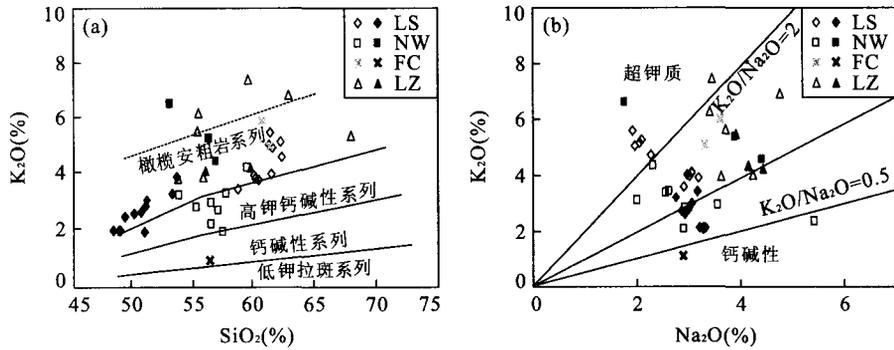


图 6 (a)长江中下游地区白垩纪各盆地火山岩的 K_2O - SiO_2 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976); (b) K_2O - Na_2O 图解 (Turner *et al.*, 1996)

Fig. 6 Composition of Cretaceous volcanics from separated basins in the middle-lower Yangtze area plotted in K_2O vs. SiO_2 (a) and K_2O vs. Na_2O (b) variation diagram

图中实心点代表各盆地龙王山组火山岩,空心点则为各盆地其他旋回的火山岩.数据来源:溧水盆地据李超文等(2004)和高晓峰等(2007);宁芜盆地据王元龙等(2001);繁昌盆地据常印佛等(1991);庐枞盆地据刘洪等(2002)

增加, K_2O 含量明显增加(图 6a,空心点).在 K_2O - Na_2O 图解上(图 6b), K_2O/Na_2O 比值变化范围很大(0.31~3.25).各盆地龙王山组 K_2O/Na_2O 普遍在 1 左右(图 6b,实心点),而其他组的火山岩则普遍大于 1(图 6b,空心点).庐枞盆地、繁昌盆地、溧水盆地从早期的龙王山旋回相对富钠过渡到晚期大王山组、姑山组等相对富钾,宁芜盆地则相反.碱度率指数(A. I.)值在 1.48~4.6 之间,属强碱性,并有从早期旋回到晚期旋回逐渐增大的趋势.但宁芜盆地火山岩特殊,从龙王山旋回一大王山旋回一姑山旋回,随着 SiO_2 含量增长,A. I. 值减小,直到娘娘山旋回又急剧增加,与图 6b 图解上表现出的特征类似,这与宁芜盆地岩石类型由玄武—粗安岩、粗安岩、粗面岩转变为安山岩—英安岩,再转变为粗面岩、响岩的特征也是吻合的,表明随着岩浆的演化,岩浆房下部可能发生了挥发份和碱组分的积累和富集,从而形成晚期娘娘山组的富碱岩浆.总体上看,长江中下游地区中生代火山岩具较高 Al_2O_3 、TFeO 和全碱含量,富钾,准铝质至过铝质,A/CNK 值为 0.6~1.56 之间.

在 Harker 图解(图 7)上,庐枞盆地和溧水盆地火山岩的 SiO_2 和 CaO、MgO、TFeO、 TiO_2 等均呈良好的负相关关系,表明可能存在着单斜辉石及钛铁矿等铁镁质矿物的分离结晶.

4.2.2 微量元素 长江中下游中生代火山岩富集轻稀土元素,均呈较陡的右倾型稀土元素配分曲线(图 8).在微量元素蛛网图上(图 9),庐枞盆地、宁芜盆地和溧水盆地亦呈现相似的趋势,反映在空间上,3 个盆地可能具有相似的地质过程、成岩过程和构造背景;而在时间上,同一盆地不同火山旋回稀土分

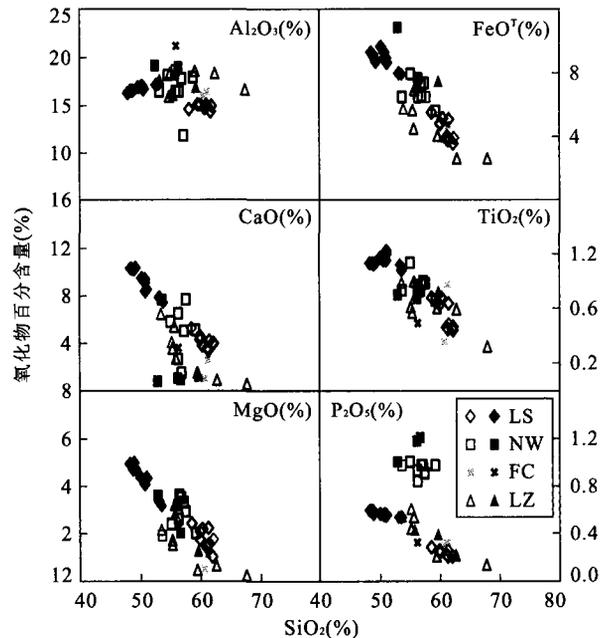


图 7 长江中下游地区白垩纪各盆地火山岩 Harker 图解
Fig. 7 Harker diagrams of major elements of Cretaceous volcanics from separated basins in the middle-lower Yangtze area

数据来源:溧水盆地据李超文等(2004)和高晓峰等(2007);宁芜盆地据王元龙等(2001);繁昌盆地据常印佛等(1991);庐枞盆地据刘洪等(2002)

馏条件相似.庐枞盆地火山岩稀土元素含量最高($\sum REE$: $216 \times 10^{-6} \sim 363 \times 10^{-6}$),溧水盆地次之($\sum REE$: $123 \times 10^{-6} \sim 156 \times 10^{-6}$),宁芜盆地最低($\sum REE$: $90 \times 10^{-6} \sim 135 \times 10^{-6}$).各盆地火山岩稀土元素含量与 SiO_2 含量呈正相关关系, Eu/Eu^* 为 0.72~0.98,无明显 Eu 异常,说明斜长石分

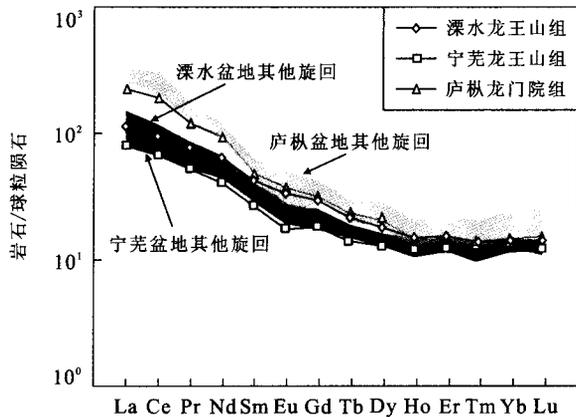


图 8 长江中下游地区白垩纪各盆地火山岩稀土配分曲线 (球粒陨石标准值引自 Taylor and McLennan (1985))

Fig. 8 Chondrite-normalized REE pattern diagram for Cretaceous volcanics from separated basins in the middle-lower Yangtze area

图中黑色实线代表各盆地中龙王山组(或相当于龙王山组)火山岩, 阴影部分代表后继其他组火山岩. 数据来源: 深水盆地据李超文等(2004)和高晓峰等(2007); 宁芜盆地据王元龙等(2001); 庐枞盆地据刘洪等(2002)

岩源区, 即大陆岩石圈富集地幔. 这样的微量元素特征可以是岛弧火山岩的特征 (Briqueu *et al.*, 1984; Arndt and Christensen, 1992), 也可以是幔源岩浆受陆壳物质混染的特征. 但岛弧岩浆常以钙碱性系列为主, 与长江中下游盆地中生代属于板内环境且以橄辉安粗岩和高钾钙碱性系列岩石为主的特征不同. 因此, 各盆地火山岩大离子亲石元素富集、高场强元素亏损, 可能为陆壳混染的结果. 除上述共同特征之外, 仔细对比各盆地火山岩的微量元素蛛网图, 不同盆地的火山岩亦有各自的特点. 对庐枞盆地而言, 其火山岩 (图 9a) 除富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素外, Th、U、Zr、Hf 等高场强元素也呈正异常, 与源于富集地幔或曾遭受地壳混染的板内玄武岩相似 (谢昕等, 2001); 宁芜盆地各组火山岩具明显的磷正异常 (图 9b), 与有密切成因联系的辉石闪长 (玢) 岩富含磷灰石 (马芳等, 2006; 余金杰等, 2007) 这一特征一致. 宁芜盆地龙王山组火山岩与其后期的火山岩相比, 更富 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 反映龙王山组火山岩浆可能有更多陆壳组分加入 (王元龙等, 2001); 深水盆地龙王山组 Sr 正异常显著 (图 9c), 而盆地内其他组则没有这一正异常, 说明该盆地锶矿床的形成与龙王山组火山活动直接相关. 在火山活动中, 斜长石和钾长石是主要的载锶矿物, Sr 的占位与其离子半径和电价密切相关, Sr 离子半径稍小于 K, 且电价比 K 高, 故比 K 更容易进入早期火山岩的钾长石斑晶中, 从而置换 K, 使更多的 K 残留到残余岩浆房中, 进入到大王山组等后续岩浆中. 这也是龙王山组钾含量相对最低的原因之一. 剩余的 Sr 可部分地进入斜长石晶格中置换 Ca. 钙含量越高, 所能提供 8 次配位的位置越多, Sr 进入晶格的机会就越大. 龙

离结晶不明显. 但庐枞盆地浮山组 (相当于娘娘山组) 一个样品点具明显 Eu 的负异常, 可能与其属于晚期形成、经历了较强的分异作用有关 (刘洪等, 2002). 各盆地龙王山组的 LREE 富集程度为 4 个火山旋回中最低的, 这可能与母岩浆分离结晶作用以及岩浆上升过程中陆壳组分的加入有关.

各盆地火山岩微量元素蛛网图 (图 9) 显示, 它们明显富集 Rb、K 等大离子亲石元素, 显著亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 呈左高右低的形态, 类似于中国东南沿海中生代玄武岩的微量元素配分形式 (谢昕等, 2001), 表明其源区可能类似于同时代玄武

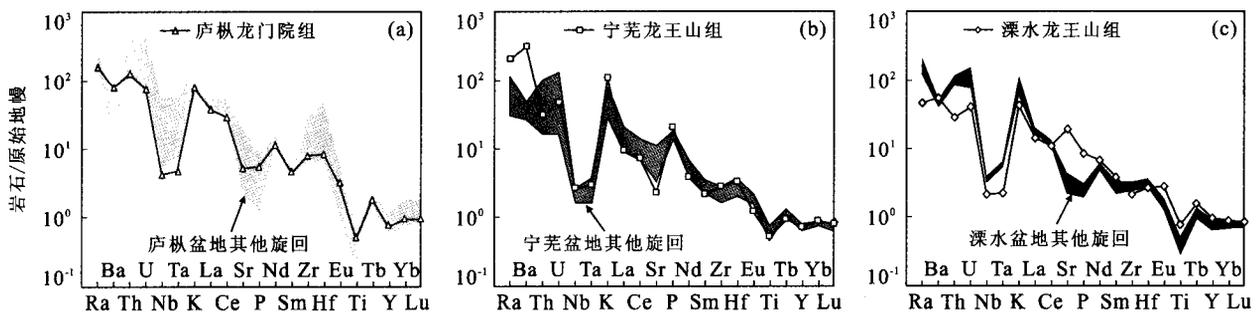


图 9 火山岩微量元素原始地幔归一化蛛网图解

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element diagram for Cretaceous volcanics

图中(a)庐枞盆地; (b)宁芜盆地; (c)深水盆地. 原始地幔标准值引自 McDonough and Sun(1995); 黑色实线代表各盆地中龙王山组(或相当于龙王山组)火山岩, 阴影部分代表后继其他组火山岩. 数据来源: 深水盆地据李超文等(2004)和高晓峰等(2007); 宁芜盆地据王元龙等(2001); 庐枞盆地据刘洪等(2002)

王山组在各旋回中 Ca 含量最高,故其 Sr 含量最高(黄志良等,1994)。这一认识为今后寻找 Sr 矿提供了思路 and 方向,即在多旋回火山活动中,早期火山岩(如溧水盆地龙王山组)是 Sr 的最主要矿源层,在其他成矿条件具备的情况下,最可能成矿。

4.3 构造背景

碱性岩常产于拉张和裂谷构造背景,并受规模较大的断裂所控制。板内双峰式火山岩是裂谷构造环境岩浆岩的典型特征(Coward *et al.*, 1987)。庐枞盆地的主要岩性为粗面玄武岩;宁芜盆地和溧水盆地火山岩系以碱性玄武岩—安山岩—粗安岩—粗面岩—响岩或流纹岩连续的更替为特征(常印佛等,1991);庐枞盆地浮山组和宁芜盆地娘娘山组均出现假白榴石响岩这一典型的富钾质碱性岩;繁昌盆地顶部则出现玄武岩—流纹岩构成的双峰式火山岩(常印佛等,1991;倪若水等,1998;唐永成等,1998),具裂谷型岩浆岩组合的特点(李献华等,2001; Li *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2006; 李献华等,2007)。Bonin (2004)也认为大多数高钾钙碱性岩系可能是板块碰撞后伸展初期地壳引张阶段的产物。因此,长江中下游地区在早白垩世应处于强烈的伸展构造背景,与中国东部存在早白垩世(132~120 Ma)岩石圈伸展背景下巨大岩浆岩事件(Wu *et al.*, 2005)是协调一致的。

5 结论

(1)长江中下游地区火山活动时间为 140~90 Ma,其中龙王山组为本区各个不同火山盆地火山作用的起始。溧水盆地龙王山组粗面岩的形成年龄为 128 Ma,标志着长江中下游地区由西向东中生代火山作用的全面展开。

(2)年代学资料和火山岩地层岩性特征对比表明:庐枞盆地龙门院组和砖桥组与繁昌盆地的中分村组以及宁芜、溧水盆地的龙王山组相仿;庐枞盆地双庙组对应于繁昌盆地的赤砂组,宁芜、溧水盆地的大王山组;繁昌盆地的蝌蚪山组对应于宁芜盆地的姑山组、溧水盆地的观山组;宁芜盆地的娘娘山组对应于溧水盆地的甲山组。庐枞盆地的浮山组与宁芜盆地的姑山组+娘娘山组(即溧水盆地的观山组+甲山组)对应较为恰当,繁昌盆地则缺少相当于娘娘山组这一期火山旋回。4 期火山活动的年代界限由老至新分别为: >125 Ma、125~120 Ma、120~110 Ma 和 110~90 Ma。

(3)长江中下游各火山岩盆地白垩纪火山岩具有富钾、富集大离子亲石元素(Rb、Ba)、Nb、Ta 明显亏损, LREE 富集,无明显 Eu 异常等地球化学特征。反映陆内拉张、岩石圈伸展减薄构造环境下,幔源碱性岩浆受到了陆壳物质的混染。同时,岩浆分离结晶作用也在各旋回火山岩浆作用中扮演了重要角色。早期火山岩(如溧水盆地龙王山组)是 Sr 矿的矿源层。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Arndt, N., Christensen, U., 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints. *Journal of Geophysical Research*, 97(B7): 10967-10981.
- Bonin, B., 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2): 1-24.
- Bowring, S. A., Housh, T., 1995. The earth's early evolution. *Science*, 269(5230): 1535-1540.
- Briqueu, L., Bougault, H., Joron, J. L., et al., 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: Petrogenetic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 68(2): 297-308.
- Chang, Y. F., Liu, X. P., Wu, Y. C., 1991. The copper-iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang River. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Compiling Group of Ningwu Research Project, 1978. Porphyrite iron deposits of Ningwu area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Coward, M. P., Dewey, J. F., Hancock, P. L., et al., 1987. Continental extensional tectonics. Geological Society Special Publication, London.
- Gao, X. F., Guo, F., Li, C. W., et al., 2007. The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui basin, lower Yangtze valley. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Hanchar, J. M., Miller, C. F., Wooden, J. L., et al., 1994. Evidence from xenoliths for a dynamic lower crust, eastern Mojave desert, California. *Journal of Petrology*, 35(5): 1377-1415.
- Hu, H. G., Hu, S. L., Wang, S. S., et al., 1982. On the ages of Jurassic and Cretaceous volcanic rocks by the radiometric dating. *Acta Geologica Sinica*, 56(4): 315-323 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. L., Cui, N. F., Leng, S. Q., et al., 1984. Geochem-

- istry and origin of the Lishui strontium deposit. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 16(4): 60—65 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 11: 47—69.
- Jiangsu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984. Regional geology of Jiangsu Province and Shanghai City. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, C. W., Guo, F., Li, X. Y., 2004. Petrogenesis and geodynamic implications of Late Mesozoic mafic volcanic rocks from the Lishui basin of the Lower Yangtze region. *Geochimica*, 33(4): 361—371 (in Chinese with English abstract).
- Li, K. Y., 1982. The radiometric age, evolution in time and space, and primitive source of Mesozoic volcanics, Southeast China. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 3: 98—118 (in Chinese).
- Li, X. H., 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293—305.
- Li, X. H., Chen, Z., Liu, D., et al., 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *International Geology Review*, 45(10): 898—921.
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. On the genetic types and tectonic significance of early Yanshanian granites from Nanling. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981—991 (in Chinese).
- Li, X. H., Zhou, H. W., Li, Z. X., et al., 2001. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block. *Geochimica*, 30(4): 315—322 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Qiu, J. S., Luo, Q. H., et al., 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints. *Geochimica*, 31(2): 129—140 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Y. E., Du, Y. S., 2006. Characteristics and zircon SHRIMP U-Pb ages of the Mesozoic intrusive rocks in Fanchang, Anhui Province. *Geochimica*, 35(4): 359—366 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2001. Isoplot v. 2. 2-a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Special Publication No. 1a, 53, Berkeley Geochronology Center.
- Ma, F., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2006. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions in the Washan and Dongshan iron deposits, Ningwu basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2581—2589 (in Chinese with English abstract).
- McDonough, W. F., Sun, S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3—4): 223—253.
- McKee, E. H., 1988. K-Ar chronology of the Luohe district, Anhui Province. *China Economic Geology*, 83: 433—435.
- Ni, R. S., Wu, Q. C., Yue, W. Z., et al., 1998. The evolution and mineralization of terrestrial basins from the Lower Yangtze region. Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, Shanghai (in Chinese).
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81.
- Qi, W. K., 1987. Discussion on regional tectonics of Anhui. *Geological Science and Technology in Anhui*, 1: 45—51 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Q. J., Liu, X. S., Xu, Z. W., 1991. The Luzong Mesozoic volcanic-tectonic depression and its related metallogenesis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tang, Y. C., Wu, Y. C., Chu, G. Z., et al., 1998. Polymetallic copper-gold deposit geology in the areas along the Yangtze River in Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S., 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., et al., 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37(1): 45—71.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C. G., Jackson, S. E., et al., 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS; Appendix. In: Sylvester, P. J., eds., Laser ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences; Principles and applications. Mineralogy Association of Canada, Ottawa, Canada, 239—243.
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Gehrels, G. E., et al., 1996. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379(6566): 624—627.
- Volcanics Group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1980. Multi-cycle and lateral distribution of Mesozoic volcanic rocks in several lower reaches of the Yangtze river region. In: International geological academic symposium. Geological Publishing House, Beijing, 108—115 (in Chinese).
- Wang, S. S., McDougall, I., 1980. K-Ar and ³⁹Ar/⁴⁰Ar ages of Mesozoic volcanic rocks from the lower Yangtze volcanic zone, southeastern China. *Geol. Soc. Australia*, 27: 121—128.
- Wang, Y. L., Zhang, Q., Wang, Y., 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 565—575

(in Chinese with English abstract).

- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119.
- Wu, L. R., 1984. Meso-Cenozoic volcanic rocks in eastern China and adjacent areas. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xie, X., Xu, X. S., Zou, H. B., et al., 2001. Trace element and Nd-Sr-Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 617-628 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Mao, J. W., Zhang, C. Q., et al., 2007. Mantle fluids involved in metallogenesis of Ningwu porphyry iron deposits: Evidence of C, Sr isotopes. *Progress in Natural Science*, 17(9): 1216-1221 (in Chinese with English abstract).
- Yue, W. Z., Ding, B. L., 1999. Study on Cretaceous stratigraphic sequence of continental basin in Jiangsu. *Resources Survey and Environment*, 20: 287-344 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jian, P., Liu, D. Y., et al., 2003. Zircon SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Science in China (Ser. D)*, 33(4): 309-314 (in Chinese).
- Zhao, T. P., Zhou, J. C., Chen, K. R., et al., 1994. Classification of rock series and discussion on petrogenesis of Lishui Mesozoic volcanic complex. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 6(3): 252-258 (in Chinese).
- Zhou, J. C., Zhao, T. P., Chen, K. R., et al., 1994. Analyses of tectonic setting for occurrence of Lishui Mesozoic shoshonite series and its evolutionary relationship. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 30(3): 504-510 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- 附中文参考文献**
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌, 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社.
- 高晓峰, 郭锋, 李超文, 等, 2007. 溧水盆地两类晚中生代酸性火山岩的岩石成因. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 1-12.
- 胡华光, 胡世玲, 王松山, 等, 1982. 根据同位素年龄讨论侏罗白垩纪火山岩系地层的时代. *地质学报*, 56(4): 315-323.
- 黄志良, 崔南方, 冷盛强, 等, 1994. 溧水锆矿成矿地球化学及矿床成因研究. *武汉化工学院学报*, 16(4): 60-65.
- 江苏省地质矿产局, 1984. 江苏省及上海市区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 李超文, 郭锋, 李晓勇, 2004. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因与深部动力学过程探讨. *地球化学*, 33(4): 361-371.
- 李坤英, 1982. 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. *南京地质矿产研究所刊*, 3: 98-118.
- 李献华, 李武显, 李正祥, 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981-991.
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 等, 2001. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征. *地球化学*, 30(4): 315-322.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等, 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.
- 楼亚儿, 杜杨松, 2006. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP 测年. *地球化学*, 35(4): 359-366.
- 马芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 等, 2006. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床流体包裹体和氢氧同位素研究. *岩石学报*, 22(10): 2581-2589.
- 倪若水, 吴其初, 岳文浙, 等, 1998. 长江中下游中生代陆相盆地演化与成矿作用. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- 宁芜研究项目编写小组, 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社.
- 齐文凯, 1987. 安徽区域地质构造几个问题的讨论. *安徽地质科技*, 1: 45-51.
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文, 1991. 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.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等, 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 吴利仁, 1984. 华东及邻区中、新生代火山岩. 北京: 科学出版社.
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等, 2001. 中国东南沿海中-新生代玄武岩微量元素和 Nd-Sr-Pb 同位素研究. *岩石学报*, 17(4): 617-628.
- 余金杰, 毛景文, 张长青, 2007. 地幔流体参与宁芜玢岩铁矿成矿——碳、锶同位素证据. *自然科学进展*, 17(9): 1216-1221.
- 岳文浙, 丁保良, 1999. 江苏白垩纪陆相层序地层研究. *资源调查与环境*, 20: 287-344.
- 张旗, 简平, 刘敦一, 等, 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.
- 赵太平, 周金城, 陈克荣, 等, 1994. 江苏溧水中生代火山杂岩岩系划分及成因讨论. *南京大学学报*, 6(3): 252-258.
- 中国科学院地质研究所火山岩组, 1980. 长江下游若干地区中生代火山岩的多旋回和侧向分布. *国际交流地质学术论文集*, 北京: 地质出版社, 108-115.
- 周金城, 赵太平, 陈克荣, 1994. 溧水中生代橄辉安粗岩系的构造环境及演化关系. *南京大学学报(自然科学版)*, 30(3): 504-510.