

· 专题研究 ·

长江中下游宣城水东地区早白垩世酸性火山岩 年代学、地球化学及岩石成因

王存智, 黄志忠, 赵希林, 褚平利, 黄文成, 宋世明, 陈志洪

(中国地质调查局 南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 位于长江中下游的宣城水东地区发育一套酸性火山岩, 主要由流纹质角砾岩、流纹岩和珍珠岩组成。本文对该套火山岩进行了详细的锆石 U-Pb 年代学、主量元素、微量元素以及 Nd-Hf 同位素研究。LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年结果显示 3 种岩性的火山岩年龄分别为 133.2 ± 0.8 、 133.4 ± 0.8 和 131.5 ± 0.9 Ma。主量元素组成上, 这套酸性火山岩具高硅(72.51% ~ 81.79%)、富钾($K_2O/Na_2O = 2.04 \sim 14.93$, 平均 6.72)、贫钙镁($CaO = 0.19\% \sim 1.57\%$, $MgO = 0.06\% \sim 0.29\%$)的特征, 属于弱过铝质($A/CNK = 1.02 \sim 1.24$)的高钾钙碱性-钾玄岩系列岩石。微量元素方面, 轻重稀土元素分馏明显[(La/Yb)_N = 5.43 ~ 9.17], 具明显的负铕异常($Eu/Eu^* = 0.44 \sim 0.60$), 富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、K 和 Pb 等, 亏损 Ba、Sr、Nb、P 和 Ti 等元素, 表现出壳源的特征。全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素组成变化范围相对较小, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 为 0.7073 ~ 0.7088, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -7.05 ~ -5.56, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -8.6 ~ -1.3。结合区域地质研究成果, 认为宣城水东地区酸性火山岩可能是在约 135 Ma 古太平洋板块俯冲作用之后的伸展-拉伸环境下, 由新元古代早期新生地壳重熔而成。

关键词: 年代学; 岩石成因; 酸性火山岩; 宣城; 长江中下游

中图分类号: P588.14⁺1; P597⁺.3; P581 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2018)05-0697-19

Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Cretaceous acid volcanic rocks in Shuidong area, Xuancheng City, in the middle-lower reaches of the Yangtze River

WANG Cun-zhi, HUANG Zhi-zhong, ZHAO Xi-lin, CHU Ping-li, HUANG Wen-cheng,

SONG Shi-ming and CHEN Zhi-hong

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: There is a suite of acid rocks consisting of rhyolitic breccia, rhyolite and perlite in Shuidong area, Xuancheng City, in the middle-lower reaches of the Yangtze River. In this paper, the authors reported detailed studies of the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, major elements, trace elements, whole-rock Nd isotopic compositions and zircon Hf isotopic compositions of the acid rocks. The results of zircon LA-ICPMS U-Pb dating are 133.2 ± 0.8 Ma (rhyolitic breccia), 133.4 ± 0.8 Ma (rhyolite) and 131.5 ± 0.9 Ma (perlite), respectively. Geochemical researches indicate that the acid volcanic rocks are rich in silica ($SiO_2 = 72.51\% \sim 81.79\%$), K ($K_2O/Na_2O = 2.04 \sim 14.93$, 6.72 on average) and poor in calcium ($CaO = 0.19\% \sim 1.57\%$) and magnesium ($MgO = 0.06\% \sim 0.29\%$), implying a typical high-K calc-alkaline to shoshonitic series with weakly peraluminous features ($A/CNK =$

收稿日期: 2017-10-26; 接受日期: 2018-03-05

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160036)

作者简介: 王存智(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事构造地质学研究, E-mail: 32107407@qq.com; 通讯作者: 赵希林(1980-), 男, 副研究员, 主要从事岩浆作用与成矿作用研究, E-mail: zxl24@126.com。

1.02 ~ 1.24)。The rocks are enriched in LREE[$\text{La/Yb}_N = 5.43 \sim 9.17$], LILEs (Rb, Ba, Th and K) but depleted in HFSE, especially Nb, Sr, P and Ti. The Eu/Eu^* ratios vary from 0.44 to 0.60, with most rocks having prominent negative Eu anomalies. Based on integration of the geological characteristics of the study area, the authors proposed that the acid rocks were formed by anatexis of the Neoproterozoic middle and upper crust. The petrogenetic event probably occurred in an intraplate extensional environment after the subduction of the Pacific Plate at ~ 135 Ma.

Key words: geochronology; petrogenesis; acid volcanic rocks; Xuancheng City; middle-lower reaches of the Yangtze River

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160036)

作为中国重要的铜、铁多金属成矿带之一,长江中下游成矿带一直受到关注(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。该区内中生代燕山期岩浆活动和成矿作用强烈,在断隆区发育高钾钙碱性中酸性侵入岩,岩性以花岗闪长岩-石英闪长岩为主,产出矽卡岩-斑岩型铜金矿床(杜建国等, 2003; 周涛发等, 2008)。在断凹区发育一系列火山岩盆地,主体为一套橄榄安粗岩质火山-侵入岩,主要产出火山-次火山热液型的“玢岩铁矿”和沉积改造型等铁矿床(宁芜玢岩铁矿编写组, 1978; 周涛发等, 2008; Hou *et al.*, 2010)。

长江中下游火山岩盆地主要沿长江深大断裂分布,从北向南西分别为溧阳盆地、溧水盆地、宁芜盆地、繁昌盆地、庐枞盆地、怀宁盆地和金牛盆地(图 1a)。对于这些火山岩盆地,前人进行了大量研究,发现这些火山岩年龄较为集中,约为 133 ~ 127 Ma,其中金牛、怀宁和繁昌盆地火山岩为钙碱性系列,晚期火山岩具有双峰式特征,而其它盆地火山岩高钾富碱,属于钾玄岩系列(周涛发等, 2008)。目前对于这些火山岩的岩浆源区还存在着不同认识,尽管多数学者认为其起源于富集岩石圈地幔,并有亏损物质的加入(Yan *et al.*, 2008; 侯可军等, 2010; Luo *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014),但对于岩石圈地幔的富集原因是因为古太平洋板块俯冲交代(Wang *et al.*, 2006)还是新元古代扬子地块周边的俯冲交代(Chen *et al.*, 2014),亏损物质来自软流圈(Yan *et al.*, 2008)还是俯冲洋板块的部分熔融(Liu *et al.*, 2010a),尚存在争议。目前的研究多集中在宁芜盆地和庐枞盆地(Zhang *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006; 周涛发等, 2008; 侯可军等, 2010; Xie *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012, 2013; Chen *et al.*, 2014; Chen *et*

al., 2016),对于其他火山岩盆地及周边残留盆地的研究相对薄弱,特别是酸性火山岩的研究程度偏低。

最近,笔者在对繁昌盆地的东南侧宣城水东地区进行野外地质调查的过程中,新发现了一套酸性火山岩。前人对邻区类似岩性的火山岩称为中分村组(安徽省地质调查院, 2005)^①。本文在详细的野外地质基础上,采集了代表性火山岩样品,对其进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年、元素地球化学、Sr-Nd 同位素及锆石 Hf 同位素研究,并结合临近的其他火山岩盆地已有研究,探讨岩浆成因机制,欲为深入理解长江中下游地区中生代火山岩的形成时代和地球动力学背景提供新的证据。

1 区域地质概况及样品特征

长江中下游地区位于扬子板块北缘,其北和西北部以襄樊-广济断裂、郟庐断裂为界与大别造山带相邻,南部以江南断裂为界与江南造山带接壤(图 1a)。区内最老的变质基底为崆岭群,出露在三峡地区,其片麻岩锆石年龄为 3.3 Ga(Qiu *et al.*, 2000)。长江中下游晚中生代火山岩大致可以划分为两类:一类以中基性岩石为主,早期旋回为钙碱性系列,中晚期为碱性或橄榄安粗岩系列,以庐枞、宁芜和溧水盆地火山岩为代表;另一类火山喷发具有双峰式特征,其中酸性岩占主体,属于钙碱性系列,以金牛、怀宁和繁昌等小规模盆地火山岩为代表(闫峻等, 2009; 薛怀民, 2016)。

宣城水东地区位于繁昌盆地南东,主要出露有古生代至三叠纪地层(图 1b),其中加里东运动造成中下泥盆统缺失,晚古生代一早中生代期间发育剧烈的升降运动,形成多个平行不整合面。区内断裂

① 安徽省地质调查院. 2005. 1:25 万宣城市幅区域地质调查报告.

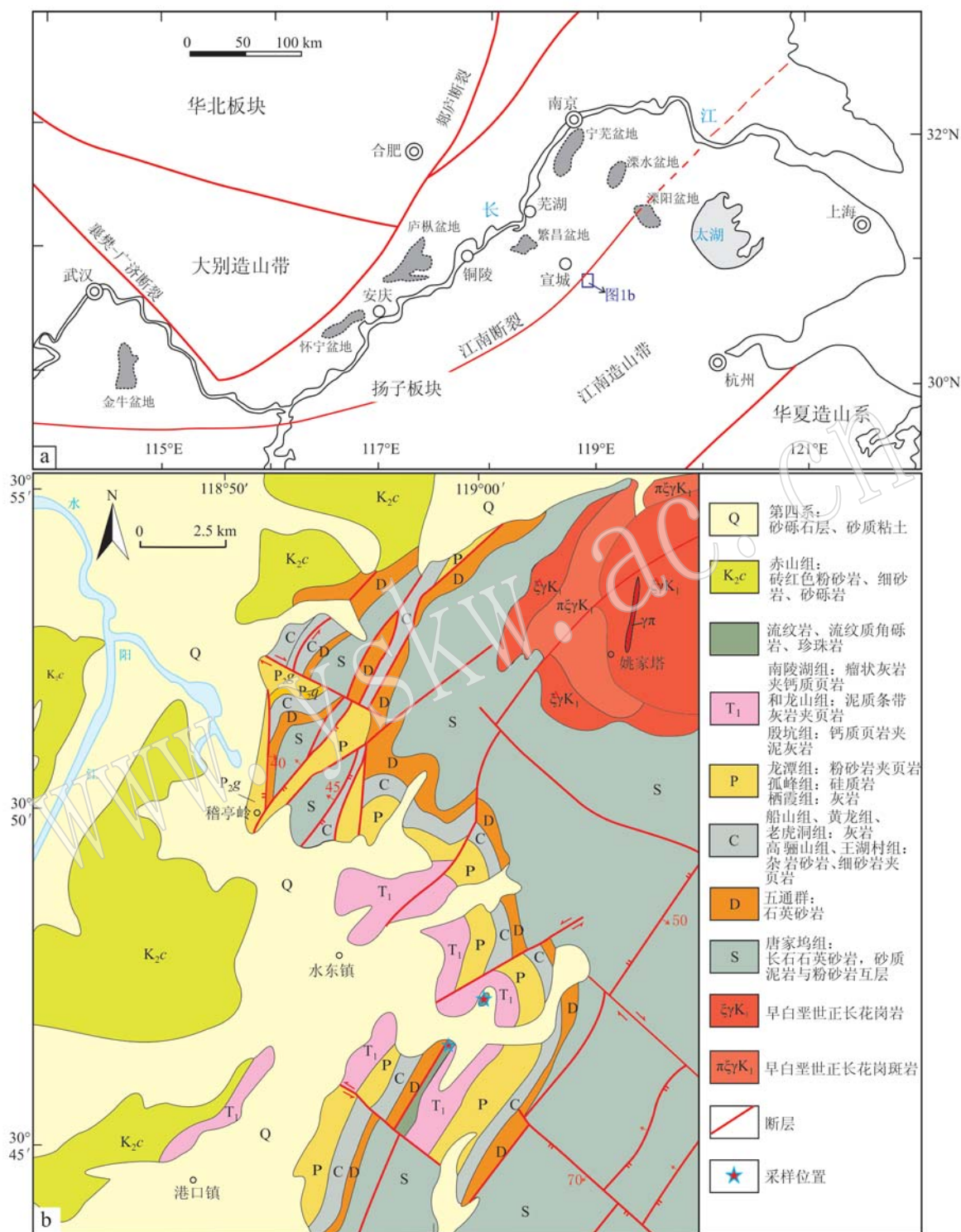


图 1 长江中下游晚中生代火山岩盆地分布图[a, 据翟裕生等(1992)修改]和宣城水东地区地质简图(b)

Fig. 1 Regional geology and distribution of the volcanic basins in the middle-lower reaches of the Yangtze River (a, modified after Zhai Yusheng *et al.*, 1992) and geological sketch map of Shuidong area in Xuancheng City (b)

发育,江南断裂带从本区贯穿,表现为一系列 NE 向断层系,被 NW 向断裂所截,造成地层缺失或重复,

多以断块的形式出露(图 1b)。

水东地区酸性火山岩分布于水东镇山河村及寨

山一带,总体呈NE向带状展布(图1b),其NW侧与五通群石英砂岩呈断层接触,SE侧喷发不整合于早三叠世灰岩之上。酸性火山岩主体岩性为灰白色流纹岩和灰紫色流纹质角砾岩,后者呈枝杈状分布于前者之中。另发育一套珍珠岩,呈脉状侵入到灰白色流纹岩之中,并在山河村作为珍珠岩矿成规模开采。灰白色流纹岩流纹构造发育(图2a、2b),具少

斑结构,斑晶主要为石英(图2b),基质为隐晶质。灰紫色流纹质角砾岩角砾含量高(30%~35%)(图2c),成分与流纹岩相同,胶结物为流纹质,见少量石英斑晶,基质为微粒状斜长石、石英和隐晶质(图2d)。珍珠岩呈深墨绿色-黑色,具玻璃光泽,有贝壳状断口,块状构造(图2e),珍珠结构(因冷凝作用形成的圆弧形裂纹)发育(图2f)。

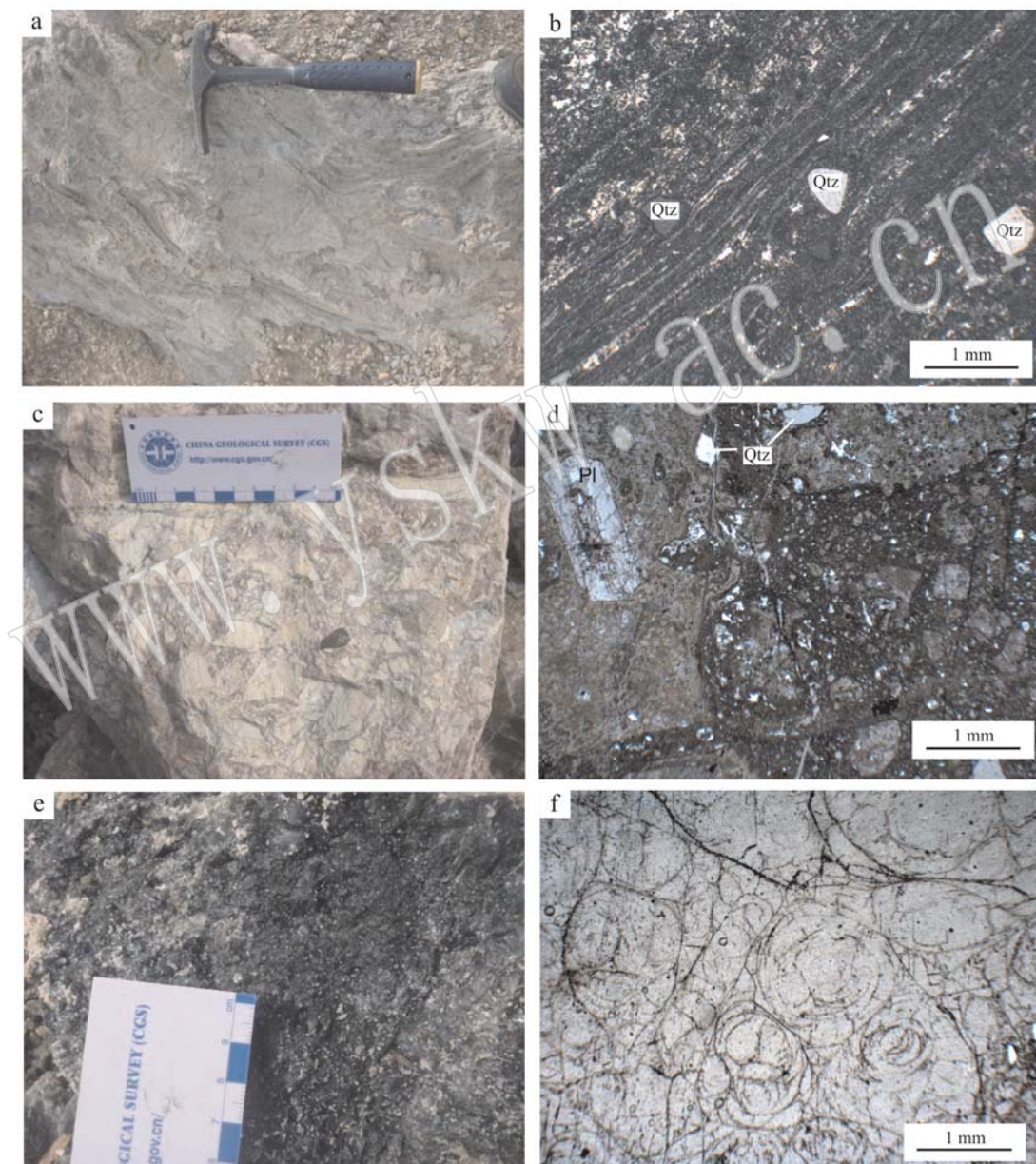


图2 宣城水东地区酸性火山岩野外典型岩石类型及镜下照片

Fig. 2 Field and microscope photographs of acid volcanic rocks in Shuidong area, Xuancheng City

a—灰白色流纹岩的流纹构造; b—灰白色流纹岩中的少量石英斑晶(正交偏光); c—灰紫色流纹质角砾岩的角砾; d—灰紫色流纹质角砾岩基质为微粒状长英质和隐晶质(正交偏光); e—珍珠岩玻璃光泽; f—珍珠岩的珍珠结构(单偏光); Pl—斜长石; Qtz—石英
a—fluidal structure of the grayish white rhyolite; b—a few quartz phenocrysts in the grayish white rhyolite (crossed nicols); c—much breccia in the dusty purple rhyolite; d—cryptocrystalline texture of the dusty purple rhyolitic breccia (crossed nicols); e—vitreous luster of the perlite; f—perlitic texture of the perlite (plainlight); Pl—plagioclase; Qtz—quartz

本次工作对上述3种酸性火山岩进行了系统的样品采集,挑选出代表性样品进行了全岩主量元素、微量元素、Sr-Nd同位素和锆石年代学及Hf同位素分析。其中流纹质角砾岩在碎样时去除角砾后用于全岩地球化学分析和锆石挑选。采样位置见图1b。

2 分析方法

全岩粉末样处理及锆石挑选工作在河北省廊坊市辰昌岩矿检测技术服务有限公司进行,锆石制靶及阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司完成。

全岩主微量成分在国家地质实验测试中心分析,其中主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)完成,所用仪器为PE300D,误差小于0.5%。对于其中Fe的含量由XRF法测得 TFe_2O_3 含量,然后用滴定法测得FeO含量,最后计算得到 Fe_2O_3 含量,计算公式为: $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{TFe}_2\text{O}_3 - \text{FeO} \times 1.113$ 。微量元素和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定,仪器型号为PW4400,误差小于5%。

全岩Sr-Nd同位素在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。根据微量元素中Rb-Sr、Sm-Nd含量称取适量样品于Teflon闷罐中,加入 ^{87}Rb - ^{84}Sr 和 ^{149}Sm - ^{150}Nd 混合稀释剂并用HF、 HNO_3 和 HClO_4 充分溶解后用离子交换树脂分离出Rb、Sr、Sm和Nd,在ISOPROBE-T热电离质谱仪(TIMs)上测试。整个分析流程实验本底为:Rb、Sr均小于 100×10^{-12} ,Sm、Nd均小于 50×10^{-12} 。

LA-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,分析所用仪器为配套了NewwaveUP213激光剥蚀系统的Finnigan Neptune型多接收等离子体质谱仪。激光剥蚀以He为载气,用锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127为外标进行校正。激光斑束直径为 $25 \mu\text{m}$,频率为10 Hz,能量密度约为 $2.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。数据处理采用ICPMSDataCal程序(Liu *et al.*, 2008, 2010b),锆石年龄谐和图用Isoplot3.0程序获得(Ludwig, 2003)。详细参数及实验测试过程参见侯可军等(2009)。

锆石Hf同位素分析测试工作在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。该项分析是在锆石LA-ICP-MS U-Pb定年的基础上,参照

锆石CL图像,选择在原年龄测点位置或附近进行,所用仪器为New Wave UP193激光剥蚀系统及其相连接的Thermo Neptune Plus多接收等离子体质谱仪,以He作为载气,分析中使用的激光束斑直径为 $44 \mu\text{m}$,频率为8 Hz,剥蚀时间为26 s,采用MT作为外部标样, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,530 \pm 0.000\,030$ 。 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 计算采用的 ^{176}Lu 的衰变常数为 1.865×10^{-11} (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\,2$ (Blichert and Albarède, 1997)。亏损地幔Hf模式年龄(t_{DM1})采用 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\,251$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038\,4$ (Vervoot and Blichert-Toft, 1999)计算,二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})采用平均大陆壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002)计算。

3 测试结果

3.1 锆石U-Pb年代学

水东地区流纹质角砾岩(1511XC-1-7)、流纹岩(8938-2-3)和珍珠岩(8938-3-1)的LA-ICPMS锆石U-Pb定年数据列于表1。

流纹质角砾岩(1511XC-1-7)样品中锆石均透明,淡黄-无色,绝大多数结晶较好,呈柱状晶形,长为 $60 \sim 80 \mu\text{m}$,宽为 $30 \sim 40 \mu\text{m}$,长宽比大多约2:1。在CL阴极发光照片中,均显示具有清晰的岩浆震荡环带(图3),指示其为岩浆结晶的产物。对该样品进行了22个点的分析,结果显示锆石中Th含量变化于 $125.5 \times 10^{-6} \sim 603.0 \times 10^{-6}$ 之间,U含量变化大,介于 $209.7 \times 10^{-6} \sim 1\,606.1 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U值为 $0.35 \sim 1.57$,属典型的岩浆成因锆石。22个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄全部集中在 $136 \sim 130 \text{ Ma}$ 间,在谐和曲线上成群分布(图4a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $133.2 \pm 0.8 \text{ Ma}$ ($n = 22$, MSWD = 0.64),代表了流纹质角砾岩的喷发年龄。

流纹岩(8938-2-3)样品中锆石均透明,淡黄-无色,绝大多数结晶较好,呈长柱状晶形,长 $80 \sim 120 \mu\text{m}$,宽 $30 \sim 40 \mu\text{m}$,长宽比为2:1~1.5:1,在CL阴极发光照片中,均显示具有清晰的岩浆震荡环带(图3),指示其为岩浆结晶的产物。对该样品进行了24个点分析,锆石中Th含量变化于 $73.0 \times 10^{-6} \sim 987.8 \times 10^{-6}$ 之间,U含量变化于 $212.1 \times 10^{-6} \sim 880.4 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U值为 $0.34 \sim 1.20$,属典型的岩浆成因锆石。24个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄全部集

表 1 水东地区酸性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb geochronologic results for zircons from three samples of acid volcanic rocks in Shuidong area

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
1511XC-1-7 流纹质角砾岩													
1511-XC-1-7-1	397	778	0.51	0.051 7	0.002 7	0.151 3	0.008 9	0.021 0	0.000 4	143	8	134	2
1511-XC-1-7-2	258	388	0.66	0.054 4	0.002 8	0.151 8	0.007 7	0.020 7	0.000 3	143	7	132	2
1511-XC-1-7-3	349	734	0.48	0.051 8	0.001 8	0.152 0	0.005 3	0.021 2	0.000 2	144	5	135	1
1511-XC-1-7-4	171	299	0.57	0.055 5	0.006 9	0.152 7	0.016 8	0.020 8	0.000 5	144	15	133	3
1511-XC-1-7-5	166	369	0.45	0.053 4	0.002 4	0.149 3	0.006 6	0.020 8	0.000 3	141	6	133	2
1511-XC-1-7-6	369	823	0.45	0.049 8	0.001 9	0.144 9	0.005 4	0.021 2	0.000 2	137	5	136	1
1511-XC-1-7-7	306	456	0.67	0.052 6	0.002 4	0.148 3	0.006 4	0.020 9	0.000 2	140	6	133	2
1511-XC-1-7-9	129	351	0.37	0.053 3	0.009 9	0.146 5	0.026 7	0.020 4	0.000 8	139	24	130	5
1511-XC-1-7-10	325	349	0.93	0.055 3	0.003 0	0.152 2	0.007 9	0.020 8	0.000 3	144	7	133	2
1511-XC-1-7-11	333	450	0.74	0.050 9	0.002 3	0.145 3	0.006 5	0.021 0	0.000 3	138	6	134	2
1511-XC-1-7-12	497	1 058	0.47	0.050 8	0.001 6	0.147 0	0.004 5	0.021 0	0.000 2	139	4	134	1
1511-XC-1-7-14	125	210	0.60	0.050 8	0.006 6	0.144 1	0.020 3	0.020 9	0.000 8	137	18	133	5
1511-XC-1-7-15	262	326	0.80	0.052 7	0.003 9	0.153 0	0.011 7	0.020 9	0.000 5	145	10	133	3
1511-XC-1-7-16	169	223	0.76	0.054 0	0.003 2	0.149 1	0.008 4	0.020 8	0.000 4	141	7	133	3
1511-XC-1-7-17	439	383	1.15	0.053 2	0.002 7	0.149 2	0.007 3	0.020 8	0.000 3	141	6	133	2
1511-XC-1-7-18	266	312	0.85	0.054 2	0.004 6	0.149 9	0.011 3	0.020 7	0.000 7	142	10	132	4
1511-XC-1-7-19	603	383	1.57	0.052 4	0.002 6	0.150 2	0.007 7	0.021 0	0.000 4	142	7	134	3
1511-XC-1-7-20	319	532	0.60	0.052 3	0.002 0	0.148 7	0.005 7	0.020 7	0.000 2	141	5	132	1
1511-XC-1-7-21	339	392	0.86	0.053 0	0.002 2	0.149 0	0.005 6	0.021 0	0.000 3	141	5	134	2
1511-XC-1-7-23	561	1 606	0.35	0.053 6	0.001 7	0.152 3	0.005 2	0.020 5	0.000 2	144	5	131	1
1511-XC-1-7-24	248	305	0.81	0.052 3	0.002 4	0.146 9	0.006 6	0.021 1	0.000 3	139	6	135	2
1511-XC-1-7-25	237	649	0.37	0.052 0	0.002 1	0.148 7	0.005 9	0.020 9	0.000 2	141	5	133	1
8938-2-3 流纹岩													
8938-2-3-1	73	212	0.34	0.057 2	0.008 6	0.152 8	0.020 6	0.020 5	0.000 8	144	18	131	5
8938-2-3-2	541	517	1.05	0.052 7	0.001 9	0.151 0	0.005 2	0.021 0	0.000 2	143	5	134	1
8938-2-3-3	171	219	0.78	0.054 8	0.006 5	0.150 0	0.015 3	0.020 4	0.000 7	142	14	130	4
8938-2-3-4	219	356	0.61	0.052 5	0.002 2	0.150 3	0.006 1	0.021 2	0.000 3	142	5	135	2
8938-2-3-5	158	276	0.57	0.053 2	0.006 6	0.152 1	0.017 9	0.020 8	0.000 5	144	16	133	3
8938-2-3-6	313	577	0.54	0.053 9	0.001 9	0.152 2	0.005 2	0.020 7	0.000 2	144	5	132	1
8938-2-3-7	150	353	0.42	0.054 4	0.002 5	0.154 2	0.007 0	0.020 9	0.000 3	146	6	133	2
8938-2-3-8	574	589	0.97	0.051 3	0.001 8	0.146 6	0.004 9	0.020 9	0.000 2	139	4	133	1
8938-2-3-9	195	354	0.55	0.051 4	0.004 3	0.148 1	0.011 3	0.021 4	0.000 5	140	10	137	3
8938-2-3-10	441	705	0.63	0.049 3	0.001 4	0.143 1	0.004 3	0.021 2	0.000 2	136	4	135	1

续表 1
Continued Table 1

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
8938-2-3-11	354	416	0.85	0.051 9	0.002 1	0.149 5	0.005 8	0.021 2	0.000 2	141	5
8938-2-3-12	103	231	0.45	0.053 8	0.008 6	0.154 7	0.025 4	0.020 9	0.000 9	146	22
8938-2-3-13	559	571	0.98	0.052 5	0.002 6	0.147 2	0.007 0	0.020 5	0.000 2	139	6
8938-2-3-14	227	234	0.97	0.052 8	0.005 3	0.150 6	0.015 0	0.021 1	0.000 8	142	13
8938-2-3-15	410	880	0.47	0.051 7	0.002 2	0.146 9	0.006 1	0.020 8	0.000 3	139	5
8938-2-3-16	342	398	0.86	0.053 8	0.003 0	0.150 0	0.007 7	0.020 9	0.000 4	142	7
8938-2-3-17	132	227	0.58	0.049 4	0.005 2	0.145 0	0.014 3	0.021 4	0.000 6	137	13
8938-2-3-18	988	500	1.98	0.050 8	0.003 8	0.148 4	0.010 7	0.021 4	0.000 4	140	10
8938-2-3-19	360	396	0.91	0.050 9	0.002 2	0.145 9	0.006 2	0.020 9	0.000 3	138	6
8938-2-3-20	274	231	1.19	0.054 1	0.006 7	0.148 9	0.015 3	0.020 4	0.000 7	141	14
8938-2-3-21	727	603	1.20	0.052 8	0.002 1	0.148 4	0.006 0	0.020 6	0.000 3	140	5
8938-2-3-22	438	682	0.64	0.051 3	0.004 8	0.147 2	0.014 1	0.020 6	0.000 4	139	13
8938-2-3-23	399	563	0.71	0.052 1	0.004 1	0.147 8	0.011 1	0.020 7	0.000 4	140	10
8938-2-3-24	673	639	1.05	0.050 0	0.002 5	0.145 0	0.006 9	0.021 2	0.000 3	137	6
8938-3-1 珍珠岩											
8938-3-1-1	524	262	2.00	0.053 7	0.002 8	0.149 4	0.007 4	0.020 7	0.000 4	141	7
8938-3-1-2	311	332	0.94	0.053 9	0.009 2	0.144 8	0.023 4	0.020 3	0.000 6	137	21
8938-3-1-4	524	270	1.94	0.057 4	0.007 9	0.153 4	0.017 7	0.020 6	0.000 7	145	16
8938-3-1-5	504	278	1.81	0.051 1	0.002 9	0.143 3	0.007 9	0.020 6	0.000 3	136	7
8938-3-1-7	696	313	2.22	0.053 0	0.004 8	0.146 7	0.012 5	0.020 7	0.000 5	139	11
8938-3-1-8	361	259	1.39	0.054 2	0.007 5	0.151 4	0.019 6	0.020 4	0.000 6	143	17
8938-3-1-9	311	227	1.37	0.054 2	0.005 6	0.155 4	0.016 9	0.020 8	0.000 6	147	15
8938-3-1-10	229	167	1.37	0.054 9	0.008 4	0.140 9	0.018 1	0.020 4	0.000 8	134	16
8938-3-1-11	363	305	1.19	0.050 5	0.002 8	0.139 5	0.007 5	0.020 5	0.000 3	133	7
8938-3-1-12	381	168	2.28	0.050 0	0.006 5	0.142 5	0.019 8	0.020 5	0.000 9	135	18
8938-3-1-13	1 056	491	2.15	0.052 7	0.001 9	0.146 9	0.005 3	0.020 5	0.000 2	139	5
8938-3-1-14	424	335	1.27	0.054 8	0.004 3	0.147 3	0.009 7	0.020 1	0.000 3	140	9
8938-3-1-16	721	671	1.07	0.049 6	0.001 8	0.141 3	0.005 2	0.020 8	0.000 2	134	5
8938-3-1-17	1 103	792	1.39	0.049 3	0.001 5	0.138 9	0.004 3	0.020 5	0.000 2	132	4
8938-3-1-18	360	407	0.88	0.049 7	0.001 9	0.142 6	0.005 6	0.020 8	0.000 2	135	5
8938-3-1-19	383	289	1.32	0.051 7	0.003 1	0.140 5	0.008 1	0.020 3	0.000 3	134	7
8938-3-1-20	444	409	1.09	0.049 3	0.001 8	0.139 1	0.005 2	0.020 6	0.000 2	132	5
8938-3-1-21	866	541	1.60	0.048 9	0.001 8	0.139 5	0.005 3	0.020 8	0.000 2	133	5
8938-3-1-22	418	372	1.12	0.052 2	0.002 6	0.146 3	0.007 5	0.020 5	0.000 3	139	7
8938-3-1-25	1 215	418	2.91	0.049 9	0.003 0	0.144 7	0.009 3	0.020 9	0.000 3	137	8

中在 137 ~ 130 Ma 间,并在谐和曲线上成群分布(图 4b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 133.4 ± 0.8 Ma ($n=24$, $\text{MSWD}=0.61$),代表了流纹岩的喷发年龄。

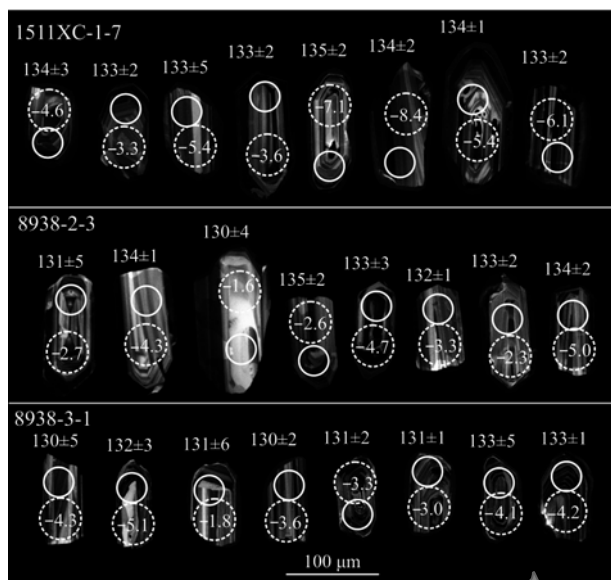


图3 水东地区酸性火山岩代表性锆石 CL 及分析点位图 (实线小圈代表 U-Pb 同位素分析点位,虚线大圈代表 Hf 同位素分析点位)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons of acid volcanic rocks in Shuidong area, Xuancheng City (small solid circles are spots for U-Pb isotopic analysis, and big dashed circles are spots for Hf isotopic analysis)

珍珠岩(8938-3-1)样品中锆石均透明,淡黄-无色,绝大多数结晶较好,呈短柱状晶形,长 60 ~ 80 μm ,宽 30 ~ 40 μm ,长宽比为 3:1 ~ 2:1。在 CL 阴极发光照片中,均具有清晰的岩浆震荡环带(图 3),指示其为岩浆结晶的产物。对该样品进行了 20 个点的分析,结果显示锆石中 Th 含量变化于 $229.1 \times 10^{-6} \sim 1215.1 \times 10^{-6}$ 之间,U 含量变化于 $166.7 \times 10^{-6} \sim 792.0 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 值为 0.88 ~ 2.91,属典型的岩浆成因锆石。从测试结果看,样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄都较为集中,20 个点在谐和曲线上成群分布,全部集中在 133 ~ 128 Ma 间(图 4c), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 131.5 ± 0.9 Ma ($n=20$, $\text{MSWD}=0.44$),代表了珍珠岩的喷发年龄。

测年结果显示,水东地区酸性火山岩锆石年龄范围为 133 ~ 131 Ma,均属于早白垩世火山活动的产物。

3.2 主量和微量元素特征

主量、微量和稀土元素分析结果见表2。水东地

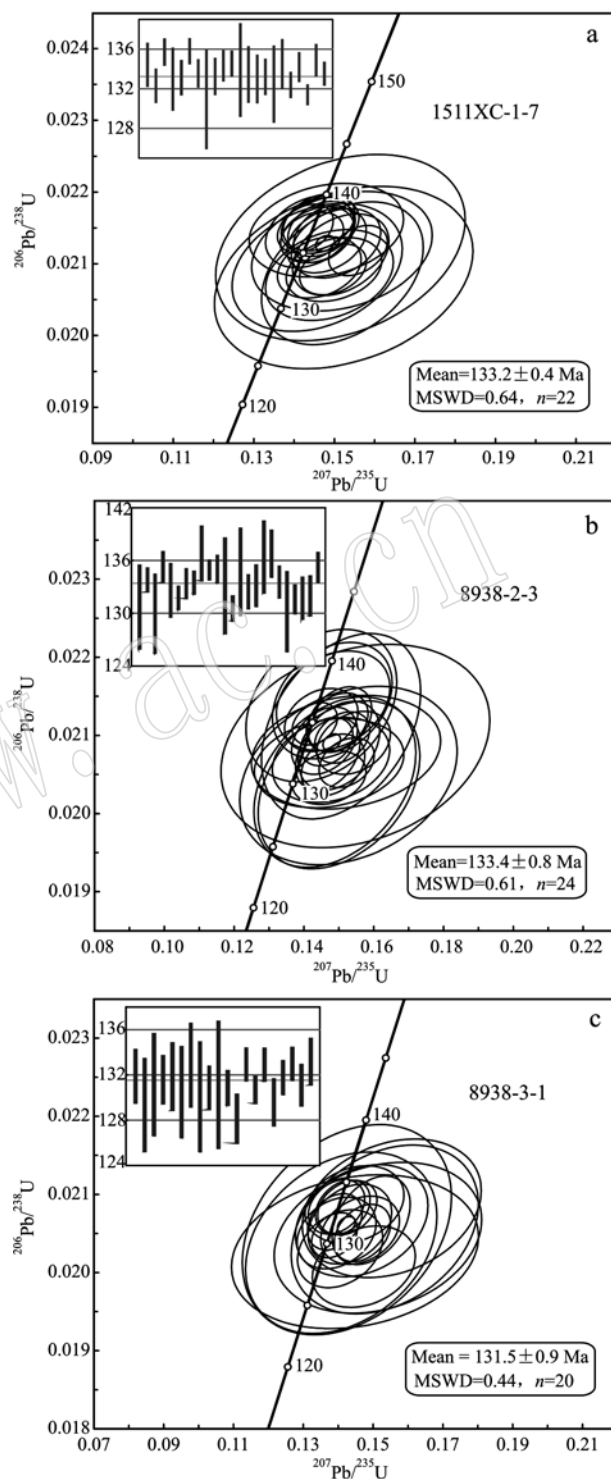


图4 水东地区酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of acid volcanic rocks in Shuidong area

区酸性火山岩具有较为一致的地球化学特征。所有样品均有富硅(72.51% ~ 81.79%)、富钾(4.53% ~ 8.14%),贫 MgO 、 CaO 、 Na_2O 的特征,全碱($\text{K}_2\text{O} +$

表 2 水东地区酸性火山岩全岩主量元素($w_B/\%$)、稀土元素和微量元素含量($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Chemical compositions of representative samples from acid volcanic rocks in Shuidong area

样号	H8938-1-1	H8938-1-2	H8938-2-3	H1511XC-1-6	H8938-2-1	H8938-2-2	H1511XC-1-7	H1511XC-1-2	H1511XC-1-3	H1511XC-1-4	H1511XC-1-5
岩性	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹质角砾岩	流纹质角砾岩	流纹质角砾岩	珍珠岩	珍珠岩	珍珠岩	珍珠岩
SiO ₂	77.22	77.41	76.15	81.79	80.18	78.00	72.54	73.30	73.24	73.15	73.70
Al ₂ O ₃	11.01	11.05	11.68	9.53	9.53	10.74	12.39	11.98	12.03	12.02	12.04
CaO	0.19	0.39	0.22	0.55	0.18	0.28	1.57	0.95	1.00	0.90	0.98
Fe ₂ O ₃	0.74	0.54	0.75	0.43	0.67	0.65	0.78	0.62	0.64	0.65	0.56
FeO	0.17	0.33	0.12	0.10	0.11	0.12	0.11	0.22	0.23	0.18	0.26
K ₂ O	8.14	6.46	7.47	4.53	7.20	6.93	6.87	5.04	5.04	5.34	5.03
MgO	0.09	0.44	0.28	0.06	0.06	0.29	0.25	0.13	0.16	0.11	0.16
MnO	0.03	0.04	0.03	0.01	0.03	0.08	0.04	0.06	0.07	0.06	0.06
Na ₂ O	0.98	0.75	0.75	1.91	0.68	0.64	0.46	2.60	2.29	2.49	2.47
P ₂ O ₅	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01
TiO ₂	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09
LOI	0.70	1.63	1.49	0.65	0.93	1.42	3.84	4.15	4.74	4.41	4.24
总量	99.37	99.13	99.02	99.64	99.65	99.24	98.95	99.13	99.54	99.4	99.6
A/CNK	1.02	1.24	1.20	1.05	1.03	1.19	1.12	1.05	1.09	1.04	1.07
NK/A	0.95	0.74	0.80	0.84	0.94	0.80	0.66	0.81	0.77	0.82	0.79
La	23.8	29.2	21.6	22.2	19.8	25.2	21.5	21.6	26.1	23.2	23.9
Ce	46.6	40.3	34.4	41.6	40.1	50.1	46.4	45.0	53.0	47.2	47.5
Pr	5.42	6.01	4.68	5.15	4.66	5.56	5.17	5.09	6.12	5.40	5.53
Nd	21.1	23.0	17.3	19.6	18.3	21.7	19.8	20.3	23.8	21.6	21.8
Sm	4.11	4.57	3.33	3.81	3.71	4.16	3.95	4.19	4.75	4.37	4.32
Eu	0.57	0.71	0.51	0.53	0.46	0.51	0.72	0.56	0.65	0.57	0.61
Gd	3.22	4.51	2.79	3.02	2.82	3.26	3.45	3.68	4.01	3.53	3.54
Tb	0.47	0.71	0.43	0.45	0.43	0.51	0.56	0.57	0.60	0.53	0.53
Dy	3.08	4.50	2.78	2.80	2.71	3.15	3.67	3.65	3.69	3.42	3.35
Ho	0.56	0.82	0.54	0.54	0.49	0.59	0.75	0.68	0.68	0.65	0.63
Er	1.62	2.30	1.50	1.51	1.41	1.72	2.21	1.97	1.98	1.82	1.84
Tm	0.27	0.35	0.26	0.25	0.23	0.29	0.38	0.32	0.33	0.31	0.30
Yb	1.75	2.27	1.82	1.72	1.69	1.96	2.67	2.25	2.26	2.10	2.09
Lu	0.27	0.35	0.26	0.25	0.25	0.29	0.38	0.33	0.33	0.30	0.31
Y	15.8	24.2	14.9	14.3	14.2	16.6	20.6	19.7	19.6	17.9	18.1

续表 2
Continued Table 2

样号 岩性	H8938-1-1 流纹岩	H8938-1-2 流纹岩	H8938-2-3 流纹岩	H1511XC-1-6 流纹岩	H8938-2-1 流纹质角砾岩	H8938-2-2 流纹质角砾岩	H1511XC-1-7 流纹质角砾岩	H1511XC-1-2 珍珠岩	H1511XC-1-3 珍珠岩	H1511XC-1-4 珍珠岩	H1511XC-1-5 珍珠岩
Li	30.90	39.60	38.30	22.40	33.10	31.80	9.86	7.12	6.02	5.75	6.65
Be	2.06	1.89	1.68	2.45	2.25	1.58	3.67	3.12	3.20	2.92	2.94
Rb	234	241	250	181	202	212	176	228	252	233	240
Ba	635	379	376	370	405	561	149	310	394	342	345
Th	18.6	19.7	18.8	15.7	15.7	17.7	20.1	19.4	21.3	19.2	19.4
U	2.66	1.83	1.74	5.14	2.51	2.23	9.57	6.14	6.20	6.00	5.87
Nb	11.8	12.6	12.2	10.1	11.5	11.6	12.7	12.7	13.2	12.2	12.0
Ta	1.24	1.38	1.32	1.05	1.10	1.23	1.38	1.40	1.42	1.30	1.30
Sr	56.4	72.6	59.4	84.7	55.5	63.9	176	91.1	145	99.7	97.6
Hf	3.34	3.45	3.38	2.91	2.86	3.10	3.64	3.54	3.84	3.66	3.64
Zr	78.4	79.9	74.8	67.2	66.4	70.4	84.8	78.8	89.3	86.5	87.0
Sc	2.62	3.22	2.92	1.91	2.13	2.79	2.91	2.94	3.19	3.22	2.76
V	2.54	1.23	1.26	2.62	1.87	1.74	1.11	0.59	0.86	0.82	0.67
Cr	0.55	0.62	0.91	0.64	0.94	0.44	0.60	0.42	0.45	0.38	0.37
Co	0.31	0.23	0.20	0.18	0.14	0.59	0.32	0.25	0.27	0.25	0.25
Ni	0.16	0.38	0.21	0.07	0.21	0.5	0.42	0.13	0.21	0.15	0.18
Pb	28.9	29.7	28.8	26.5	26.2	28.8	27.0	28.8	30.7	29.0	27.7
Cu	0.45	0.52	0.40	0.42	0.31	0.80	0.71	0.45	0.50	0.60	0.67
Zn	18.3	29.0	22.4	14.5	13.3	26.9	31.5	30.7	34.4	29.8	29.9
Ga	10.6	13.9	13.0	10.2	9.77	11.8	17.0	14.2	15.6	13.9	13.7
Mo	0.73	1.06	1.01	0.72	0.85	0.77	1.34	1.69	1.75	1.66	1.54
Cd	<0.05	0.05	0.06	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	0.09	0.07	0.07	0.07
Sn	2.69	2.44	2.53	2.49	2.00	2.63	5.63	3.44	3.55	3.19	3.37
Cs	4.89	8.94	8.21	8.47	3.61	3.69	21.4	13.9	13.8	12.3	14.7
W	2.29	1.16	1.13	1.66	2.29	3.73	4.08	2.26	2.61	2.20	1.97
Bi	0.15	<0.05	<0.05	0.08	0.09	0.05	0.72	0.50	0.48	0.44	0.38
Σ REE	112.84	119.6	92.2	103.43	97.06	119	111.61	110.19	128.3	115	116.25
Eu/Eu*	0.48	0.48	0.51	0.48	0.43	0.42	0.60	0.44	0.46	0.44	0.48
(La/Yb) _N	9.17	8.67	8.00	8.70	7.90	8.67	5.43	6.47	7.79	7.45	7.71

Na_2O) 含量为 6.44% ~ 9.12% (平均 7.64%), 在 TAS 火山岩分类命名图解中均落入亚碱性系列的流纹岩范围内(图 5)。 K_2O 含量大于 Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值变化范围大, 介于 2.04 ~ 14.93 之间, 平均为 6.72%, 为富钾系列。 Al_2O_3 含量为 9.53% ~ 12.39% (平均 11.27%), 铝过饱和指数(A/CNK)变化于 1.02 ~ 1.24 (平均 1.10), 为过铝质岩石。

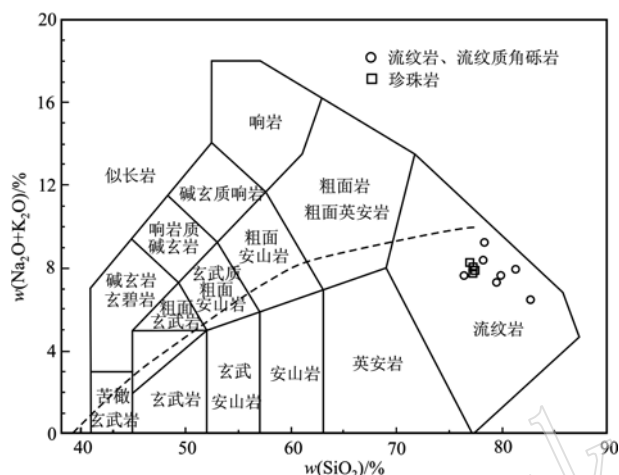


图 5 水东地区酸性火山岩 TAS 图解(底图据 LeMaitre, 2002)

Fig. 5 The total alkali versus silica (TAS) diagram (after LeMaitre, 2002) used for the classification of acid volcanic rocks in Shuidong area

水东地区酸性火山岩 REE 总量为 92.2×10^{-6} ~ 128.3×10^{-6} 。在球粒陨石标准化 REE 元素分布图中(图 6a), 表现为 LREE 富集的右倾分布型式, 轻重稀土元素明显分馏, $(\text{La}/\text{Yb})_n = 5.43 \sim 9.17$ (平均值为 7.81), 并呈现显著的 Eu 负异常, Eu/Eu^* 值为 0.44 ~ 0.60 (平均值为 0.47)。在原始地幔标准化蛛网图上(图 6b), 均表现除大离子亲石元素 Rb、Th、K 和 Pb 等的相对富集以及 Ba、Sr、Nb、P 和 Ti 的亏损。此外, 这些酸性火山岩样品的 Co、Ni、Cr 含量均很低(小于 1×10^{-6})。

3.3 全岩 Sr-Nd、锆石 Hf 同位素特征

水东地区酸性火山岩 Sr、Nd 同位素分析结果见表 3。6 个样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值介于 0.7073 ~ 0.7088 之间, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于 -7.05 ~ -5.56 之间, 均显示了相对均一富集的 Sr-Nd 同位素特征。

对前文进行过锆石 U-Pb 定年的 3 个火山岩样品又进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析, 分析结果列于表 4。流纹质角砾岩样品(1511XC-1-7)中的 22 颗锆石的 22 个点分析得到的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 -8.4 ~ -3.3 之间, 平均值为 -5.6; 流纹岩(8938-2-3)中的 20 颗锆石和 20 个点分析得到的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 -5.1 ~ -1.3 之间, 平均值为 -3.1; 珍珠岩(8938-3-1)中 18 颗锆石的 18 个点的分析得到 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布于 -6.6 ~ -1.5 之间, 平均值为 -3.4。

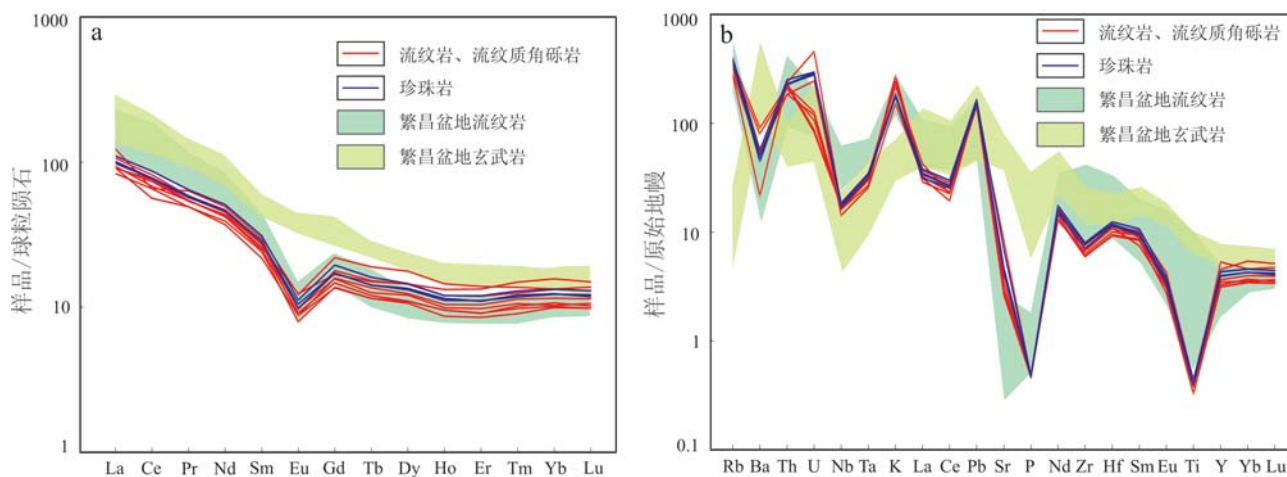


图 6 水东地区酸性火山岩球粒陨石标准化 REE 配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized trace element diagram (b) for samples of acid volcanic rocks in Shuidong area

繁昌盆地火山岩数据源自刘春等(2012)、Yan 等(2015); 球粒陨石及原始地幔值据 Sun 和 McDonough(1989)
Data of volcanic rocks in Fanchang Basin after Liu Chun *et al.* (2012) and Yan *et al.* (2015); normalizing values after Sun & McDonough (1989)

表 3 水东地区酸性火山岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of representative samples from acid volcanic rocks in Shuidong area

样号	H8938-1-3	H8938-2-3	H1511XC-1-6	H8938-2-1	H8938-3-1	H1511XC-1-4
岩性	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹质角砾岩	珍珠岩	珍珠岩
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	241	250	181	202	228	233
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	72.6	59.4	84.7	55.5	91.1	99.7
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	9.63	12.21	6.20	10.55	7.26	6.78
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.727 036	0.730 369	0.719 775	0.727 515	0.721 319	0.72 074
$\pm 2\sigma$	0.000 015	0.000 015	0.000 018	0.000 018	0.000 015	0.000 022
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.708 8	0.707 3	0.708 1	0.707 6	0.707 6	0.707 9
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	4.57	3.33	3.81	3.71	4.19	4.37
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	23	17.3	19.6	18.3	20.3	21.6
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 264	0.512 243	0.512 284	0.512 254	0.512 214	0.512 254
2σ	0.000 009	0.000 011	0.000 012	0.000 013	0.000 012	0.000 008
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	-6.00	-6.34	-5.56	-6.23	-7.05	-6.23

表 4 水东地区酸性火山岩锆石 Hf 同位素测试结果

Table 4 Hf isotopic compositions of zircon grains from acid volcanic rocks in Shuidong area determined by LA-MC-ICPMS

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	t/Ma
1511XC-1-7 流纹质角砾岩								
1511XC-1-7-1	0.033 139	0.001 161	0.282 478	0.000 022	-7.5	1 100	1 668	135
1511XC-1-7-2	0.018 530	0.000 711	0.282 535	0.000 012	-5.5	1 007	1 539	135
1511XC-1-7-3	0.034 695	0.001 245	0.282 540	0.000 013	-5.4	1 015	1 532	135
1511XC-1-7-4	0.043 862	0.001 635	0.282 547	0.000 011	-5.2	1 016	1 518	135
1511XC-1-7-5	0.064 821	0.002 278	0.282 600	0.000 013	-3.3	956	1 402	135
1511XC-1-7-6	0.036 135	0.001 283	0.282 555	0.000 012	-4.8	994	1 497	135
1511XC-1-7-7	0.031 799	0.001 144	0.282 589	0.000 010	-3.6	943	1 422	135
1511XC-1-7-9	0.063 427	0.002 245	0.282 520	0.000 014	-6.1	1 071	1 581	135
1511XC-1-7-10	0.022 807	0.000 835	0.282 501	0.000 013	-6.7	1 059	1 617	135
1511XC-1-7-11	0.047 775	0.001 709	0.282 454	0.000 018	-8.4	1 151	1 726	135
1511XC-1-7-12	0.082 890	0.002 663	0.282 544	0.000 012	-5.4	1 049	1 531	135
1511XC-1-7-14	0.034 789	0.001 283	0.282 538	0.000 011	-5.4	1 019	1 536	135
1511XC-1-7-15	0.024 084	0.000 885	0.282 524	0.000 014	-5.9	1 028	1 565	135
1511XC-1-7-16	0.032 908	0.001 261	0.282 442	0.000 012	-8.8	1 154	1 749	135
1511XC-1-7-17	0.040 606	0.001 455	0.282 519	0.000 010	-6.1	1 050	1 578	135
1511XC-1-7-18	0.039 861	0.001 260	0.282 581	0.000 013	-3.9	957	1 439	135
1511XC-1-7-19	0.048 445	0.001 769	0.282 563	0.000 011	-4.6	996	1 483	135
1511XC-1-7-20	0.022 058	0.000 854	0.282 540	0.000 012	-5.3	1 005	1 530	135
1511XC-1-7-21	0.036 969	0.001 247	0.282 555	0.000 012	-4.8	994	1 499	135
1511XC-1-7-23	0.034 165	0.001 231	0.282 596	0.000 009	-3.4	936	1 406	135
1511XC-1-7-24	0.022 574	0.000 829	0.282 491	0.000 012	-7.1	1 073	1 639	135
1511XC-1-7-25	0.042 488	0.001 427	0.282 546	0.000 011	-5.2	1 011	1 519	135
8938-2-3 流纹质角砾岩								
8938-2-3-1	0.029 932	0.001 160	0.282 617	0.000 009	-2.7	904	1 361	133
8938-2-3-2	0.046 116	0.001 543	0.282 571	0.000 010	-4.3	978	1 464	133
8938-2-3-3	0.030 555	0.001 159	0.282 648	0.000 013	-1.6	859	1 290	133
8938-2-3-4	0.030 926	0.001 146	0.282 618	0.000 009	-2.6	902	1 357	133
8938-2-3-5	0.044 280	0.001 626	0.282 560	0.000 008	-4.7	997	1 490	133
8938-2-3-6	0.042 713	0.001 426	0.282 599	0.000 009	-3.3	936	1 402	133
8938-2-3-7	0.042 797	0.001 592	0.282 629	0.000 010	-2.3	897	1 334	133
8938-2-3-8	0.052 179	0.001 875	0.282 551	0.000 009	-5.1	1 017	1 512	133
8938-2-3-9	0.036 504	0.001 397	0.282 651	0.000 017	-1.5	861	1 285	133

续表 4

Continued Table 4

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	t/Ma
8938-2-3-11	0.027 380	0.001 034	0.282 575	0.000 007	-4.1	960	1 453	133
8938-2-3-12	0.037 452	0.001 333	0.282 636	0.000 010	-2.0	881	1 319	133
8938-2-3-13	0.037 557	0.001 361	0.282 607	0.000 008	-3.0	923	1 384	133
8938-2-3-16	0.048 965	0.001 780	0.282 632	0.000 014	-2.2	897	1 330	133
8938-2-3-18	0.046 821	0.001 693	0.282 650	0.000 013	-1.5	869	1 288	133
8938-2-3-19	0.039 356	0.001 429	0.282 551	0.000 008	-5.0	1 004	1 508	133
8938-2-3-20	0.031 378	0.001 138	0.282 570	0.000 007	-4.3	969	1 464	133
8938-2-3-21	0.033 226	0.001 302	0.282 615	0.000 009	-2.7	909	1 364	133
8938-2-3-22	0.050 429	0.001 844	0.282 599	0.000 010	-3.4	946	1 403	133
8938-2-3-23	0.032 808	0.001 290	0.282 657	0.000 016	-1.3	850	1 270	133
8938-2-3-24	0.031 514	0.001 199	0.282 558	0.000 010	-4.7	988	1 491	133
8938-3-1 珍珠岩								
8938-3-1-2	0.031 832	0.001 188	0.282 620	0.000 009	-2.6	900	1 355	131
8938-3-1-3	0.032 919	0.001 244	0.282 614	0.000 007	-2.8	910	1 367	131
8938-3-1-4	0.036 147	0.001 355	0.282 614	0.000 009	-2.8	913	1 369	131
8938-3-1-6	0.027 457	0.001 043	0.282 595	0.000 009	-3.5	931	1 409	131
8938-3-1-7	0.027 740	0.001 042	0.282 548	0.000 007	-5.1	999	1 515	131
8938-3-1-8	0.029 997	0.001 107	0.282 506	0.000 007	-6.6	1059	1 608	131
8938-3-1-9	0.023 236	0.000 856	0.282 598	0.000 006	-3.4	924	1 403	131
8938-3-1-10	0.037 928	0.001 447	0.282 572	0.000 008	-4.3	975	1 464	131
8938-3-1-11	0.033 154	0.001 262	0.282 642	0.000 009	-1.8	870	1 304	131
8938-3-1-14	0.025 356	0.000 981	0.282 599	0.000 008	-3.3	925	1 400	131
8938-3-1-15	0.041 200	0.001 598	0.282 624	0.000 010	-2.5	904	1 347	131
8938-3-1-16	0.027 168	0.001 008	0.282 610	0.000 008	-3.0	910	1 376	131
8938-3-1-18	0.028 875	0.001 078	0.282 578	0.000 007	-4.1	956	1 447	131
8938-3-1-19	0.035 916	0.001 306	0.282 592	0.000 009	-3.6	943	1 417	131
8938-3-1-21	0.041 961	0.001 580	0.282 576	0.000 009	-4.2	972	1 454	131
8938-3-1-22	0.031 224	0.001 164	0.282 623	0.000 011	-2.5	895	1 347	131
8938-3-1-23	0.020 487	0.000 827	0.282 580	0.000 009	-4.0	948	1 443	131
8938-3-1-24	0.033 996	0.001 377	0.282 652	0.000 019	-1.5	859	1 283	131

4 讨论

4.1 火山岩的形成时代

宣城水东地区的酸性火山岩的时代尚属空白,但是对于邻区繁昌盆地的酸性火山岩前人进行了较多的研究。繁昌盆地火山岩自下而上划分为3个喷发旋回:中分村组、赤沙组、蝌蚪山组,总体为一套双峰式火山岩(闫峻等,2009)。闫峻等(2009)和袁峰等(2010)分别获得蝌蚪山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄为 130.7 ± 1.1 和 130.8 ± 2.2 Ma;刘春等(2012)获得中分村组流纹岩锆石 U-Pb 年龄为 131.2 ± 1.1 和 129.1 ± 1.3 Ma;刘建敏等(2016)对中分村组流纹岩和蝌蚪山组流纹岩锆石的 U-Pb 定年结果分别为 132.1 ± 1.5 Ma 和 129.5 ± 3.3 Ma。本次获得宣城水东地区的流纹质角砾岩、流纹岩和珍珠岩等酸性

火山岩锆石 U-Pb 年龄分别为 133.2 ± 0.1 、 133.4 ± 0.8 和 131.5 ± 0.9 Ma,火山喷发时间限制在 133 ~ 131 Ma,与前人获得的繁昌盆地酸性火山岩年龄在误差范围内一致,表明水东地区酸性火山岩与繁昌盆地火山岩可能属同期火山活动产物。

近年来在长江中下游地区获得的一批高精度岩浆岩的年龄数据,基本搭建了区内岩浆活动的年代学格架。这些岩浆事件主要可分为4期,分别是 145 ~ 135、135 ~ 127、127 ~ 123 和 109 ~ 101 Ma(毛景文等,2004;周涛发等,2008,2011;刘建敏等,2014;关俊朋等,2015;薛怀民,2016;陈志洪等,2017)。水东地区酸性火山岩年龄 133 ~ 131 Ma 对应于长江中下游地区第2个岩浆主活动期,暗示它们可能形成于相同的构造环境下。

4.2 岩石成因及源区特征

目前认为酸性火山岩成因模式主要有两种:

① 由镁铁质岩浆分异产生,通常镁铁质母岩浆经过90%的结晶分异后才可以产生一定量的酸性岩浆(Wilson, 1993; Shinjo and Kato, 2000); ② 幔源高温镁铁质岩浆底侵可以诱发地壳岩石部分熔融,从而形成长英质熔体(Huppert and Sparks, 1988; Anen *et al.*, 2006)。

在球粒陨石标准化 REE 配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6)上,水东地区酸性火山岩表现出与繁昌盆地流纹岩较为一致的分布特征,指示两者具有较为相似的成因。前人研究表明,繁昌盆地中流纹岩的微量元素组成指示其并非起源于玄武岩浆直接结晶分异的产物(刘春等, 2012); 同时,已有的研究认为如果酸性火山岩由基性岩浆分异产生,那么基性岩岩石在体积上应占主导地位(Peccerillo *et al.*, 2003; Mtoro *et al.*, 2009; Aydin *et al.*, 2014),这与水东地区出露酸性火山岩为主的观察不符,由此可以基本排除其由基性岩浆结晶分异形成的可能。

水东地区酸性火山岩具有弱过铝质的岩石化学特征,同时还具有高 SiO_2 、 K_2O 含量,极低的 MgO 、 MnO 、 CaO 含量,不相容元素(Rb、Th、U、Pb)强烈富集, Ba、Sr、P、Ti 显著亏损,高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)较为亏损,具有富集的全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素组成,所以这些特征都与典型的沉积岩部分熔融产生的 S 型花岗岩相似(Gao *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015)。

下扬子地区出露的古老基底为崆岭群和董岭岩群。水东地区酸性火山岩相比于崆岭群灰色片麻岩(Xing *et al.*, 1994; 凌文黎等, 1998; Ma *et al.*, 2000)及董岭岩群斜长角闪岩(Xing *et al.*, 1994),具有相对较高的 Nd 同位素,而与长江中下游火山岩盆地中火山岩相近,并且趋向于长江中下游新元古代基底(图7)。同时,锆石 Hf 同位素资料表明,崆岭群 TTG 片麻岩和董岭岩群中锆石 Hf 同位素组成远比水东地区酸性火山岩的锆石 Hf 同位素要富集(Zhang *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2016),其锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值按照平均地壳的 Lu/Hf 值演化至 130 Ma 时均远低于水东地区酸性岩的范围,而与江南造山带新元古代花岗岩锆石 Hf 同位素组成相似(图8)。已有的研究表明这些新元古代花岗岩在扬子周缘大量发育,形成时代为 880 ~ 800 Ma, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.72 \sim 8.48$, 成因被解释为新元古代早期新生地壳经过风

化沉积循环后于 880 ~ 800 Ma 再次重熔或部分熔融的结果(Wu *et al.*, 2006; 张菲菲等, 2011; Zhang and Zheng, 2013; Wang *et al.*, 2013)。以上全岩 Sr-Nd 同位素及锆石 Hf 同位素特征表明水东地区酸性火山岩并非直接源于古老地壳,其源区物质应与新元古代早期新生地壳相关,为这些新元古代地壳物质在约 130 Ma 时期重熔的产物,与繁昌盆地中的滨江岩体成因类似(闫峻等, 2012)。

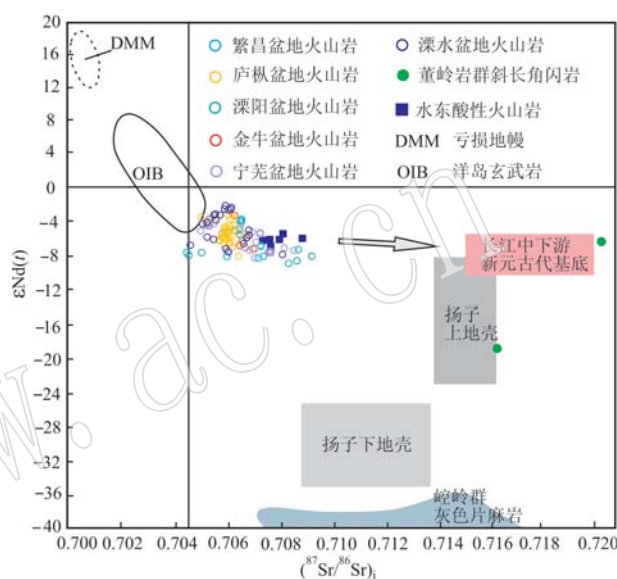


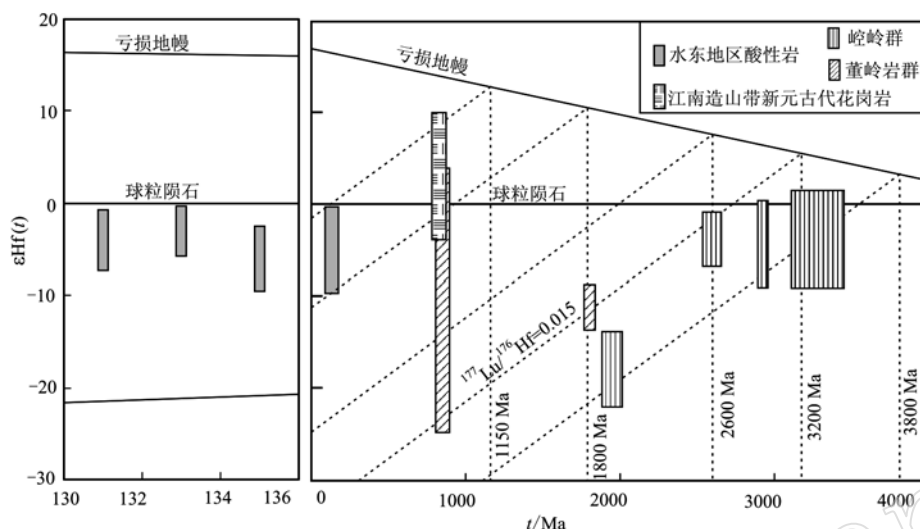
图7 水东地区酸性火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i$ 图解

[底图据陈长健等(2017)修改]

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i$ diagram of acid volcanic rocks in Shuidong area (modified after Chen Changjian *et al.*, 2017)

亏损地幔(DMM)、洋岛玄武岩(OIB)引自 Yang 等(2005); 扬子上、下地壳引自 Yang 等(2005)和 Jahn 等(1999); 崆岭群引自 Xing 等(1994)、凌文黎等(1998)和 Ma 等(2000); 董岭岩群引自 Xing 等(1994); 长江中下游新元古代基底引自 Chen 等(2001); 繁昌盆地火山岩引自 Yan 等(2008)、刘春等(2012); 庐枞盆地火山岩引自 Wang 等(2006)、Chen 等(2014); 溧阳盆地火山岩引自薛怀民(2016); 金牛盆地火山岩引自谢桂青等(2006); 宁芜盆地火山岩引自王元龙等(2001)、Chen 等(2016)、陈长健等(2017); 溧水盆地火山岩引自李超文等(2004)、高晓峰等(2007)、薛怀民等(2015)

Data source: DMM and OIB after Yang *et al.* (2005); Yangtze upper and lower crust after Yang *et al.* (2005) and Jahn *et al.* (1999); Kongling Group after Xing *et al.* (1994), Ling Wenli *et al.* (1998) and Ma *et al.* (2000); Dongling Group after Xing *et al.* (1994); Neoproterozoic basement of the LYRB after Chen *et al.* (2001); Fan-chang volcanic rocks after Yan *et al.* (2008) and Liu Chun *et al.* (2012); Luzong volcanic rocks after Wang *et al.* (2006) and Chen *et al.* (2014); Liyang volcanic rocks after Xue Huaimin (2016); Jinniu volcanic rocks after Xie Guiqing *et al.* (2006); Ningwu volcanic rocks after Wang Yuanlong *et al.* (2001), Chen *et al.* (2016) and Chen Changjian *et al.* (2017); Lishui volcanic rocks after Li Chaowen *et al.* (2004), Gao Xiaofeng *et al.* (2007) and Xue Huaimin *et al.* (2015)

图8 水东地区酸性火山岩锆石年龄 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解Fig. 8 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ diagram for the zircons from acid volcanic rocks in Shuidong area

崆岭群数据引自 Zhang 等(2006)、Guo 等(2014); 董岭岩群数据引自 Zhang 等(2015)、Chen 等(2016); 江南造山带新元古代花岗岩数据引自 Zhang 和 Zheng(2013)、Wang 等(2013)

Data for Kongling Group after Zhang *et al.* (2006) and Guo *et al.* (2014); data for Dongling Group after Zhang *et al.* (2015) and Chen *et al.* (2016); data for Neoproterozoic granites after Zhang and Zheng (2013) and Wang *et al.* (2013)

4.3 构造环境

长江中下游地区中生代岩浆岩是中国东部火山岩省的重要组成部分,其形成受中国东部中生代燕山期地球动力学背景的制约(闫峻等, 2013; 陈志洪等, 2013)。在经历了三叠纪扬子板块和华北板块碰撞造山和大陆深俯冲作用形成秦岭-大别造山带(郑永飞, 2008)之后,于早中侏罗世开始古太平洋NW向俯冲挤压造山作用(周新民等, 2007),并在晚侏罗世-早白垩世完成了近东西向的古特提斯构造域向北北东向的环太平洋构造域的转换和古太平洋俯冲作用(毛景文等, 2004; 周涛发等, 2008; 邢光福等, 2008; 张岳桥等, 2009)。

长期的构造-岩浆作用在长江中下游地区形成了断隆区和断凹区的次级构造格局(周涛发等, 2011)。对断隆区岩体及断凹区火山岩的时空分布、年代学及同位素地球化学特征的系统研究认为,145~135 Ma的岩浆活动主要发生在断隆区,主要包括宁镇、铜陵、安庆-贵池及鄂东南等地的侵入岩,以高钾钙碱性花岗闪长岩-石英闪长岩为主,为古太平洋板块NW向俯冲作用导致的板内挤压-伸展过渡环境的产物(周涛发等, 2008);135 Ma以后的岩浆活动主要发生在断陷区,主要包括溧水、溧阳、宁芜、繁

昌、庐枞、怀宁和金牛等盆地中的火山岩,形成于古太平洋板块俯冲体系下的弧后伸展-拉伸的构造背景下(周涛发等, 2008; Yan *et al.*, 2008)。本次研究获得的宣城水东地区133~131 Ma的酸性火山岩浆活动对应于后者,即为古太平洋板块俯冲作用之后伸展-拉伸环境下岩浆活动的产物。

5 结论

(1) 长江中下游宣城水东地区流纹质角砾岩、流纹岩、珍珠岩的形成年龄分别为 133.2 ± 0.8 、 133.4 ± 0.8 、 131.5 ± 0.9 Ma,形成时间较为接近,和长江中下游地区其它盆地火山岩的时代一致,都属于早白垩世岩浆作用的产物。

(2) 水东地区酸性火山岩具有弱过铝质的岩石化学特征,同时还具有高 SiO_2 、 K_2O 含量,不相容元素强烈富集,亏损高场强元素,显示壳源特征。全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素特征表明这些酸性火山岩为新元古代早期新生地壳重熔的产物。

(3) 水东地区酸性火山岩为古太平洋板块俯冲作用之后伸展-拉伸环境下岩浆活动的产物。

References

- Annen C, Blundy J D and Sparks R S J. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *Journal of Petrology*, 47: 505 ~ 539.
- Aydin F, Schmitt A K, Siebel W, *et al.* 2014. Quaternary bimodal volcanism in the Nigde volcanic complex, Cappadocia, central Anatolia Turkey: Age, petrogenesis and geodynamic implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 168: 1 ~ 24.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planet Science Letter*, 148(1 ~ 2): 243 ~ 258.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei and Wu Yanchang. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 71 ~ 76(in Chinese with English abstract).
- Chen Changjian, Chen Bin and Wang Zhiqiang. 2017. Petrology of the Mesozoic magmatic rocks in Ningwu area: Insights from in-situ zircon Hf isotope and Nd-Sr isotopes, East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 415 ~ 439(in Chinese with English abstract).
- Chen J F, Yan J, Xie Z, *et al.* 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze Region in Eastern China: Constraints on sources[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A* 26(9 ~ 10): 719 ~ 731.
- Chen L, Zhao Z F and Zheng Y F. 2014. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China[J]. *Lithos*, 190 ~ 191: 220 ~ 239.
- Chen L, Zheng Y F and Zhao Z F. 2016. Geochemical constraints on the origin of Late Mesozoic andesites from the Ningwu basin in the Middle-Lower Yangtze Valley, South China[J]. *Lithos*, 254 ~ 255: 94 ~ 117.
- Chen Zhihong, Guo Kunyi, Zhao Ling, *et al.* 2013. Petrogenesis of the ore-bearing granitic intrusion in the Songjiachong Au, Cu-Mo deposit, Jiujiang-Ruichang metallogenic district in Jiangxi Province: Constraints from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd, Hf isotopes[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(5): 1 351 ~ 1 364(in Chinese with English abstract).
- Chen Z H and Xing G F. 2016. Geochemical and zircon U-Pb-Hf-O isotopic evidence for a coherent Paleoproterozoic basement beneath the Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 279: 81 ~ 90.
- Chen Zhihong, Zhao Ling, Kuang Fuxiang, *et al.* 2017. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic study on the intrusions of the Huaining Basin in the Lower Yangtze River Belt, Central Eastern China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(3): 551 ~ 560(in Chinese with English abstract).
- Du Jianguo, Dai Shengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2003. Petrogenic and metallogenic settings of area along Yangtze River in Yanshanian, Anhui Province[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 10(4): 551 ~ 560(in Chinese with English abstract).
- Gan Junpeng, Wei Fubiao, Sun Guoxi, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks in the middle section of Ningzhen district and their metallogenic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 344 ~ 354(in Chinese with English abstract).
- Gao P, Zhao Z F and Zheng Y F. 2014. Petrogenesis of Triassic granites from the Nanling Range in South China: Implications for geochemical & versity in granites[J]. *Lithos*, 210: 40 ~ 56.
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Li Chaowen, *et al.* 2007. The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze valley[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 1 ~ 12(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61: 237 ~ 269.
- Guo J L, Gao S, Wu Y S, *et al.* 2014. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 242: 82 ~ 95.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 ~ 492(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun and Yuan Shenda. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 888 ~ 902(in Chinese with English abstract).
- Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, *et al.* 2010. Geochemistry of Late Mesozoic dioritic porphyries associated with Kiruna-style and stratabound carbonate-hosted Zhonggu iron ores, Middle-Lower Yangtze Valley, Eastern China, Constraints on petrogenesis and iron sources[J]. *Lithos*, 119 (3 ~ 4): 330 ~ 344.
- Huppert H E and Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 29: 599 ~ 624.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collision mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157(1 ~ 2): 119 ~ 146.
- LeMaitre R W. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms (Second Edition)*[M]. Cambridge University Press, Cambridge.
- Li Chaowen, Guo Feng and Li Xiaoyong. 2004. Petrogenesis and geodynamic implications of Late Mesozoic mafic volcanic rocks from the

- Lishui Basin of the Lower Yangtze region[J]. *Geochimica*, 33(4): 361 ~ 371 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Zheng Haifei, *et al.* 1998. The Sm-Nd isotopic dating study of the Archean Kongling complex in the Huangling area of the Yangtze Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(14): 1187 ~ 1191.
- Liu Chun, Yan Jun, Song Chuankong, *et al.* 2012. Geochronology and geochemistry of the volcanic rocks from Fanchang basin in the Middle-Lower Yangtze River: Petrogenesis and geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3228 ~ 3240 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianmin, Yan Jun, Chen Dandan, *et al.* 2016. Petrogenesis of the volcanic rocks in Fanchang basin, the Middle-Lower Yangtze River Belt: Zircon Hf-O isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32: 289 ~ 302 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianmin, Yan Jun, Li Quanzhong, *et al.* 2014. Zircon LA-ICPMS dating of the Anjishan pluton in Nanjing-Zhenjiang area and its significance[J]. *Geological Review*, 6(1): 190 ~ 200 (in Chinese with English abstract).
- Liu S A, Li S G, He Y S, *et al.* 2010a. Geochemical contrasts between Early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24): 7160 ~ 7178.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 ~ 571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34 ~ 43.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/EX Version 2.49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 1 ~ 56.
- Luo W, Hou T, Santosh M, *et al.* 2013. Petrogenesis of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks in the Fanchang Basin, SE China: An energy-constrained assimilation-fractional crystallization model[J]. *International Geology Review*, 55: 917 ~ 940.
- Ma C, Ehlers C, Xu C, *et al.* 2000. The roots of Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics[J]. *Precambrian Research*, 102: 279 ~ 301.
- Mao Jingwen, Stein H, Du Andao, *et al.* 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 78(1): 121 ~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Mtoto M, Maboko M A and Many S. 2009. Geochemistry and geochronology of the bimodal volcanic rocks of the Suguti area in the southern part of the Musoma-Mara Greenstone Belt, Northern Tanzania[J]. *Precambrian Research*, 174: 241 ~ 257.
- Ningwu Project Group. 1978. The Porphyrite Iron Deposit in Ningwu Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 196 (in Chinese).
- Peccerillo A, Barberio M, Yirgu G, *et al.* 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift[J]. *Journal of Petrology*, 44: 2003 ~ 2032.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, *et al.* 2000. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 28: 11 ~ 14.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293: 683 ~ 687.
- Shinjo R and Kato Y. 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. *Lithos*, 54(3 ~ 4): 117 ~ 137.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes[A]. Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Tang M, Wang X L, Xu X S, *et al.* 2012. Neoproterozoic subducted materials in the generation of Mesozoic Luzong volcanic rocks: Evidence from apatite geochemistry and Hf-Nd isotopic decoupling[J]. *Gondwana Research*, 21: 266 ~ 280.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, *et al.* 2013. Rapid eruption of the Ningwu volcanics in eastern China: Response to Cretaceous subduction of the Pacific plate[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14: 1703 ~ 1721.
- Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3 ~ 4): 533 ~ 556.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province, eastern China: Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. *Lithos*, 89: 424 ~ 446.
- Wang X L, Zhou J C, Wan Y S, *et al.* 2013. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 366(2): 71 ~ 82.
- Wang Yuanlong, Zhang Qi and Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance[J]. *Acta Petro-*

- logica Sinica, 17 (4): 565 ~ 575 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1993. Magmatism and the Geodynamics of basin formation [J]. *Sedimentary Geology*, 86(1 ~ 2): 5 ~ 29.
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China [J]. *Precambrian Research*, 146(3 ~ 4): 179 ~ 212.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Dasi Formation in Southeast Hubei Province, middle-lower reaches of the Yangtze River and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (24): 3 000 ~ 3 009.
- Xie G Q, Mao J W, Li W X, *et al.* 2011. Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the Jinniu basin, Middle-Lower Yangtze River Belt (YRB), East China: Age, petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 127: 144 ~ 164.
- Xing F M, Xu X and Li Z C. 1994. Discovery of the Early Proterozoic basement in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River and its significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2: 135 ~ 139.
- Xing Guangfu, Lu Qingdi, Chen Rong, *et al.* 2008. Study on the ending time of Late Mesozoic tectonic regime transition in South China: Comparing to the Yanshan area in North China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451 ~ 463 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin. 2016. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of volcanism in the Liyang volcanic basin on the southeastern margin of the Middle-Lower Yangtze region [J]. *Geochimica*, 45(3): 213 ~ 234 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang and Cao Guangyue. 2015. Late Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in the middle and lower Yangtze River reaches: Ages, geochemical and genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1 380 ~ 1 401 (in Chinese with English abstract).
- Yan J, Chen J F and Xu X S. 2008. Geochemistry of Cretaceous mafic rocks from the Lower Yangtze region, eastern China: Characteristics and evolution of the lithospheric mantle [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 177 ~ 193.
- Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuankong, *et al.* 2009. 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*, 54(16): 2 895 ~ 2 904.
- Yan J, Liu J M, Li Q Z, *et al.* 2015. In situ zircon Hf-O isotopic analyses of late Mesozoic magmatic rocks in the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: Implications for petrogenesis and geodynamic evolution [J]. *Lithos*, 227: 57 ~ 76.
- Yan Jun, Peng Ge, Liu Jianmin, *et al.* 2012. Petrogenesis of granites from Fanchang district, the Lower Yangtze region: Zircon geochronology and Hf-O isotopes constrains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (10): 3 209 ~ 3 227 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Shi Lei, Li Quanzhong, *et al.* 2013. Zircon LA-ICPMS dating of the volcanic rocks from Huaining Basin in the middle-lower Yangtze Valley [J]. *Geological Review*, 59(6): 1 218 ~ 1 226 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Chuang S L, Wilde S A, *et al.* 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence [J]. *Chemical Geology*, 214 (1 ~ 2): 99 ~ 125.
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, *et al.* 2010. LA-ICP MS U-Pb ages of zircons from Mesozoic volcanic rocks and their significance in Fanchang basin, Anhui Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2 805 ~ 2 817 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen and Lin Xinduo. 1992. Metallogenic of Iron-Copper-(Gold) Deposits of the Middle and Lower Reaches of Changjiang River [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 120 (in Chinese).
- Zhang Feifei, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2011. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Neoproterozoic granites in the central of Jiangnan uplift [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(1): 73 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Jian P, Liu D Y, *et al.* 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications [J]. *Science in China (D)*, 46: 830 ~ 837.
- Zhang S B, He Q and Zheng Y F. 2015. Geochronological and geochemical evidence for the nature of the Dongling Complex in South China [J]. *Precambrian Research*, 256: 17 ~ 20.
- Zhang S B and Zheng Y F. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China [J]. *Gondwana Research*, 23 (7): 1 241 ~ 1 260.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, *et al.* 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China [J]. *Precambrian Research*, 146: 16 ~ 34.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, *et al.* 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234 ~ 247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z F, Gao P and Zheng Y F. 2015. The source of Mesozoic granitoids in South China: Integrated geochemical constraints from the Taoshan batholith in the Nanling Range [J]. *Chemical Geology*, 395: 11 ~ 26.
- Zheng Yongfei. 2008. Research progress of the ultrahigh pressure metamorphism and continental collision [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53: 2 129 ~ 2 152 (in Chinese).
- Zhou Taofa, Fan Yu and Yuan Feng. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the middle and

lower reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1 665 ~ 1 678 (in Chinese with English abstract).

Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, *et al.* 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712 ~ 730 (in Chinese with English abstract).

Zhou Xinmin, Sun Tao and Shen Weizhou. 2007. Petrogenesis of the Late Mesozoic Granitoids in the Nanling Range and Geodynamic Evolution of Lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 179 ~ 195 (in Chinese).

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[M]. 北京: 地质出版社, 71 ~ 76.

陈长健, 陈 斌, 王志强, 等. 2017. 宁芜地区中生代富钾和富钠火山岩的源区特征: 岩石学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 33(2): 415 ~ 439.

陈志洪, 郭坤一, 赵 玲, 等. 2013. 与成矿相关的岩体成因: 年代学、元素与同位素地球化学特征——以江西九瑞矿集区宋家冲矿床为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(5): 1 351 ~ 1 364.

陈志洪, 赵 玲, 匡福祥, 等. 2017. 长江中下游地区怀宁盆地侵入岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究[J]. *大地构造与成矿学*, 41(3): 551 ~ 560.

杜建国, 戴圣潜, 莫宣学, 等. 2003. 安徽沿江地区燕山期火成岩成岩成矿地质背景[J]. *地学前缘*, 10(4): 551 ~ 560.

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[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 1 ~ 12.

关俊朋, 韦福彪, 孙国曦, 等. 2015. 宁镇中段中酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄及其成岩成矿指示意义[J]. *大地构造与成矿学*, 39(2): 344 ~ 354.

侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICPMS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28: 481 ~ 492.

侯可军, 袁顺达. 2010. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(3): 888 ~ 902.

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[J]. *地球化学*, 33(4): 361 ~ 371.

凌文黎, 高山, 郑海飞, 等. 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究[J]. *科学通报*, 43(1): 86 ~ 89.

刘 春, 闫 峻, 宋传中, 等. 2012. 长江中下游繁昌盆地火山岩年代学和地球化学: 岩石成因和地质意义[J]. *岩石学报*, 28(10): 3 228 ~ 3 240.

刘建敏, 闫 峻, 陈丹丹, 等. 2016. 长江中下游地区繁昌盆地火山岩成因: 锆石 Hf-O 同位素制约[J]. *岩石学报*, 32(2): 289 ~ 302.

刘建敏, 闫 峻, 李全忠, 等. 2014. 宁镇地区安基山岩体锆石 LA-

ICPMS U-Pb 定年及意义[J]. *地质论评*, 6(1): 190 ~ 200.

毛景文, Holly S, 杜安道, 等. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. *地质学报*, 78(1): 121 ~ 131.

宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 196.

王元龙, 张 旗, 王 焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 17(4): 565 ~ 575.

谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 2006. 长江中下游鄂东南地区大寺组火山岩 SHRIMP 定年及其意义[J]. *科学通报*, 51(19): 2 283 ~ 2 291.

邢光福, 卢清地, 陈 荣, 等. 2008. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. *地质学报*, 82(4): 451 ~ 463.

薛怀民. 2016. 长江中下游火山岩带东南缘溧阳盆地火山作用的年代学、地球化学及岩浆成因探讨[J]. *地球化学*, 45(3): 213 ~ 234.

薛怀民, 马 芳, 曹光跃. 2015. 长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩: 年代学格架、地球化学特征及成因讨论[J]. *地质学报*, 89(8): 1 380 ~ 1 401.

闫 峻, 刘海泉, 宋传中, 等. 2009. 长江中下游繁昌、宁芜火山盆地火山岩年代学及其意义[J]. *科学通报*, 54(12): 1 716 ~ 1 724.

闫 峻, 彭 戈, 刘建敏, 等. 2012. 下扬子繁昌地区花岗岩成因: 锆石年代学和 Hf-O 同位素制约[J]. *岩石学报*, 28(10): 3 209 ~ 3 227.

闫 峻, 史 磊, 李全忠, 等. 2013. 长江中下游地区怀宁盆地火山岩锆石 LA-ICPMS 定年[J]. *地质论评*, 59(6): 1 218 ~ 1 226.

袁 峰, 周涛发, 范 裕, 等. 2010. 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[J]. *岩石学报*, 26(9): 2 805 ~ 2 817.

翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 120.

张菲菲, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2011. 江南隆起带中段新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成研究[J]. *大地构造与成矿学*, 35(1): 73 ~ 84.

张岳桥, 徐先兵, 贾 东, 等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. *地学前缘*, 16(1): 234 ~ 247.

郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例[J]. *科学通报*, 53: 2 129 ~ 2 152.

周涛发, 范 裕, 袁 峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 24(8): 1 665 ~ 1 678.

周涛发, 范 裕, 袁 峰, 等. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用研究[J]. *地质学报*, 85(5): 712 ~ 730.

周新民, 孙 涛, 沈渭洲. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 179 ~ 195.