

doi: 10.12029/gc20160504

李名则, 吴才来, 雷敏, 等. 铜陵矿集区舒家店矿区中酸性侵入岩锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1514-1544.

Li Mingze, Wu Cailai, Lei Min, et al. Zircon U-Pb geochronology of intermediate-acid intrusions in the Shujiadian ore district of the Tongling ore concentration area[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1514-1544(in Chinese with English abstract).

铜陵矿集区舒家店矿区中酸性侵入岩锆石 U-Pb 年代学研究

李名则^{1,2} 吴才来³ 雷敏³ 郜源红³ 王楠³

(1.四川省地矿局四〇五地质队,四川 都江堰 611830;2.四川省地质调查院,四川 成都 610081

3.中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘要:铜陵舒家店地区中酸性侵入岩发育,主要由舒家店岩体、林家冲岩体及其周围的小岩体构成。区内侵入岩可划分为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列。对两个主要岩体的钻孔岩心采样并对其进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作。研究表明,舒家店地区中酸性侵入岩活动存在多期性,花岗闪长斑岩侵入年龄在 147.0~146.9 Ma,辉石二长闪长岩为 144.8 Ma,石英二长闪长岩为 141.0 Ma,花岗闪长岩为 138.0 Ma,花岗斑岩在 130.5~124.0 Ma,长英质细晶岩为 129.4 Ma,并给出区内中酸性岩浆侵位先后次序为:花岗闪长斑岩→辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩→花岗闪长岩→花岗斑岩脉/长英质岩脉。

关键词:铜陵;舒家店;LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年;岩浆活动

中图分类号:P597;P581 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)05-1514-31

Zircon U-Pb geochronology of intermediate-acid intrusions in the Shujiadian ore district of the Tongling ore concentration area

LI Ming-ze^{1,2}, WU Cai-lai³, LEI Min³, GAO Yuan-hong³, WANG Nan³

(1.No. 405 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Development, Dujiangyan 611830, Sichuan, China;

2. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Intermediate-acid intrusive rocks are well developed in Shujiadian area of Tongling region. The intrusive rocks are mainly composed of Shujiadian rock body, Linjiachong rock body and several minor rock bodies around them. The intrusive rocks in the area can be divided into high-K calc-alkaline series and shoshonite series. In this study, the authors carried out LA-ICP-MS zircon U-Pb chronological research on the two main rock bodies. The results show that there existed multiple phases in the

收稿日期:2016-03-08;改回日期:2016-04-25

基金项目:国家专项项目“深部探测技术与实验研究专项”(SinoProbe-05-05)、国家自然科学基金项目(41472063)、安徽省地矿局科研项目(2012-K-3)和创新研究群体科学基金项目(40921001)联合资助。

作者简介:李名则,男,1979年生,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail: mingzeli@163.com。

通讯作者:吴才来,男,1960年生,博士,研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail: wucailai@126.com。

intermediate-acidic rock intrusion events in this area. The intrusion ages of the granodiorite porphyry, the pyroxene monzodiorite, the quartz monzodiorite, the granodiorite, the granite porphyry and the felsic vein are between 147.0 Ma and 146.9 Ma, 144.8 Ma, 141.0 Ma, 138.0 Ma, between 130.5 Ma and 124.0 Ma, and 129.4 Ma, respectively. On such basis, the authors consider that the intruding order of the intermediate-acidic magma in this area should be granodiorite porphyry → pyroxene monzodiorite → quartz monzodiorite → granodiorite → granite porphyry or felsic vein.

Key words: Tongling; Shujiadian; LA-ICPMS zircon U-Pb dating; magma intrusion

About the first author: LI Ming-ze, male, born in 1979, doctor, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: mingzeli@163.com.

About the corresponding author: WU Cai-lai, male, professor, born in 1960, engages in research on mineralogy, petrology and ore deposits; E-mail: wucailai@126.com.

Fund support: Supported by National Specific Project (SinoProbe-05-05), NSFC Project (No. 41472063), Scientific Research Project of Anhui Bureau of Geology and Mineral Development (No. 2012-K-3) and Innovation Research Group Science Fund Project (No. 40921001).

铜陵矿集区位于长江中下游地区安徽省境内的长江南岸,是中国重要的有色金属基地之一。区内出露70多个中生代中酸性侵入岩体,大多数岩体的出露面积为0.5~3 km²,所有这些岩体均分布在宽约25 km、长约40 km的东西向构造-岩浆-成矿带上^[1]。区内主要发育高钾钙碱性和橄榄安粗岩两个系列的侵入岩^[2-5]。区内的铜矿床与中酸性侵入岩关系密切,鉴于此,多年来许多研究者从不同的角度研究铜陵地区的侵入岩^[1-3, 6-16],并取得了大量的成果,对于区内与侵入岩相关的矿床勘探及研究起到了重要的指导作用。

铜陵矿集区舒家店斑岩型铜及多金属矿床由华东冶金勘查局803地质队于20世纪70年代发现并进行浅部勘察,后由华东冶金勘察院开展了深入的勘察及研究工作,并取得了一定的找矿突破。一些学者也在该区开展了成矿学及其相关侵入岩年代学、地球化学研究^[17-26],而对该地区侵入岩体系统的年代学研究欠缺。基于此,本文以舒家店地区钻孔岩芯为对象,利用LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年法对区内侵入岩开展了系统的年代学研究,明确了区内中酸性岩浆活动期次,为本区及整个铜陵地区的侵入岩及成矿关系研究提供基础认识。

1 区域地质背景

长江中下游地质构造演化过程可分为3个阶段,可概括为基底形成阶段、盖层沉积阶段和板内变形阶段^[1]。铜陵地区处于于长江中下游地区大地构造演化格架之下,与下扬子前陆拗陷中的次级隆

起—铜陵凸起^[27]对应,是扬子地块与大别前陆拗陷的过渡带,多期不同方向、不同性质的构造变形相互叠加使本区形成了具有构成复杂的网格状构造体系的基底构造和盖层构造。铜陵地区在地层划分上隶属于扬子地层区的下扬子分区、贵池小区。出露的最老地层为志留系,除下、中泥盆统外,各时代地层发育基本齐全^[28]。

舒家店地区褶皱、断裂发育,主要的褶皱构造为舒家店短轴背斜。北东向、北北西向2组断裂发育,北东向主要为压性冲断裂及破碎带,是岩浆侵位的主要通道,也是矿区内主要的控矿构造;北西向主要为横切背斜的断裂,分布在矿区的东北部,可能控制着岩体的侵位变形及流体的运移^[26]。区内出露的地层主要有志留系高边家组(S_{1g}),以笔石页岩为主;坟头组(S_{2f})和茅山组(S_{3m})。西北和东北部出露有泥盆系、石炭系和二叠系,中部和西部则为第四系所覆盖。

2 岩体地质及岩相学

本文的样品采自舒家店地区的钻孔岩心。由区内岩体地质特征可知,组成本区侵入岩体的岩石类型主要为花岗闪长斑岩、辉石二长闪长岩、石英二长闪长岩和花岗闪长岩,钻孔揭露还有辉绿岩、花岗斑岩、长英质细晶岩等岩脉。

舒家店地区的侵入岩由2个主要岩体和若干小岩体组成。两个主要岩体分别为舒家店岩体和林家冲岩体(图1),岩体多侵位于背斜的近轴部,总体不规则椭圆形及不规则形状,倾向北西,局部南西。

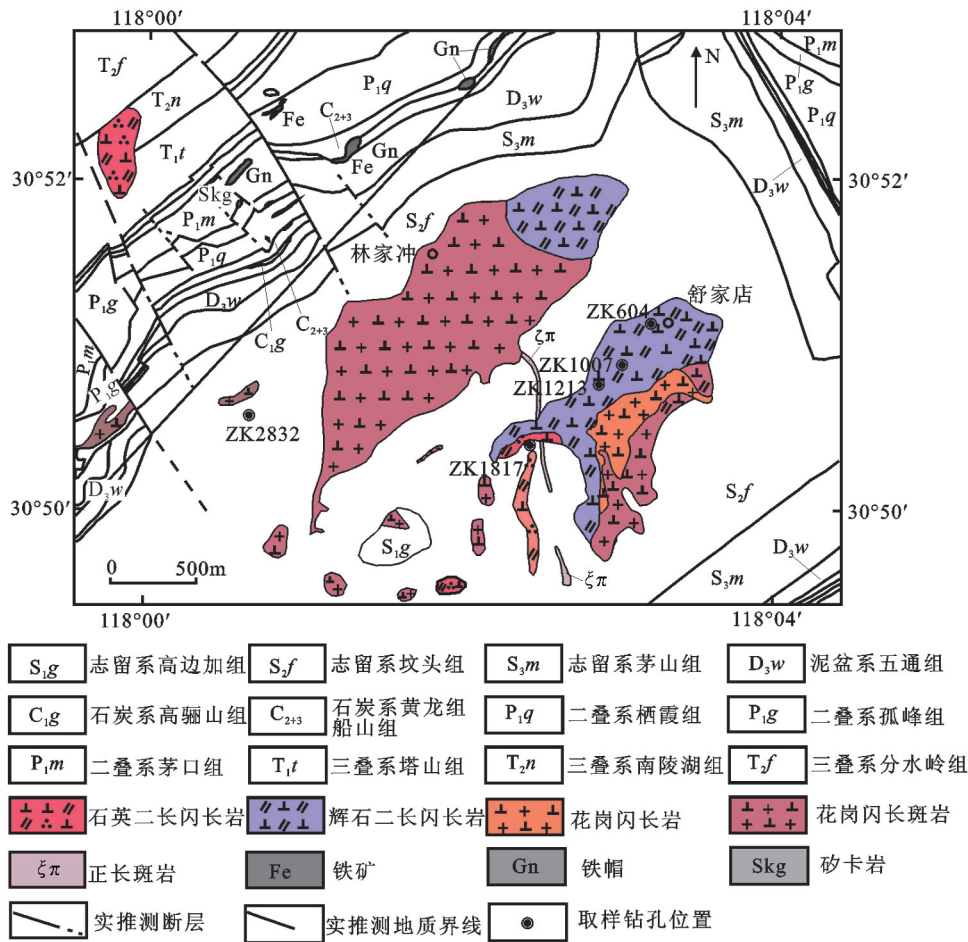


图1 舒家店地区岩体分布简图
Fig.1 Simplified geological map showing distribution of intrusive rocks in Shujiadian area

舒家店岩体主要由辉石二长闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗闪长岩及石英二长闪长岩组成,围岩为志留系坟头组砂岩。岩体呈北东—南西向延长的不规则形状,出露面积约0.75 km²(长约1.5 km,宽约0.5 km),各种岩性的岩石在接触部位相互穿插。

林家冲岩体主要由花岗闪长斑岩和辉石二长闪长岩组成,围岩为志留系坟头组砂岩,花岗闪长斑岩出露面积占绝大部分,辉石闪长岩出露于岩体的东北角,约占岩体总面积的1/5,岩体呈不规则椭圆形,面积约1.5 km²。

除上述2个主要岩体外,舒家店地区西南部还分布多个小岩体,多为花岗闪长斑岩小岩体,其次为石英二长闪长岩小岩体,岩体出露面积小,多为不规则形状,围岩为志留系坟头组砂岩和志留系高家边组粉砂质页岩。

辉石二长闪长岩,发育走向北西及南北向节理。岩石蚀变发育,主要有钾化、碳酸盐化、绿帘石化、硅化等,伴有黄铜矿、黄铁矿化。岩石呈深灰色,具中细粒等粒、半自形—他形结构,块状构造。主要矿物组成为:斜长石(45%~55%),钾长石(15%~25%),单斜辉石(10%~20%),黑云母(约2%)。斜长石呈板状及长条状,卡纳复合双晶及聚片双晶发育,可见环带结构,部分斜长石可见绢云母化。钾长石多呈不规则板状,多为简单双晶。单斜辉石主要为透辉石,柱状,正高突起,干涉色二级橙黄至二级黄,可见简单双晶,个别辉石可见绿帘石化。黑云母呈片状,多色性明显。薄片可见绿帘石细脉充填裂隙,干涉色不均匀。绿帘石细脉两侧可见绿泥石。副矿物主要见磷灰石、榍石、锆石。金属矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿等,多呈星点状分布,

也见呈不连续脉状。

辉绿岩脉,呈灰黑色,具辉绿结构,块状构造。主要矿物组成为:基性斜长石(60%~70%),单斜辉石(20%~30%)。基性斜长石多为长条状,也可见板状,聚片双晶及简单双晶,可见环带结构。另外也可见长石发生部分绿帘石化。镜下可见呈板状的斜长石斑晶,部分发生黏土化。单斜辉石呈他形,多发生黏土化及碳酸盐化,少数可见较完整晶形被绿帘石及金属矿物充填,多为黄铁矿。方解石,含量<1%,具有显著的闪突起现象。副矿物见锆石,正极高突起,高级白干涉色。金属矿物主要为磁铁矿和黄铁矿,含量约1%,呈星点状散布。

石英二长闪长岩,岩石呈浅灰色,多为半自形—他形粒状结构,块状构造。主要矿物组成:斜长石(35%~45%)、钾长石(10%~15%)、石英(15%~20%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(3%~5%)。石英主要成他形粒状,也可见半自形、自形板状,也有石英细脉充填裂隙。晶形较大的石英中含有包裹体,也见金属矿物包裹体。斜长石呈板状、长条状,聚片双晶卡纳复合双晶可见,环带结构发育,部分斜长石发生碳酸盐化。钾长石呈板状,具简单双晶,也见十字穿插双晶。角闪石在单片光下呈浅绿色,柱面解理完全,横切面具典型的角闪石式解理。黑云母,片状,单片光下浅棕—棕色,具强吸收性。副矿物为磷灰石、榍石等。金属矿物为磁铁矿和黄铁矿,零星分布。

花岗闪长斑岩,在舒家店地区分布最广,是各岩体的主要组成部分。岩石呈浅灰色,斑状结构。主要矿物组成:石英(15%~25%),长石(45%~55%),角闪石(10%~15%)基本已全部蚀变,仅保留有原矿物晶形。斑晶和基质均为石英和钾长石,斑晶15%~25%。斑晶和基质多发生黏土化,也可见碳酸盐化,个别斜长石斑晶可见绢云母化。石英斑晶边缘可见增生边。可见少量方解石,闪突起明显,高级白干涉色,含量<1%。镜下所见金属矿物主要为黄铁矿,呈粒状集合体分布,也有零星分布。

花岗闪长岩,岩石呈浅灰色,不等粒结构,块状构造。主要矿物组成为斜长石(35%~45%)、钾长石(15%~25%)、石英(10%~15%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(3%~5%)。石英主要成他形粒状,也可见半自形、自形板状,也有石英细脉充填裂隙。晶形较

大的石英中含有包裹体,也见金属矿物包裹体。斜长石呈板状、长条状,聚片双晶卡纳复合双晶可见,环带结构发育,部分斜长石发生碳酸盐化。钾长石呈板状,具简单双晶,也见十字穿插双晶。角闪石在单片光下呈浅绿色,柱面解理完全,横切面具典型的角闪石式解理。

花岗斑岩,灰白色,斑状结构,块状构造。镜下也可见石英斑晶反应边结构。主要矿物组成:石英(20%~25%)、钾长石(55%~65%)及少量斜长石。斑晶主要为钾长石,石英斑晶较少,总含量25%~35%。岩石蚀变强烈,单偏光下呈土灰色。极少量金属矿物零星分布。

长英质岩脉,呈浅灰色。矿物组成为细晶石英和长石等,含有小的石英及长石斑晶,长石几乎已全部发生蚀变。

3 岩石地球化学

分析样品采自舒家店地区钻孔岩心,样品处理及化学全分析在河北廊坊区调研究所完成,氧化物用3080E X荧光光谱仪测试,执行标准分别为:Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃、FeO按GB/T14506.28-1993标准;H₂O⁺按5GB/T14506.2-1993标准;CO₂按GB9835-1988标准;LOI按LY/T1253-1999标准。稀土元素La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y和微量元素Cu、Pb、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni用等离子质谱(ICP-MS)Excell测试,执行标准为DZ/T0223-2001;微量元素Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga用X荧光光谱仪2100测试,执行标准为JY/T016-1996。

表1中列出舒家店地区不同岩体的主量元素分析结果。舒家店地区岩体的SiO₂含量变化范围在50.27%~75.86%,平均为64.89%。全碱含量(Na₂O+K₂O)除其中一个样品(样品12CL506-2)小于1%(0.24%),其余都在5.12%~8.42%,其中K₂O含量为0.18%~5.84%,Na₂O变化于0.06%~8.03%,Na₂O/K₂O值为0.03~2.40,比值范围较大,一般Na₂O/K₂O比值小于1者其薄片在镜下观察均有钾化现象,其中一个花岗斑岩样品(12CL506-2)的K₂O含量为0.18%,Na₂O为0.06%,是由岩石发生蚀变作用导致了碱质流失引起,同时也导致其里特曼指数非常小

表1 舒家店地区侵入岩样品主量元素(%)及微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 Major(%) and trace(10^{-6}) element analyses for intrusive rocks from Shujiadian area

分析项目	12CL506-2	12CL511-2	12CL515-2	12CL523-2	12CL524-2	12CL525-2	13CL536-2	13CL543-2
	$\gamma\pi$	$\eta\delta\nu$	$\gamma\pi$	$\gamma\delta\pi$	$\gamma\delta\pi$	fs	$\gamma\delta$	$\eta\delta\sigma$
SiO ₂	70.61	50.27	75.86	54.91	60.62	75.34	65.74	65.79
TiO ₂	0.24	1.11	0.17	0.55	0.54	0.16	0.48	0.44
Al ₂ O ₃	13.50	16.32	12.64	17.18	15.98	12.48	15.36	15.35
Fe ₂ O ₃	0.27	5.12	0.41	5.61	5.09	0.54	1.65	2.08
FeO	1.48	4.10	0.43	2.47	0.79	0.56	1.59	1.22
MnO	0.20	0.14	0.03	0.14	0.01	0.07	0.05	0.04
MgO	1.22	3.54	0.49	1.71	2.00	0.40	1.41	1.18
CaO	2.82	12.05	0.97	3.40	2.82	1.43	3.65	2.99
Na ₂ O	0.06	3.61	1.67	3.12	3.17	0.15	4.11	3.99
K ₂ O	0.18	1.50	4.86	3.73	5.25	5.84	3.85	4.25
P ₂ O ₅	0.03	0.60	0.02	0.22	0.21	0.02	0.19	0.17
H ₂ O ⁺	5.40	0.58	1.24	3.03	1.14	1.59	0.78	0.94
LOI	9.29	1.22	2.34	6.60	3.25	2.86	1.67	2.21
Total	99.91	99.60	99.90	99.63	99.75	99.86	99.75	99.72
Na ₂ O+K ₂ O	0.24	5.12	6.54	6.85	8.42	5.99	7.96	8.25
Na ₂ O/K ₂ O	0.30	2.40	0.34	0.84	0.60	0.03	1.07	0.94
Li	17.28	5.61	15.94	8.85	14.02	16.34	4.63	6.42
Be	1.50	0.97	3.20	2.15	1.30	2.29	1.85	1.98
Sc	4.34	10.37	7.83	6.26	7.83	2.33	5.70	5.11
V	20.14	204.60	10.23	65.00	84.35	14.75	65.66	63.74
Cr	4.26	6.88	3.19	18.09	18.75	3.30	20.66	10.69
Co	4.47	24.10	0.22	20.99	41.50	0.75	8.33	6.97
Ni	7.53	5.15	0.83	4.95	15.99	1.20	11.42	4.58
Cu	86.75	182.92	7.74	175.61	544.85	10.43	94.93	336.70
Zn	38.00	73.11	23.98	100.39	27.11	36.56	32.51	35.38
Ga	17.98	21.57	18.14	19.77	19.87	18.23	22.57	21.71
Rb	6.31	21.63	181.50	125.80	197.80	254.60	115.00	140.50
Sr	60.91	1677.00	52.01	525.80	708.50	69.94	818.50	693.40
Zr	232.28	136.81	148.54	169.40	156.55	125.40	140.90	140.70
Nb	29.98	8.35	37.43	8.47	5.08	24.55	13.74	12.88
Cs	0.38	0.92	2.23	3.74	3.36	2.34	1.37	4.51
Ba	18.81	820.60	115.50	352.50	678.00	204.10	807.50	698.60
Hf	11.69	4.87	6.89	7.20	6.87	5.30	6.85	5.24
Ta	1.93	0.50	2.60	0.52	0.42	2.43	0.87	0.79
Tl	0.10	0.17	1.24	0.92	1.14	2.38	0.49	0.77
Pb	17.28	15.33	7.83	16.45	6.68	10.21	10.43	11.78
Bi	1.29	0.15	0.25	1.10	0.84	0.25	0.17	7.44
Th	22.75	5.98	19.28	3.45	3.51	33.71	12.77	16.62
U	6.32	1.94	7.59	1.47	1.77	12.60	5.20	6.96
Y	53.53	16.95	57.04	9.72	7.62	23.32	10.47	9.97
La	44.27	39.91	40.33	20.16	20.26	40.85	30.77	31.75
Ce	91.61	82.32	88.52	45.36	42.15	73.66	55.26	54.27
Pr	10.53	10.35	10.95	5.72	5.30	7.72	6.09	5.83
Nd	36.59	40.42	40.93	22.52	20.72	24.10	21.53	19.83
Sm	7.85	7.49	9.43	4.45	3.72	4.11	3.66	3.32
Eu	0.76	2.33	0.77	1.59	1.11	0.49	1.04	0.96
Gd	7.40	5.70	8.58	3.53	2.87	3.73	3.10	2.84
Tb	1.55	0.81	1.78	0.51	0.41	0.66	0.41	0.39
Dy	10.33	4.38	11.60	2.45	1.92	4.28	2.26	2.11
Ho	2.11	0.77	2.41	0.40	0.33	0.92	0.41	0.38
Er	5.97	1.97	6.52	0.96	0.79	2.77	1.10	1.00
Tm	1.05	0.29	1.11	0.13	0.11	0.50	0.19	0.18
Yb	6.81	1.81	7.25	0.84	0.69	3.54	1.22	1.10
Lu	1.16	0.44	1.20	0.17	0.14	0.72	0.22	0.22
ΣREE	227.98	198.98	231.36	108.78	100.51	168.06	127.26	124.19
LREE/HREE	5.27	11.31	4.72	11.11	12.85	8.81	13.27	14.10
δ Eu	0.31	1.09	0.26	1.22	1.04	0.38	0.95	0.96

注: $\gamma\pi$ —花岗斑岩, $\eta\delta\nu$ —辉石二长闪长岩, $\gamma\delta\pi$ —花岗闪长斑岩, fs—长英质岩脉, $\gamma\delta$ —花岗闪长岩, $\eta\delta\sigma$ —石英二长闪长岩。

(0.002)。Al₂O₃含量变化于12.48%~17.18%,多数样品大于15%,铝饱和指数A/CNK为0.56~2.75。里特曼指数(σ)变化于0.002~4.02。

在岩石系列判别图解(图2)中,除个别蚀变样品外,多数样品主要落于高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列范围内。因此,舒家店地区侵入岩可划分

为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列^[4]。

由微量元素分析结果(表1)可看到,舒家店地区两个系列的侵入岩均较富集大离子亲石元素。两个系列岩石均富集Sr、Ba,而Rb含量稍低,Sr在岩石中的主要载体矿物是富钙斜长石、磷灰石等;Ba的主要载体矿物为钾长石和黑云母,因此,舒家

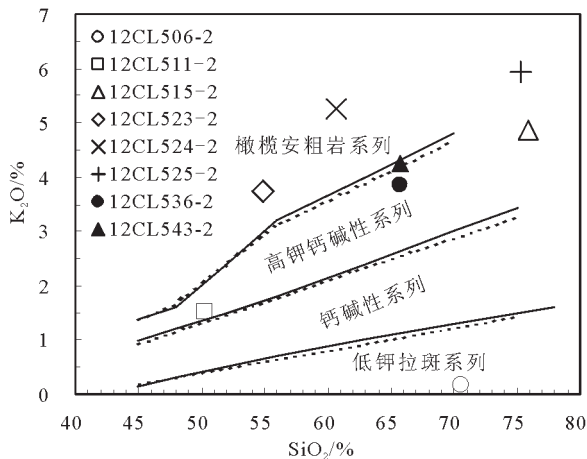


图2 SiO₂-K₂O图解(图中系列范围引自文献[29])
Fig. 2 SiO₂-K₂O diagram of Shujiadian intrusive rocks (ranges of series after reference [29])

店地区侵入岩Sr、Ba含量与区内岩石富钙富碱的特征相对应。Sr的高含量也是高钾岩石的特征之一^[10,30]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图3)中可见,橄欖安粗岩系列数具有Ba、Th、K、Sr、P、Sm等正异常,Nb、P、Ti等元素不同程度的负异常。高钾钙碱性系列具Th、La、Sm等正异常,而Nb、P、Ti、Y、Yb等具有不同程度的负异常,其中酸性侵入岩具有显著的Sr、P、Ti负异常。

舒家店地区两个系列岩石的稀土元素配分模式基本一致(图4),均为明显的轻稀土富集右倾型,而重稀土(HREE)相对平坦。稀土总量变化于

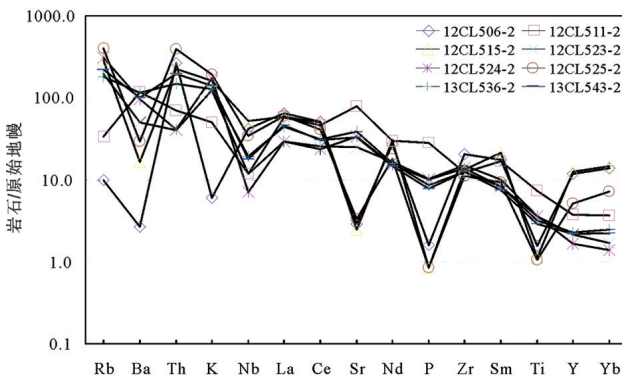


图3舒家店地区侵入岩微量元素蛛网图
(标准化数据引自文献[31])
Fig. 3 Spider diagram of trace elements of intrusive rocks from Shujiadian area (standardized data after reference [31])

100.5×10⁻⁶~231.4×10⁻⁶,其中橄欖安粗岩系列稀土总量变化于100.5×10⁻⁶~108.8×10⁻⁶,平均104.7×10⁻⁶,高钾钙碱性系列变化于12.42×10⁻⁶~231.4×10⁻⁶,平均182.0×10⁻⁶。总体来看,且从偏基性到偏酸性岩石稀土总量有逐渐减小的趋势。LREE/HREE比值变化于4.07~19.31,平均为11.69,说明本区轻重稀土分异明显。橄欖安粗岩系列岩石的δEu值在1.04~1.22,具正异常特征;高钾钙碱性系列岩石δEu值在0.26~1.22,多数具有弱负异常,岩石愈偏酸性Eu负异常愈明显。

4 LA-ICP-MS 锆石U-Pb 定年

4.1 样品特征及分析结果

本文对采自铜陵舒家店地区钻孔岩心的侵入岩样品进行U-Pb年代学研究,钻孔取样位置见图5。样品岩性为花岗闪长斑岩、石英二长闪长玢岩、辉石二长闪长岩、石英二长闪长岩、花岗斑岩,长英质细晶岩。所采集样品的副矿物主要为磷灰石、榍石、锆石等。其中部分样品中的锆石在镜下可直接观察到,单偏光下锆石为淡黄色一金黄色,偶见无色透明,正高突起,正交偏光下干涉色明亮鲜艳。

锆石U-Pb含量测定是在中国科学技术大学(合肥)激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)实验室进行。实验选择的标样为91500,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值误差为±2σ。U/Pb比值数据处理使用软件LaDating@Zrn,校正Pb同位素使用软件ComPbcorr#3-18^[32],校正后的数据使用美国

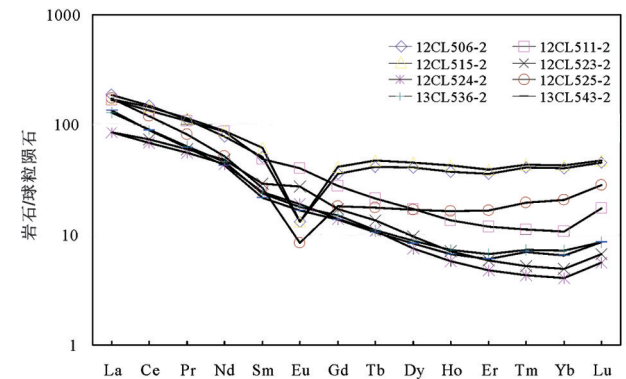


图4舒家店地区侵入岩稀土元素配分模式图解(标准化数据引自文献[31])
Fig. 4 REE assemblage of intrusive rocks from Shujiadian area (standardized data after reference [31])

表2 不同测年方法获得的舒家店地区岩体年龄
Table 2 Ages of intrusive rocks in Shujiadian area
obtained by different dating methods

岩性	分析方法	年龄/Ma	数据来源
石英二长闪长岩		147.0	
斑状石英二长闪长岩	全岩 K-Ar	87.0	[35]
辉石闪长岩		102.4	
辉石二长闪长岩	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	138.2	[17]
辉石二长闪长岩	SHRIMP U-Pb	142.4	[19]
辉石闪长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	139.2	[22]
花岗斑岩		124.0	本文
辉石二长闪长岩		144.8	本文
花岗斑岩		130.5	本文
花岗闪长斑岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	147.0	本文
花岗闪长斑岩		147.2	本文
长英质细晶岩脉		129.4	本文
花岗闪长岩		138.0	本文
石英二长闪长岩		141.0	本文

Berkeley地质年代学中心 Kenneth R. Ludwig 编制的 ISOPLOT 和 SQUID 程序^[33]计算年龄。

锆石 U-Pb 定年分析结果见表 3。

4.1.1 花岗斑岩

样品 12CL506-3 取自 12 线勘探剖面 ZK1213 号钻孔岩心 28 回次, 取样孔深 67~68 m。样品中锆石为自形短柱状, 长宽比为 1:1~2:1。锆石阴极发光图像显示绝大多数锆石都具有明显的环带结构(图 6), 锆石颜色深浅不一, 从灰黑色至浅灰色, 颜色深者指示较高的 U 含量。锆石 Th、U 含量分别为 4.84×10^{-6} ~ 161.02×10^{-6} 和 3.93×10^{-6} ~ 82.26×10^{-6} , Th/U 比值变化于 0.84~2.03。以上特征显示锆石为岩浆成因^[34]。该样品共分析了 30 个测点, 获得的锆石年龄变化范围较大, 为 $(118 \pm 4)\text{Ma}$ ~ $(156 \pm 8)\text{Ma}$ (表 3, 图 6)。去除不谐和的测点后, 获得 24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(124 \pm 2)\text{Ma}$ (MSWD = 1.2), 代表了花岗斑岩的结晶年龄(图 7)。

样品 12CL515-3 取自 18 线勘探剖面 ZK1817 钻孔岩心, 138 回次, 取样孔深 331 m。样品中锆石为自形粒状、短柱状, 长宽比介于 1:1~2:1, 阴极发光图像显示明显的环带结构(图 8)。Th、U 含量分别变化于 3.17×10^{-6} ~ 112.53×10^{-6} 和 7.53×10^{-6} ~ 99.29×10^{-6} , Th/U 比值变化于 0.33~3.08, 均大于 0.1, 以上锆

石特征显示其为岩浆成因。分析测点 32 个, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $(116 \pm 4)\text{Ma}$ ~ $(1098 \pm 31)\text{Ma}$, 其中 20 号点和 24 号点年龄分别为 $(324 \pm 11)\text{Ma}$ 和 $(1098 \pm 1)\text{Ma}$, 20 号点的锆石呈灰黑色, 可能为岩浆结晶分异过程中捕获的老的锆石, 而 24 号点的锆石在阴极发光图像中幔部为浅灰色, 核部为黑色, 获得的年龄值可能代表了老的继承性核的年龄。去除不谐和点后获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(130.5 \pm 2.3)\text{Ma}$ (MSWD = 0.48), 代表了花岗斑岩的结晶年龄(图 9)。

4.1.2 辉石二长闪长岩

样品 12CL511-3 取自 12 线勘探剖面 ZK1213 号钻孔岩心, 290 回次, 取样孔深 776~779 m。岩石样品中发育黄铁矿化及黄铜矿化。样品中锆石为自形一半自形粒状或短柱状, 部分锆石晶形较完整, 长宽比在 1:1~2:1, 阴极发光图像显示锆石均具有明显的震荡环带结构(图 10), 锆石颜色普遍较深。锆石 Th、U 含量分别变化于 8.31×10^{-6} ~ 253.57×10^{-6} 和 4.73×10^{-6} ~ 400.70×10^{-6} , Th/U 比值变化于 0.22~2.75。上述特征显示锆石为岩浆成因。共分析 32 个测点, 锆石年龄变化于 $(138 \pm 2)\text{Ma}$ ~ $(161 \pm 3)\text{Ma}$ 。去除不谐和点后获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(144.8 \pm 1.5)\text{Ma}$ (MSWD = 0.76), 代表了辉石二长闪长岩的结晶年龄(图 11)。

4.1.3 花岗闪长斑岩

样品 12CL523-3 取自 28 线勘探剖面 ZK2832 号钻孔岩心, 345 回次, 取样孔深 802 m。样品锆石多为自形粒状、长柱状, 长宽比变化较大, 介于 2:1~5:1, 从阴极发光图像可见所有锆石都具有明显的震荡环带结构(图 12), 大多数呈灰色。Th、U 含量较低, 分别变化于 0.96×10^{-6} ~ 10.54×10^{-6} 和 26.58×10^{-6} ~ 2.86×10^{-6} , Th/U 比值变化于 0.03~0.13。结合锆石的长宽比及阴极发光照片特征可判断该样品的锆石为岩浆成因。共分析测点 32 个, 得到锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $(140 \pm 4)\text{Ma}$ ~ $(160 \pm 4)\text{Ma}$, 除个别点外, 大多数点位的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄都为 144~151 Ma, 加权平均值为 $(147.0 \pm 2.2)\text{Ma}$ (MSWD = 0.32), 代表了本区花岗闪长斑岩的结晶年龄(图 13)。

样品 12CL524-3 取自 28 线勘探剖面 ZK2832 号钻孔岩心, 380 回次, 取样孔深 901 m, 岩性为花岗闪长斑岩。样品可见黄铁矿呈集块状分布。样品

表3 舒家店地区岩心样品LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年分析结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses for drill core samples from Shujiadian area

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		同位素比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		表面年龄/Ma		
	Th	U		Pb*	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
花岗岩																		
12CL506-3-1	84.17	70.64	1.81	0.0465	0.0021	0.1247	0.0062	0.0194	0.0006	0.0006	0.0006	23	53	119	6	124	4	
12CL506-3-2	96.91	58.48	1.67	0.0458	0.0023	0.1227	0.0067	0.0195	0.0006	0.0006	-11	62	118	6	124	4		
12CL506-3-3	14.12	8.31	0.23	0.0415	0.0050	0.1029	0.0126	0.0196	0.0008	0.0008	-203	162	99	12	125	5		
12CL506-3-4	15.01	13.74	0.33	0.0512	0.0045	0.1302	0.0113	0.0188	0.0006	0.0006	251	134	124	10	120	4		
12CL506-3-5	14.89	10.45	0.27	0.0469	0.0050	0.1136	0.0112	0.0192	0.0008	0.0008	42	138	109	10	123	5		
12CL506-3-6	26.85	25.85	0.62	0.0512	0.0030	0.1312	0.0081	0.0187	0.0006	0.0006	249	82	125	7	119	4		
12CL506-3-7	63.02	31.05	0.90	0.0482	0.0030	0.1221	0.0082	0.0184	0.0006	0.0006	107	90	117	7	118	4		
12CL506-3-8	148.31	74.19	2.24	0.0445	0.0022	0.1186	0.0062	0.0191	0.0006	0.0006	-48	57	114	6	122	4		
12CL506-3-9	36.78	23.80	0.68	0.0479	0.0037	0.1226	0.0092	0.0196	0.0007	0.0007	94	102	117	8	125	4		
12CL506-3-10	84.87	57.79	1.52	0.0470	0.0024	0.1229	0.0066	0.0189	0.0006	0.0006	51	66	118	6	121	4		
12CL506-3-11	82.06	54.10	1.50	0.0494	0.0022	0.1343	0.0067	0.0196	0.0006	0.0006	165	61	128	6	125	4		
12CL506-3-12	18.92	13.84	0.34	0.0586	0.0046	0.1511	0.0121	0.0192	0.0007	0.0007	551	110	143	11	123	5		
12CL506-3-13	5.52	4.02	0.11	0.0557	0.0104	0.1745	0.0284	0.0205	0.0011	0.0011	440	266	163	25	131	7		
12CL506-3-14	15.85	11.59	0.30	0.0465	0.0045	0.1280	0.0120	0.0194	0.0008	0.0008	24	134	122	11	124	5		
12CL506-3-15	18.92	12.97	0.36	0.0537	0.0044	0.1519	0.0132	0.0199	0.0007	0.0007	359	132	144	12	127	5		
12CL506-3-16	29.81	19.15	0.52	0.0416	0.0031	0.1122	0.0086	0.0195	0.0007	0.0007	-198	109	108	8	124	4		
12CL506-3-17	4.84	3.93	0.09	0.0570	0.0137	0.1240	0.0244	0.0186	0.0010	0.0010	490	344	119	22	119	6		
12CL506-3-18	81.67	56.30	1.62	0.0542	0.0024	0.1529	0.0073	0.0205	0.0006	0.0006	379	55	145	6	131	4		
12CL506-3-19	62.66	74.35	1.70	0.0482	0.0022	0.1296	0.0067	0.0195	0.0006	0.0006	109	65	124	6	125	4		
12CL506-3-20	11.44	11.47	0.30	0.0456	0.0045	0.1271	0.0123	0.0216	0.0008	0.0008	-23	148	121	11	138	5		
12CL506-3-21	26.65	16.37	0.45	0.0448	0.0039	0.1227	0.0110	0.0201	0.0007	0.0007	-32	132	117	10	128	4		
12CL506-3-22	27.19	18.73	0.50	0.0541	0.0034	0.1428	0.0092	0.0192	0.0006	0.0006	375	87	136	8	122	4		

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma								
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ					
12CL506-3-23	39.08	24.64	0.67	1.59	0.0544	0.0032	0.1397	0.0083	0.0191	0.0006	387	76	133	7	122	4
12CL506-3-24	161.02	82.26	2.49	1.96	0.0488	0.0020	0.1352	0.0060	0.0202	0.0006	137	53	129	5	129	4
12CL506-3-25	41.58	32.77	0.91	1.27	0.0507	0.0027	0.1506	0.0080	0.0222	0.0007	227	70	142	7	142	4
12CL506-3-26	3.88	3.35	0.13	1.16	0.1559	-0.0192	0.4845	-0.0638	0.0245	0.0013	2411	328	401.1	-43.6	156	8
12CL506-3-27	8.41	6.62	0.17	1.27	0.0519	0.0071	0.1197	0.0155	0.0204	0.0009	280	210	115	14	130	6
12CL506-3-28	23.49	17.49	0.49	1.34	0.0470	0.0036	0.1299	0.0100	0.0217	0.0008	48	105	124	9	139	5
12CL506-3-29	67.89	37.82	1.13	1.80	0.0549	0.0027	0.1489	0.0073	0.0201	0.0006	406	57	141	6	128	4
12CL506-3-30	118.13	68.40	1.90	1.73	0.0472	0.0021	0.1285	0.0060	0.0199	0.0006	59	54	123	5	127	4
辉石二长闪长岩																
12CL511-3-1	153.98	261.37	6.5	0.59	0.0486	0.0015	0.1507	0.0044	0.0223	0.0005	130	33	143	4	142	3
12CL511-3-2	74.02	151.04	3.81	0.49	0.0481	0.0017	0.1525	0.0047	0.0234	0.0004	102	39	144	4	149	3
12CL511-3-3	83.25	113.7	3.28	0.73	0.0504	0.0019	0.1652	0.0051	0.0243	0.0005	214	38	155	4	155	3
12CL511-3-4	43.98	82.92	2.15	0.53	0.0505	0.0022	0.1615	0.0061	0.0238	0.0005	217	52	152	5	151	3
12CL511-3-5	134.29	183.63	5.25	0.73	0.0506	0.0017	0.1674	0.0047	0.0246	0.0005	224	33	157	4	157	3
12CL511-3-6	8.31	37.12	0.83	0.22	0.0482	0.0031	0.1482	0.0090	0.0225	0.0005	107	95	140	8	143	3
12CL511-3-7	25.87	92.29	2.1	0.28	0.0488	0.0015	0.1525	0.0040	0.0227	0.0004	140	30	144	4	144	3
12CL511-3-8	17.03	50.8	1.21	0.34	0.0492	0.0017	0.1586	0.0049	0.0234	0.0004	158	39	149	4	149	3
12CL511-3-9	150.17	148.99	4.19	1.01	0.0498	0.0014	0.1579	0.0042	0.0228	0.0004	184	31	149	4	145	3
12CL511-3-10	94.52	115.35	2.94	0.82	0.0492	0.0014	0.1492	0.0038	0.0220	0.0004	156	29	141	3	140	3
12CL511-3-11	53.71	102.39	2.51	0.52	0.0479	0.0014	0.1507	0.0038	0.0230	0.0004	94	28	142	3	146	3
12CL511-3-12	11.09	14.73	0.38	0.75	0.0454	0.0030	0.1382	0.0089	0.0223	0.0005	-2	94	131	8	142	3
12CL511-3-13	32	116.49	2.71	0.27	0.0483	0.0014	0.1570	0.0039	0.0235	0.0004	112	28	148	3	150	3
12CL511-3-14	67.22	140.12	3.43	0.48	0.0496	0.0014	0.1569	0.0037	0.0230	0.0004	174	26	148	3	147	3

续表3

样品号及分析点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U			同位素比值			表面年龄/Ma					
	Th	U	Pb*	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
12CL511-3-15	42.99	45.09	1.46	0.95	0.0039	0.2707	0.0133	0.0252	0.0005	1147	66	243	11	161	3
12CL511-3-16	73.02	173.42	4.03	0.42	0.0015	0.1553	0.0041	0.0223	0.0004	215	29	147	4	142	3
12CL511-3-17	47.63	93.48	2.25	0.51	0.0015	0.1504	0.0043	0.0226	0.0004	113	34	142	4	144	3
12CL511-3-18	75.68	127.54	3.24	0.59	0.0014	0.1518	0.0039	0.0232	0.0004	70	30	143	3	148	3
12CL511-3-19	155.07	173.32	4.95	0.89	0.0013	0.1623	0.0038	0.0238	0.0005	152	25	153	3	152	3
12CL511-3-20	38.5	99.44	2.33	0.39	0.0017	0.1536	0.0049	0.0227	0.0005	138	40	145	4	145	3
12CL511-3-21	135.23	323.59	7.69	0.42	0.0012	0.1526	0.0033	0.0229	0.0004	99	23	144	3	146	3
12CL511-3-22	119.73	200.18	5.08	0.6	0.0016	0.1741	0.0049	0.0230	0.0005	395	31	163	4	147	3
12CL511-3-23	253.57	92.3	3.88	2.75	0.0015	0.1507	0.0043	0.0228	0.0004	86	35	143	4	145	3
12CL511-3-24	157.27	136.38	3.98	1.15	0.0014	0.1539	0.0037	0.0228	0.0004	140	27	145	3	145	3
12CL511-3-25	216.95	335.16	8.54	0.65	0.0012	0.1508	0.0032	0.0230	0.0004	85	23	143	3	146	3
12CL511-3-26	63.11	148.33	3.4	0.43	0.0014	0.1457	0.0036	0.0222	0.0004	78	28	138	3	141	2
12CL511-3-27	110.34	227.07	5.56	0.49	0.0013	0.1533	0.0031	0.0232	0.0004	81	22	145	3	148	3
12CL511-3-28	61.58	218.08	5.04	0.28	0.0012	0.1530	0.0032	0.0234	0.0004	67	22	145	3	149	3
12CL511-3-29	123.37	400.7	9.1	0.31	0.0012	0.1523	0.0032	0.0227	0.0004	124	22	144	3	145	3
12CL511-3-30	228.26	302.6	7.77	0.75	0.0013	0.1478	0.0037	0.0227	0.0005	35	27	140	3	145	3
12CL511-3-31	51.71	167.28	3.78	0.31	0.0014	0.1515	0.0034	0.0227	0.0004	110	25	143	3	145	2
12CL511-3-32	55.97	71.65	1.78	0.78	0.0016	0.1490	0.0042	0.0216	0.0004	191	34	141	4	138	2
花岗斑岩															
12CL515-3-1	26.05	34.32	0.81	0.76	0.0032	0.1292	0.0079	0.0199	0.0007	152	82	123	7	127	4
12CL515-3-2	35.04	25.49	0.69	1.37	0.0046	0.1334	0.0120	0.0196	0.0007	222	136	127	11	125	5
12CL515-3-3	7.88	7.53	0.19	1.05	0.0065	0.1012	0.0169	0.0200	0.0009	-20	247	98	16	128	6
12CL515-3-4	35.73	50.18	1.22	0.71	0.0040	0.1732	0.0108	0.0205	0.0007	675	80	162	9	131	4

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma							
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
	1σ	1σ	1σ		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
12CL515-3-5	27.07	25.58	0.65	1.06	0.0033	0.1226	0.0093	0.0200	0.0007	-72	103	117	8	128	4
12CL515-3-6	8.6	7.95	0.2	1.08	0.0665	0.1542	0.0212	0.0186	0.0011	821	192	146	19	119	7
12CL515-3-7	33.26	43.03	1.08	0.77	0.0537	0.1534	0.0084	0.0209	0.0007	360	66	145	7	134	5
12CL515-3-8	48.04	51.18	1.23	0.94	0.0503	0.1343	0.0085	0.0196	0.0007	207	85	128	8	125	4
12CL515-3-9	22.6	21.82	0.54	1.04	0.0476	0.1330	0.0100	0.0200	0.0007	82	100	127	9	127	5
12CL515-3-10	19.25	15.17	0.4	1.27	0.0533	0.1413	0.0176	0.0196	0.0008	341	203	134	16	125	5
12CL515-3-11	16.22	15.03	0.37	1.08	0.0533	0.1395	0.0114	0.0199	0.0008	342	116	133	10	127	5
12CL515-3-12	18.66	19.74	0.5	0.95	0.0508	0.1513	0.0133	0.0210	0.0008	231	134	143	12	134	5
12CL515-3-13	10.8	12.19	0.28	0.89	0.0436	0.1158	0.0131	0.0187	0.0007	-91	162	111	12	120	5
12CL515-3-14	19.11	22.1	0.57	0.86	0.0406	0.1192	0.0121	0.0216	0.0009	-253	142	114	11	138	5
12CL515-3-15	75.22	90.95	2.21	0.83	0.0501	0.1402	0.0061	0.0204	0.0006	197	49	133	5	130	4
12CL515-3-16	16.25	11.49	0.29	1.41	0.0393	0.1025	0.0133	0.0193	0.0008	-332	198	99	12	123	5
12CL515-3-17	21.46	28.53	0.68	0.75	0.0556	0.1622	0.0094	0.0209	0.0007	436	71	153	8	133	4
12CL515-3-18	20.88	23.96	0.61	0.87	0.0487	0.1421	0.0099	0.0214	0.0007	135	97	135	9	136	4
12CL515-3-19	67.2	82.42	2.03	0.82	0.0510	0.1430	0.0060	0.0210	0.0007	242	45	136	5	134	4
12CL515-3-20	14.16	26.6	1.52	0.53	0.0554	0.3944	0.0238	0.0516	0.0018	430	74	338	17	324	11
12CL515-3-21	14.99	15.63	0.39	0.96	0.0508	0.1366	0.0143	0.0203	0.0007	233	170	130	13	129	5
12CL515-3-22	72.83	99.29	2.44	0.73	0.0536	0.1548	0.0068	0.0210	0.0007	355	48	146	6	134	4
12CL515-3-23	10.59	13.79	0.33	0.77	0.0520	0.1543	0.0187	0.0215	0.0009	287	194	146	16	137	6
12CL515-3-24	3.17	9.67	1.81	0.33	0.0703	1.8114	0.0678	0.1858	0.0057	938	35	1050	24	1098	31
12CL515-3-25	112.53	36.51	1.29	3.08	0.0490	0.1257	0.0114	0.0181	0.0006	150	139	120	10	116	4
12CL515-3-26	12.67	20.77	0.47	0.61	0.0629	0.1660	0.0116	0.0200	0.0007	705	89	156	10	127	5
12CL515-3-27	31.16	40.97	0.98	0.76	0.0480	0.1415	0.0082	0.0210	0.0007	101	73	134	7	134	4

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma								
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ					
12CL515-3-28	18.81	26.25	0.66	0.72	0.0483	0.0031	0.1531	0.0096	0.0224	0.0008	116	83	145	8	143	5
12CL515-3-29	23.52	30.61	0.72	0.77	0.0425	0.0042	0.1250	0.0129	0.0207	0.0008	-152	145	120	12	132	5
12CL515-3-30	41.52	48.38	1.17	0.86	0.0506	0.0029	0.1469	0.0082	0.0205	0.0007	222	72	139	7	131	4
12CL515-3-31	7.11	9.01	0.23	0.79	0.0493	0.0110	0.1267	0.0252	0.0218	0.0011	162	306	121	23	139	7
12CL515-3-32	20.18	17.66	0.46	1.14	0.0390	0.0078	0.1049	0.0182	0.0211	0.0009	-348	236	101	17	134	6
花岗闪长斑岩																
12CL523-1	10.54	92.86	2.05	0.11	0.0475	0.0023	0.1513	0.0083	0.0231	0.0006	73	76	143	7	147	4
12CL523-2	1.77	41.56	0.88	0.04	0.0511	0.0028	0.1604	0.0096	0.0228	0.0006	247	91	151	8	146	4
12CL523-3	1.18	44.86	0.99	0.03	0.0510	0.0029	0.1671	0.0104	0.0239	0.0006	241	96	157	9	152	4
12CL523-4	3.28	42.84	0.92	0.08	0.0524	0.0030	0.1667	0.0106	0.0229	0.0006	302	96	157	9	146	4
12CL523-5	5.71	56.51	1.25	0.1	0.0492	0.0024	0.1601	0.0090	0.0236	0.0006	155	83	151	8	151	4
12CL523-6	0.96	30.14	0.64	0.03	0.0448	0.0032	0.1428	0.0109	0.0233	0.0006	-30	117	136	10	149	4
12CL523-7	9.38	73.43	1.56	0.13	0.0481	0.0023	0.1483	0.0080	0.0225	0.0006	102	78	140	7	144	3
12CL523-8	2.13	42.95	0.97	0.05	0.0494	0.0030	0.1626	0.0107	0.0242	0.0007	165	97	153	9	154	4
12CL523-9	3.24	44.34	0.99	0.07	0.0490	0.0030	0.1592	0.0109	0.0236	0.0006	146	107	150	10	150	4
12CL523-10	5.3	60.46	1.24	0.09	0.0415	0.0028	0.1282	0.0099	0.0222	0.0006	-205	121	122	9	141	4
12CL523-11	2.3	37.17	0.81	0.06	0.0508	0.0031	0.1650	0.0110	0.0233	0.0006	233	105	155	10	148	4
12CL523-12	2.37	48.49	1.02	0.05	0.0493	0.0030	0.1525	0.0098	0.0230	0.0006	162	98	144	9	146	4
12CL523-13	2.03	52.01	1.13	0.04	0.0489	0.0029	0.1580	0.0101	0.0237	0.0006	142	97	149	9	151	4
12CL523-14	2.72	39.82	1.12	0.07	0.1129	-0.0088	0.4188	-0.0398	0.0252	0.0007	1847	229	355.2	-28.5	160	4
12CL523-15	4.84	58.51	1.24	0.08	0.0516	0.0027	0.1609	0.0093	0.0227	0.0006	268	86	152	8	144	4
12CL523-16	3.54	43.77	0.94	0.08	0.0523	0.0029	0.1644	0.0099	0.0233	0.0006	299	91	155	9	148	4
12CL523-17	6.4	65.42	1.33	0.1	0.0495	0.0024	0.1498	0.0085	0.0220	0.0006	171	84	142	7	140	4

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma							
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ					
12CL523-18	1.22	26.58	0.57	0.05	0.043	0.1711	0.0133	0.0225	0.0007	483	121	160	12	144	4
12CL523-19	3.72	51.08	1.17	0.07	0.031	0.1797	0.0112	0.0247	0.0007	283	94	168	10	157	4
12CL523-20	1.95	44.17	0.92	0.04	0.0481	0.1519	0.0104	0.0229	0.0006	104	104	144	9	146	4
12CL523-21	4.85	60.78	1.29	0.08	0.0474	0.1500	0.0089	0.0232	0.0006	67	83	142	8	148	4
12CL523-22	7.94	78.94	1.69	0.1	0.0502	0.1579	0.0081	0.0229	0.0006	204	74	149	7	146	4
12CL523-23	2.26	36.4	0.77	0.06	0.0469	0.1541	0.0105	0.0236	0.0006	45	99	145	9	150	4
12CL523-24	4.32	51.26	1.07	0.08	0.0496	0.1551	0.0094	0.0228	0.0006	178	93	146	8	145	4
12CL523-25	2.84	60	1.28	0.05	0.0451	0.1502	0.0088	0.0236	0.0006	-16	79	142	8	150	4
12CL523-26	3.38	49.01	1.1	0.07	0.0670	0.2185	0.0141	0.0234	0.0006	837	91	201	12	149	4
12CL523-27	6.48	63.44	1.35	0.1	0.0497	0.1606	0.0094	0.0233	0.0006	182	90	151	8	149	4
12CL523-28	1.55	35.4	0.74	0.04	0.0504	0.1602	0.0103	0.0234	0.0006	212	98	151	9	149	4
12CL523-29	2.88	47.92	0.98	0.06	0.0496	0.1570	0.0100	0.0226	0.0006	178	98	148	9	144	4
12CL523-30	3.91	47.45	0.99	0.08	0.0478	0.1523	0.0089	0.0233	0.0006	91	86	144	8	149	4
12CL523-31	5.05	67.69	1.39	0.07	0.0455	0.1413	0.0074	0.0226	0.0006	-28	67	134	7	144	4
12CL523-32	4.63	59.18	1.2	0.08	0.0538	0.1634	0.0102	0.0222	0.0006	363	95	154	9	142	4
花岗岩长斑岩															
12CL524-3-1	2.56	40.51	0.88	0.06	0.0549	0.1739	0.0092	0.0233	0.0006	407	74	163	8	148	4
12CL524-3-2	8.17	76.66	1.61	0.11	0.0475	0.1489	0.0066	0.0225	0.0005	72	59	141	6	144	3
12CL524-3-3	3.47	52.64	1.13	0.07	0.0495	0.1608	0.0086	0.0229	0.0006	172	80	151	8	146	3
12CL524-3-4	1.35	36.17	0.76	0.04	0.0482	0.1555	0.0096	0.0229	0.0006	110	90	147	8	146	4
12CL524-3-5	2.42	36.51	0.76	0.07	0.0473	0.1479	0.0083	0.0225	0.0006	64	78	140	7	144	4
12CL524-3-6	3.37	44.82	0.95	0.08	0.0503	0.1608	0.0087	0.0227	0.0005	207	81	151	8	145	3
12CL524-3-7	2.89	49.24	1.01	0.06	0.0463	0.1446	0.0083	0.0224	0.0005	12	79	137	7	143	3

续表3

样品号及分析点号	含量/10 ⁻⁶				Th/U				同位素比值				表面年龄/Ma			
	Th	U	Pb*	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
	12CL524-3-8	6.43	65.22	1.36	0.1	0.0479	0.0022	0.1474	0.0070	0.0224	0.0005	94	67	140	6	142
12CL524-3-9	2.11	37.65	0.83	0.06	0.0468	0.0027	0.1550	0.0089	0.0236	0.0006	39	78	146	8	150	4
12CL524-3-10	3.83	61.46	1.29	0.06	0.0482	0.0024	0.1474	0.0075	0.0226	0.0005	109	72	140	7	144	3
12CL524-3-11	2.04	40.14	0.82	0.05	0.0480	0.0031	0.1503	0.0100	0.0222	0.0006	97	101	142	9	141	4
12CL524-3-12	6.63	62.83	1.33	0.11	0.0458	0.0023	0.1435	0.0078	0.0228	0.0006	-12	70	136	7	145	4
12CL524-3-13	7.22	80.27	1.75	0.09	0.0487	0.0020	0.1588	0.0069	0.0235	0.0005	133	60	150	6	150	3
12CL524-3-14	1.63	30.94	0.66	0.05	0.0498	0.0030	0.1582	0.0094	0.0233	0.0006	187	91	149	8	148	4
12CL524-3-15	3.72	55.86	1.2	0.07	0.0444	0.0023	0.1481	0.0078	0.0236	0.0006	-51	69	140	7	151	4
12CL524-3-16	3.05	46.96	0.96	0.07	0.0487	0.0027	0.1497	0.0083	0.0223	0.0006	133	80	142	7	142	4
12CL524-3-17	5.23	64.74	1.4	0.08	0.0494	0.0023	0.1625	0.0077	0.0235	0.0005	169	68	153	7	150	3
12CL524-3-18	2.17	38.86	0.81	0.06	0.0509	0.0030	0.1576	0.0092	0.0226	0.0006	234	90	149	8	144	3
12CL524-3-19	2.78	36.98	0.8	0.08	0.0541	0.0032	0.1712	0.0098	0.0234	0.0006	373	82	160	8	149	4
12CL524-3-20	1.84	36.69	0.81	0.05	0.0485	0.0027	0.1658	0.0097	0.0240	0.0006	122	86	156	8	153	4
12CL524-3-21	1.8	43.88	0.97	0.04	0.0557	0.0030	0.1785	0.0100	0.0243	0.0006	359	81	167	9	155	4
12CL524-3-22	2.72	45.29	0.95	0.06	0.0491	0.0026	0.1572	0.0088	0.0227	0.0006	152	84	148	8	145	4
12CL524-3-23	3.94	47.43	1.04	0.08	0.0468	0.0025	0.1500	0.0081	0.0235	0.0006	37	73	142	7	150	3
12CL524-3-24	7.94	74	1.55	0.11	0.0448	0.0020	0.1420	0.0068	0.0225	0.0005	-28	57	135	6	143	3
12CL524-3-25	2.72	44.13	0.95	0.06	0.0507	0.0030	0.1614	0.0095	0.0237	0.0006	227	89	152	8	151	4
12CL524-3-26	6.35	58.41	1.33	0.11	0.0518	0.0025	0.1716	0.0084	0.0244	0.0006	276	69	161	7	155	4
12CL524-3-27	3.92	55.48	1.22	0.07	0.0486	0.0024	0.1592	0.0078	0.0238	0.0006	130	70	150	7	152	4
12CL524-3-28	2.67	42.82	0.92	0.06	0.0531	0.0027	0.1756	0.0096	0.0233	0.0006	333	81	164	8	149	4
12CL524-3-29	2.81	33.68	0.75	0.08	0.0596	0.0034	0.1950	0.0118	0.0235	0.0006	589	88	181	10	150	4
12CL524-3-30	9.83	85.46	1.83	0.12	0.0468	0.0025	0.1524	0.0084	0.0231	0.0005	37	77	144	7	147	3

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}				同位素比值				表面年龄/Ma						
	Th	U	Pb*	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
12CL524-3-31	2.38	38.48	0.84	0.06	0.030	0.1623	0.0100	0.0238	0.0007	160	92	153	9	152	4
12CL524-3-32	6.27	60.24	1.22	0.1	0.0027	0.1632	0.0083	0.0218	0.0005	374	72	153	7	139	3
长英质细晶岩															
12CL525-5-1	163.37	94.56	2.74	1.73	0.0015	0.1317	0.0038	0.0200	0.0005	97	31	126	3	128	3
12CL525-5-2	75.54	54.9	1.44	1.38	0.0016	0.1213	0.0045	0.0198	0.0005	-50	37	116	4	126	3
12CL525-5-3	4.45	3.8	0.1	1.17	0.0074	0.1542	0.0159	0.0205	0.0008	799	152	146	14	131	5
12CL525-5-4	83.54	57.23	1.74	1.46	0.0057	0.2491	0.0190	0.0206	0.0005	1291	109	226	15	131	3
12CL525-5-5	159.95	116.36	3.16	1.37	0.0016	0.1413	0.0043	0.0203	0.0005	222	32	134	4	129	3
12CL525-5-6	91.6	59.47	1.7	1.54	0.0019	0.1529	0.0054	0.0213	0.0005	282	40	145	5	136	3
12CL525-5-7	224.62	156.37	4.29	1.44	0.0014	0.1312	0.0039	0.0199	0.0005	112	31	125	3	127	3
12CL525-5-8	84.1	75.34	2.01	1.12	0.0017	0.1478	0.0047	0.0206	0.0005	275	34	140	4	131	3
12CL525-5-9	319.16	254.42	6.61	1.25	0.0012	0.1424	0.0035	0.0199	0.0005	277	26	135	3	127	3
12CL525-5-10	4.05	48.99	1.06	0.08	0.0019	0.1691	0.0057	0.0235	0.0006	314	36	159	5	150	4
12CL525-5-11	87.65	92.9	2.34	0.94	0.0015	0.1461	0.0042	0.0208	0.0005	209	30	138	4	133	3
12CL525-5-12	38.2	31.23	0.88	1.22	0.0020	0.1384	0.0059	0.0211	0.0005	87	55	132	5	134	3
12CL525-5-13	321.21	200.25	4.69	1.6	0.0020	0.1612	0.0043	0.0169	0.0005	959	29	152	4	108	3
12CL525-5-14	54.64	48.13	1.24	1.14	0.0020	0.1484	0.0056	0.0203	0.0005	321	45	140	5	129	3
12CL525-5-15	92.99	64.69	1.81	1.44	0.0016	0.1403	0.0042	0.0201	0.0005	244	31	133	4	128	3
12CL525-5-16	240.61	225.12	5.76	1.07	0.0011	0.1365	0.0031	0.0203	0.0005	130	25	130	3	129	3
12CL525-5-17	106.02	65.28	1.87	1.62	0.0016	0.1344	0.0043	0.0200	0.0005	143	35	128	4	128	3
12CL525-5-18	288.31	223.84	5.95	1.29	0.0012	0.1441	0.0036	0.0205	0.0005	240	27	137	3	131	3
12CL525-5-19	104.23	68.63	1.89	1.52	0.0018	0.1505	0.0048	0.0199	0.0005	418	33	142	4	127	3
12CL525-5-20	117.91	72.82	2.25	1.62	0.0020	0.1670	0.0056	0.0209	0.0006	547	33	157	5	133	3

续表3

样品号及分析点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma							
	Th	U	Pb*		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ				
					1σ			1σ							
12CL525-5-21	155.14	115.12	3.28	1.35	0.0013	0.1414	0.0038	0.0210	0.0005	167	28	134	3	134	3
12CL525-5-22	14.13	75.97	1.61	0.19	0.0483	0.1460	0.0045	0.0221	0.0005	113	34	138	4	141	3
12CL525-5-23	16.83	23.57	0.54	0.71	0.0474	0.1297	0.0065	0.0202	0.0005	68	65	124	6	129	3
12CL525-5-24	213.99	141.33	4	1.51	0.0654	0.1774	0.0057	0.0196	0.0006	786	30	166	5	125	3
12CL525-5-25	189.81	186.81	4.8	1.02	0.0481	0.1369	0.0036	0.0207	0.0005	102	28	130	3	132	3
12CL525-5-26	57.25	47.85	1.4	1.2	0.0507	0.1514	0.0051	0.0217	0.0005	225	38	143	5	139	3
12CL525-5-27	108.04	70.5	1.96	1.53	0.0477	0.1292	0.0046	0.0198	0.0005	82	40	123	4	126	3
12CL525-5-28	2.5	40.26	0.83	0.06	0.0513	0.1562	0.0051	0.0225	0.0005	255	36	147	4	143	3
12CL525-5-29	281.53	227.55	6.23	1.24	0.0517	0.1455	0.0036	0.0205	0.0005	272	26	138	3	131	3
12CL525-5-30	187.87	125.55	3.49	1.5	0.0523	0.1431	0.0041	0.0197	0.0005	298	29	136	4	126	3
12CL525-5-31	160.34	102.15	2.89	1.57	0.0490	0.1325	0.0040	0.0197	0.0005	147	32	126	4	125	3
12CL525-5-32	172.94	92.12	2.82	1.88	0.0556	0.1543	0.0044	0.0201	0.0005	436	29	146	4	128	3
花岗闪长岩															
13CL536-3-1	170.49	204.27	5.8	0.83	0.0485	0.1456	0.0073	0.0220	0.0006	124	68	138	6	140	3
13CL536-3-2	76.46	122.82	3.45	0.62	0.0576	0.1767	0.0098	0.0222	0.0006	513	76	165	8	142	3
13CL536-3-3	136.01	171.79	4.58	0.79	0.0459	0.1322	0.0115	0.0207	0.0005	-10	136	126	10	132	3
13CL536-3-4	197.72	525.23	101.59	0.38	0.1440	0.0044	2.9712	0.1496	0.0038	2276	52	1400	39	899	21
13CL536-3-5	81.85	106.1	2.95	0.77	0.0584	0.1685	0.0120	0.0216	0.0006	545	106	158	10	138	4
13CL536-3-6	99.89	135.01	3.51	0.74	0.0498	0.1402	0.0072	0.0204	0.0005	187	73	133	6	130	3
13CL536-3-7	107.45	185.07	5.01	0.58	0.0474	0.1464	0.0070	0.0222	0.0006	71	61	139	6	142	3
13CL536-3-8	110.17	586.62	26.23	0.19	0.0804	0.0040	0.4249	0.0383	0.0011	1207	97	360	22	242	7
13CL536-3-9	168.21	221.87	6.17	0.76	0.0458	0.1380	0.0094	0.0219	0.0005	-13	93	131	8	140	3
13CL536-3-10	89.22	122.76	3.41	0.73	0.0505	0.1531	0.0097	0.0221	0.0005	220	93	145	9	141	3

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma												
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$										
13CL536-3-11	131.22	114.43	3.12	1.15	0.0027	0.1432	0.0105	0.0203	0.0005	289	112	136	9	130	3					
13CL536-3-12	160.25	136.86	4.3	1.17	0.0022	0.1574	0.0101	0.0225	0.0005	220	96	148	9	144	3					
13CL536-3-13	129.03	158.91	4.45	0.81	0.0035	0.1705	0.0144	0.0216	0.0006	528	132	160	12	137	4					
13CL536-3-14	75.34	111.51	3.12	0.68	0.0032	0.1539	0.0131	0.0220	0.0006	269	139	145	12	141	4					
13CL536-3-15	113.89	130.4	3.61	0.87	0.0025	0.1531	0.0110	0.0214	0.0006	295	109	145	10	137	4					
13CL536-3-16	131.26	176.62	5.5	0.74	0.0018	0.1566	0.0092	0.0238	0.0006	100	83	148	8	151	4					
13CL536-3-17	56.27	85.29	2.63	0.66	0.0038	0.1954	0.0173	0.0244	0.0006	516	151	181	15	156	4					
13CL536-3-18	164.32	135.65	4.75	1.21	0.0039	0.2072	0.0165	0.0233	0.0006	851	123	191	14	148	4					
13CL536-3-19	98.81	119.26	3.37	0.83	0.0027	0.1406	0.0111	0.0216	0.0006	97	126	134	10	138	3					
13CL536-3-20	367.01	260.15	8.22	1.41	0.0015	0.1503	0.0072	0.0216	0.0005	216	68	142	6	138	3					
13CL536-3-21	99.66	102.9	2.78	0.97	0.0063	0.1177	0.0196	0.0201	0.0007	-19	241	113	18	128	4					
13CL536-3-22	140.95	209.31	5.21	0.67	0.0035	0.1520	0.0133	0.0197	0.0006	462	135	144	12	126	4					
13CL536-3-23	117.3	170.43	4.7	0.69	0.0022	0.1456	0.0099	0.0218	0.0006	119	98	138	9	139	4					
13CL536-3-24	76.99	95.09	2.8	0.81	0.0038	0.1790	0.0155	0.0220	0.0006	595	135	167	13	141	4					
13CL536-3-26	115.97	142.62	3.92	0.81	0.0020	0.1533	0.0091	0.0214	0.0005	295	84	145	8	136	3					
13CL536-3-25	139.48	143.55	23.24	0.97	0.0020	1.1144	0.0557	0.1195	0.0030	858	59	760	27	728	17					
13CL536-3-27	133.71	176.93	4.97	0.76	0.0018	0.1533	0.0087	0.0217	0.0006	271	78	145	8	138	4					
13CL536-3-28	118.44	166.03	4.9	0.71	0.0018	0.1546	0.0090	0.0231	0.0006	88	79	146	8	147	4					
13CL536-3-29	53.17	63.49	30.73	0.84	0.0021	6.2719	0.2142	0.3616	0.0085	2039	28	2015	30	1990	40					
石英二长闪长岩																				
13CL543-3-1	75.58	79.58	2.4	0.95	0.0017	0.1315	0.0073	0.0224	0.0004	-94	84	125	7	143	3					
13CL543-3-2	69.7	97.74	2.94	0.71	0.0020	0.1661	0.0089	0.0229	0.0004	288	80	156	8	146	3					
13CL543-3-3	213.15	207.98	5.94	1.02	0.0014	0.1364	0.0059	0.0213	0.0004	123	59	130	5	136	2					

续表3

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			表面年龄/Ma									
	Th	U	Pb*		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$							
	1 σ	1 σ	1 σ		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ							
13CL543-3-4	97.1	125.81	3.79	0.77	0.1676	0.0015	0.0527	0.1676	0.0074	0.0232	0.0004	316	60	157	6	148	3
13CL543-3-5	264.99	254.87	7.56	1.04	0.1504	0.0010	0.0501	0.1504	0.0052	0.0218	0.0004	198	43	142	5	139	2
13CL543-3-6	74.47	100.17	2.77	0.74	0.1475	0.0023	0.0493	0.1475	0.0091	0.0216	0.0004	164	97	140	8	137	3
13CL543-3-7	101.95	122.97	3.5	0.83	0.1244	0.0013	0.0412	0.1244	0.0058	0.0221	0.0004	-224	69	119	5	141	3
13CL543-3-8	118.24	104.88	3.18	1.13	0.1458	0.0017	0.0478	0.1458	0.0077	0.0221	0.0005	88	78	138	7	141	3
13CL543-3-9	93.57	113.27	3.18	0.83	0.1341	0.0014	0.0451	0.1341	0.0062	0.0215	0.0004	-17	59	128	6	137	2
13CL543-3-10	383.19	281.68	9.52	1.36	0.1553	0.0009	0.0489	0.1553	0.0051	0.0230	0.0004	142	42	147	4	146	3
13CL543-3-11	68.76	104.62	3.18	0.66	0.2124	0.0017	0.0655	0.2124	0.0086	0.0233	0.0004	792	50	196	7	148	3
13CL543-3-12	66.44	92.72	2.59	0.72	0.1471	0.0017	0.0493	0.1471	0.0073	0.0218	0.0004	161	76	139	6	139	2
13CL543-3-13	252.29	212.38	6.69	1.19	0.1619	0.0014	0.0520	0.1619	0.0067	0.0227	0.0004	284	57	152	6	144	3
13CL543-3-14	231.25	189.76	5.69	1.22	0.1354	0.0011	0.0456	0.1354	0.0052	0.0214	0.0004	-23	44	129	5	136	2
13CL543-3-15	152.47	384.97	247.33	0.4	13.1496	0.0015	0.1908	13.1496	0.2343	0.4971	0.0087	2749	12	2690	17	2601	37
13CL543-3-16	42.88	425.83	11.02	0.1	0.1899	0.0010	0.0570	0.1899	0.0059	0.0240	0.0004	492	36	177	5	153	3
13CL543-3-17	235.44	331.43	9.6	0.71	0.1581	0.0009	0.0510	0.1581	0.0049	0.0228	0.0004	239	37	149	4	145	3
13CL543-3-18	94.1	114.61	3.37	0.82	0.1632	0.0019	0.0521	0.1632	0.0086	0.0228	0.0004	289	80	153	7	145	3
13CL543-3-19	125.2	297.92	168.57	0.42	10.0596	0.0012	0.1625	10.0596	0.1660	0.4477	0.0074	2482	12	2440	15	2385	33
13CL543-3-20	94.36	130.79	3.62	0.72	0.1611	0.0017	0.0537	0.1611	0.0076	0.0218	0.0004	359	73	152	7	139	2
13CL543-3-21	101.17	170.18	4.87	0.59	0.1834	0.0022	0.0570	0.1834	0.0102	0.0230	0.0005	493	85	171	9	146	3
13CL543-3-22	114.21	115.3	3.41	0.99	0.1528	0.0016	0.0512	0.1528	0.0071	0.0218	0.0004	251	74	144	6	139	3
13CL543-3-23	164.88	153.34	4.76	1.08	0.1513	0.0013	0.0482	0.1513	0.0062	0.0227	0.0004	107	61	143	5	145	2
13CL543-3-24	93.35	129.21	4.03	0.72	0.1647	0.0014	0.0488	0.1647	0.0071	0.0247	0.0004	137	57	155	6	157	3
13CL543-3-25	57.3	52.95	27.04	1.08	6.1452	0.0011	0.1226	6.1452	0.1203	0.3650	0.0062	1995	13	1997	17	2006	29
13CL543-3-26	41.72	51.16	1.48	0.82	0.1481	0.0024	0.0467	0.1481	0.0100	0.0224	0.0004	31	92	140	9	143	3
13CL543-3-27	62.85	75.38	2.26	0.83	0.1441	0.0020	0.0464	0.1441	0.0087	0.0229	0.0005	19	76	137	8	146	3
13CL543-3-28	69.5	76.31	2.36	0.91	0.1581	0.0019	0.0508	0.1581	0.0085	0.0231	0.0004	231	83	149	7	147	3
13CL543-3-29	36.32	61.32	1.74	0.59	0.1657	0.0024	0.0535	0.1657	0.0100	0.0229	0.0004	349	97	156	9	146	3
13CL543-3-30	95.89	91.94	2.83	1.04	0.1689	0.0025	0.0543	0.1689	0.0104	0.0229	0.0004	384	100	158	9	146	3
13CL543-3-31	197.99	152.13	4.72	1.3	0.1498	0.0013	0.0500	0.1498	0.0064	0.0218	0.0004	192	59	142	6	139	3
13CL543-3-32	103.33	207.59	106.88	0.5	9.1288	0.0013	0.1641	9.1288	0.1608	0.4020	0.0070	2499	13	2351	16	2178	32

注: $\text{Pb}^* = ^{206}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}_0$

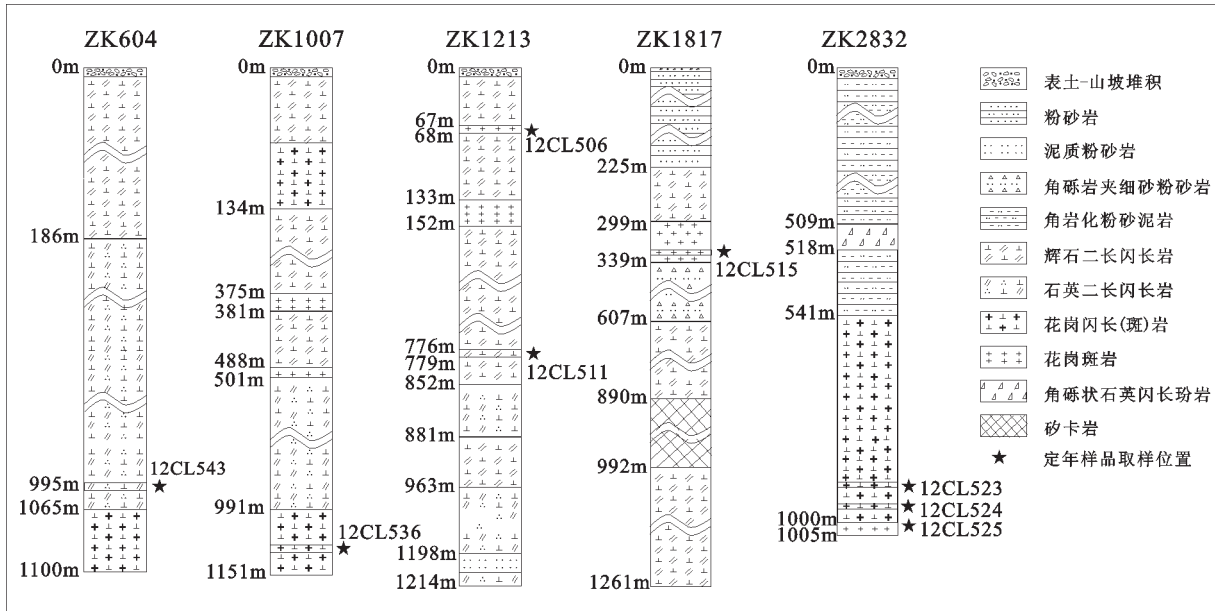


图5 舒家店地区钻孔岩心柱状图
Fig.5 Graph of drill cores in Shujiadian area



图6 花岗斑岩(12CL506-3)锆石阴极发光图像
Fig. 6 CL image of zircons of granite-porphyry (12CL506-3)

中锆石为半自形—自形粒状和长柱状,长宽比介于1:1~4:1,阴极发光图像显示了所有锆石都具有明显的环带结构(图14),为岩浆成因锆石的典型特征

之一。锆石 Th 含量较低,变化于 $1.35 \times 10^{-6} \sim 9.83 \times 10^{-6}$, U 含量相对较高,变化于 $30.94 \times 10^{-6} \sim 85.46 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化于 0.04~0.12。结合锆石的长宽比及

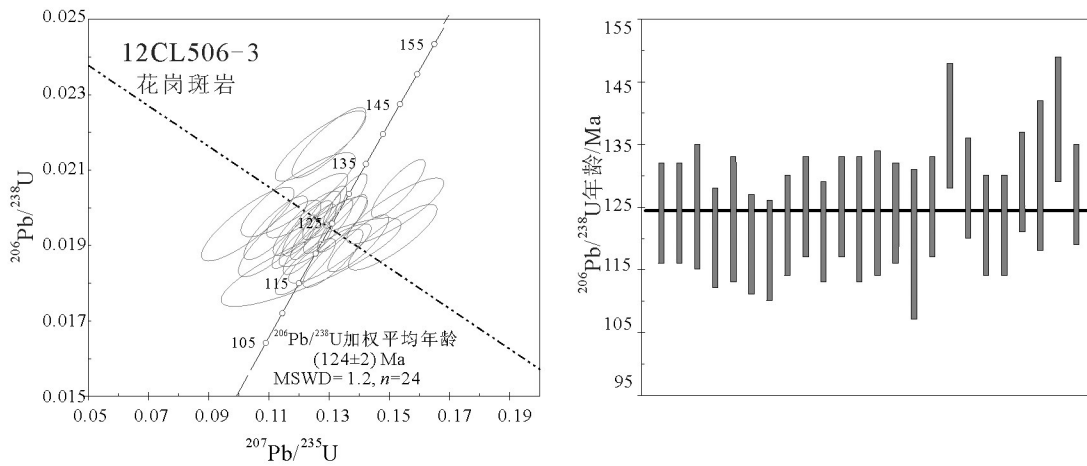


图7 花岗斑岩(12CL506-3)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
 Fig. 7 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of granite-porphry (12CL506-3)

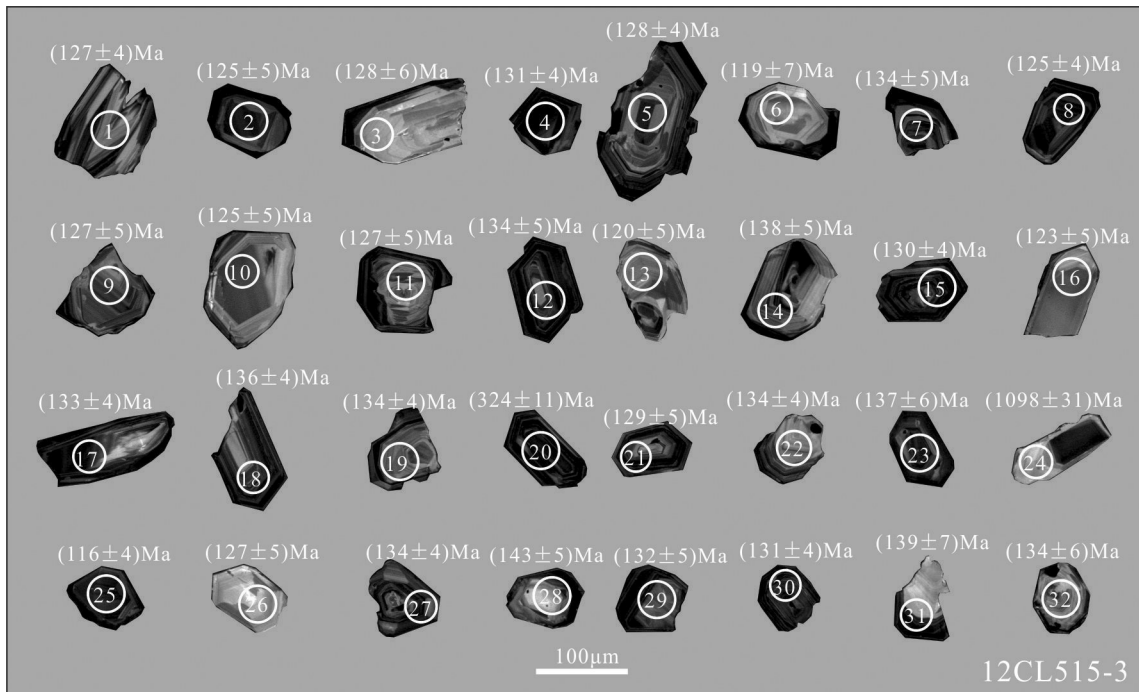


图8 花岗斑岩(12CL515-3)锆石阴极发光图像
 Fig. 8 CL image of zircons of granite-porphry (12CL515-3)

阴极发光照照片特征,该样品的锆石为岩浆成因。共分析测点 32 个,获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $(139\pm 3)\text{Ma}$ ~ $(155\pm 4)\text{Ma}$,除个别点外,大多数点位的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄都介于 143~150 Ma。去除不谐和点后获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(146.9\pm 1.8)\text{Ma}$ (MSWD = 0.54)(图 15)。

4.1.4 长英质细晶岩

样品 12CL525-5 取自 28 线勘探剖面 ZK2832 号钻孔岩心,416 回次,取样孔深 1000 m。样品中锆石为自形粒状、短柱状及长柱状,长宽比介于 1:1~3:1,阴极发光图像显示多数锆石都具有明显的环带结构(图 16),除少数锆石颜色较浅外,其他都为

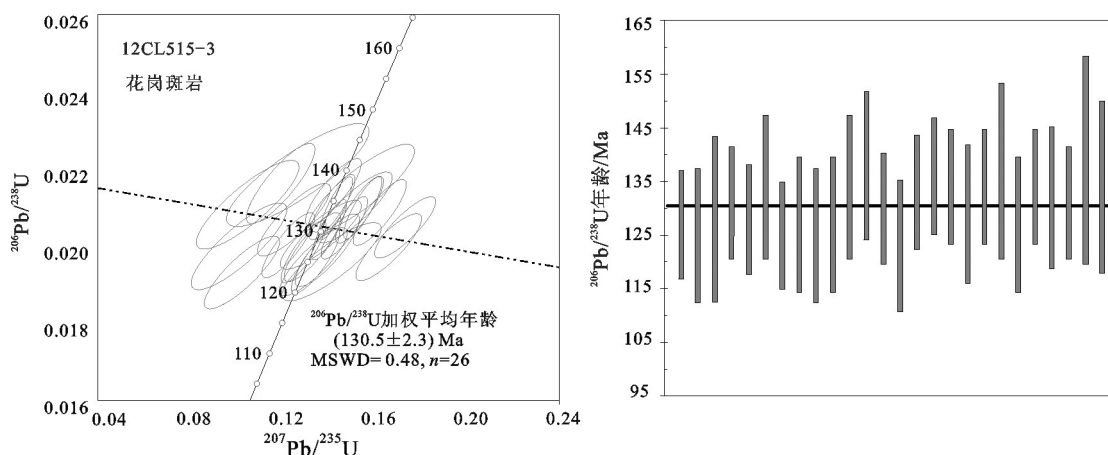


图9 花岗斑岩(12CL515-3)锆石²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值
 Fig. 9 Zircon ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U concordia curve and weighted average ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of granite-porphry (12CL515-3)

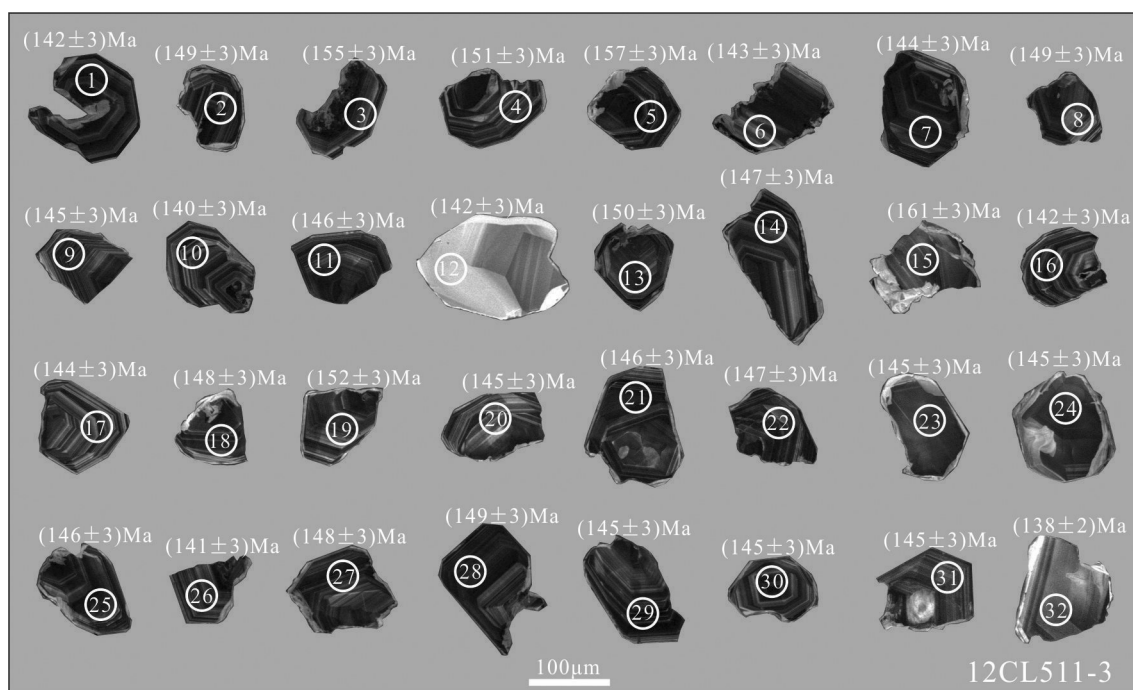


图10 辉石二长闪长岩(12CL511-3)锆石阴极发光图像
 Fig. 10 CL image of zircons of pyroxene monzodiorite (12CL511-3)

深灰色至灰黑色,与本样品较高的Th、Pb含量相对应。锆石的Th、U含量变化较大,分别变化于 2.5×10^{-6} ~ 321.21×10^{-6} 和 3.8×10^{-6} ~ 254.42×10^{-6} ,Th/U比值变化于0.06~1.88,除个别点外,绝大多数大于1。以上锆石特征显示其为岩浆成因。共分析测点32个,获得的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄变化于(108±3)Ma~(150±

4)Ma,多数介于125~131 Ma。去除不谐和点后获得²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(129.4±1.5)Ma (MSWD = 0.56)(图17)。

4.1.5 花岗闪长岩

样品 13CL536-3 取自 10 线勘探剖面 ZK1007 号钻孔岩心,413~414 回次,取样孔深 1103~1105 m,

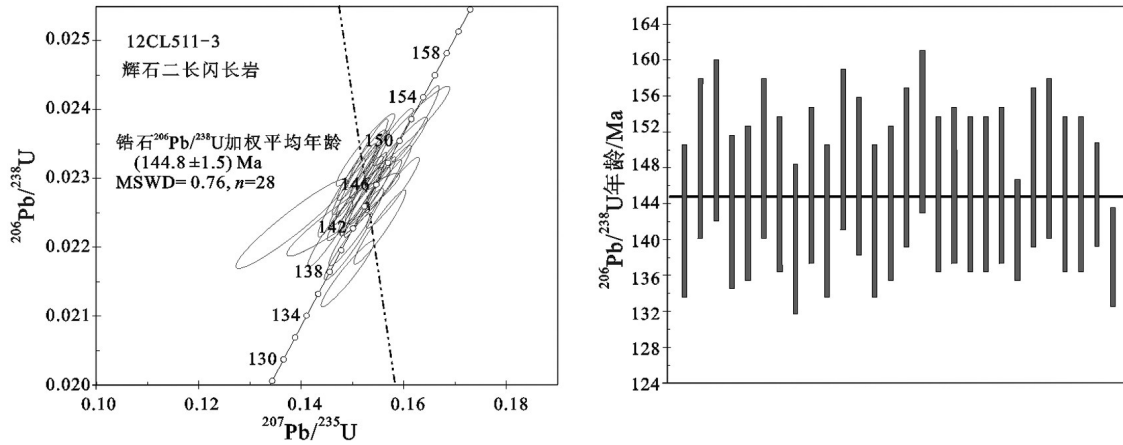


图11 辉石二长闪长岩(12CL511-3)锆石²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和曲线和²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值
 Fig. 11 Zircon ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U concordia curve and weighted average ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of pyroxene monzodiorite (12CL511-3)

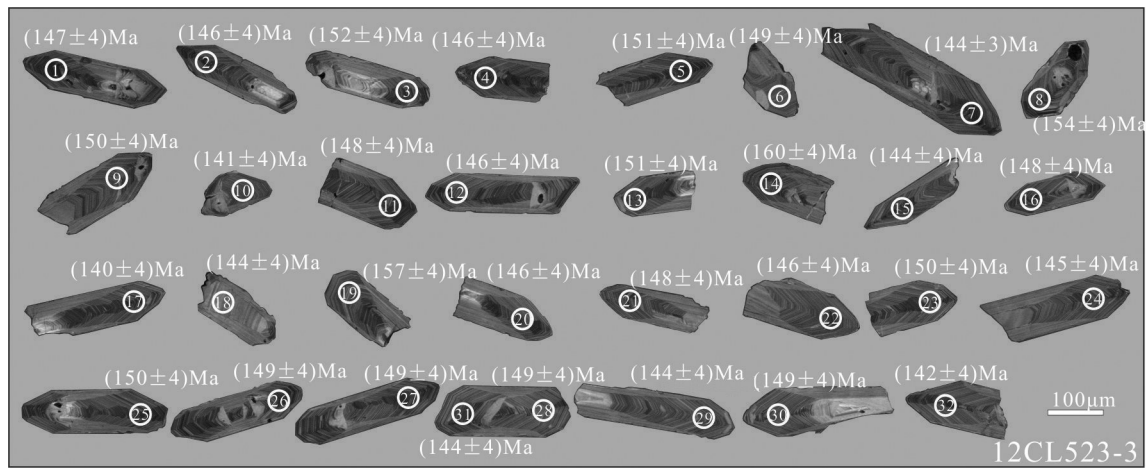


图12 花岗闪长斑岩(12CL523-3)锆石阴极发光图像
 Fig.12 CL image of zircons of granodiorite porphyry (12CL523-3)

样品有轻微蚀变。样品中锆石为自形粒状及柱状,长宽比介于1:1~5:1,阴极发光图像显示部分锆石呈浅灰色(图18),部分呈深灰色至灰黑色,部分锆石包含有老的继承性锆石核。锆石Th、U含量较高,且变化较大,分别为 $53.17 \times 10^{-6} \sim 367.01 \times 10^{-6}$ 和 $63.49 \times 10^{-6} \sim 586.62 \times 10^{-6}$,Th/U比值变化于0.9~1.41,多数接近1,表明为岩浆成因。共分析测点29个,获得的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄变化于(126±4)Ma~(1990±40)Ma,其中4号点年龄为(899±21)Ma,8号点年龄为(242±7)Ma,25号点为(728±17)Ma,29号点为(1990±40)Ma。去除不谐和点后获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(138.0±2.4)Ma(MSWD = 1.3),代表

了花岗闪长岩的结晶年龄(图19)。

4.1.6 石英二长闪长岩

样品13CL543-3取自6线勘探剖面ZK604钻孔,339~340回次,取样孔深995 m。样品中锆石为自形粒状及柱状,长宽比介于1:1~4:1,阴极发光图像显示锆石颜色深浅不一(图20),其中有捕获的老的锆石,也有的锆石包含老的继承性锆石核,部分锆石可见明显环带结构。锆石Th、U含量较高,变化也较大,分别变化于 $36.32 \times 10^{-6} \sim 383.19 \times 10^{-6}$ 和 $51.16 \times 10^{-6} \sim 425.83 \times 10^{-6}$,Th/U比值变化于0.10~1.36,多数接近1,以上特征显示锆石为岩浆成因。共分析测点32个,获得的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄变化于

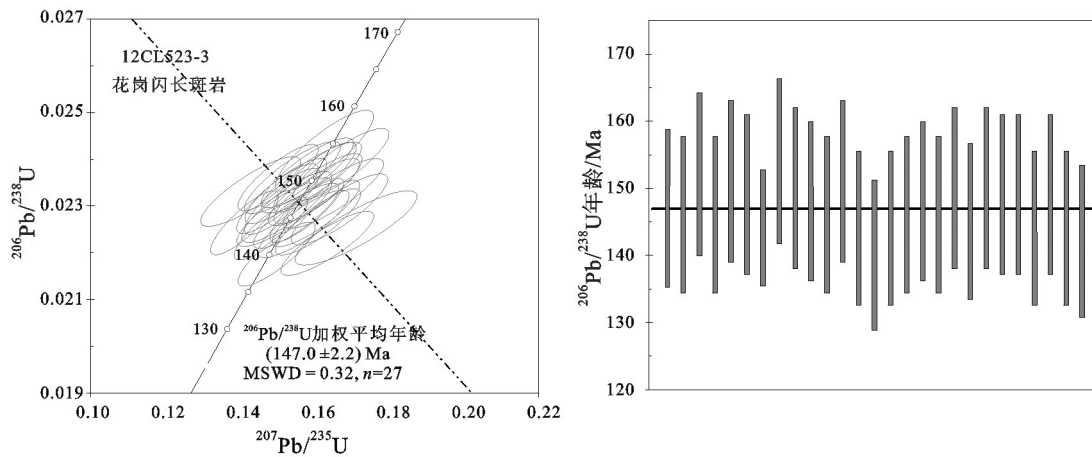


图 13 花岗闪长斑岩(12CL523-3)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
 Fig.13 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of granodiorite porphyry (12CL523-3)

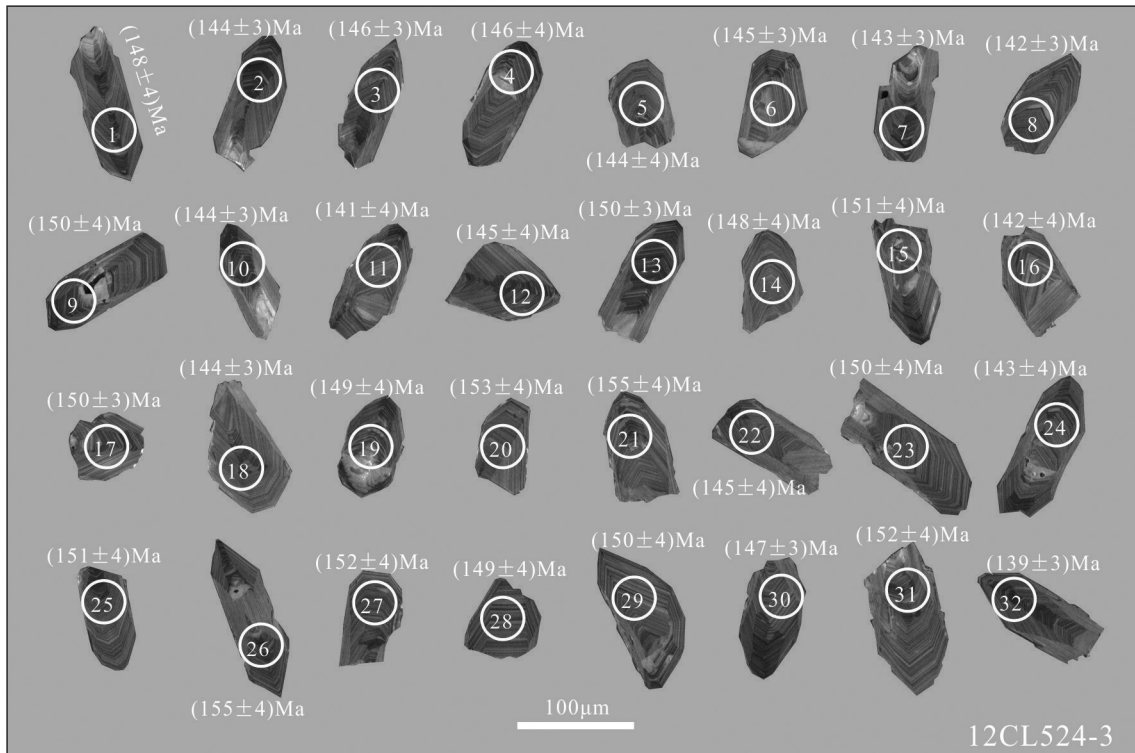


图 14 花岗闪长斑岩(12CL524-3)锆石阴极发光图像
 Fig.14 CL image of zircons of granodiorite porphyry (12CL524-3)

(136±2)Ma~(2601±37)Ma, 其中 15 号点、19 号点、25 号点及 32 号点的年龄分别为 (2601±37) Ma、(2385±33)Ma、(2006±29)Ma 和 (2178±32)Ma, 均为老的锆石年龄。除去 4 颗老的锆石年龄及一些年龄偏差较大的锆石年龄后, 获得 18 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加

权平均值为 (141.0±2.1)Ma (MSWD = 1.4) (图 21)。

5 讨论

铜陵地区是中国较早开展同位素地质年代学研究的地区, 积累了丰富的年代学数据。早年应用 K-

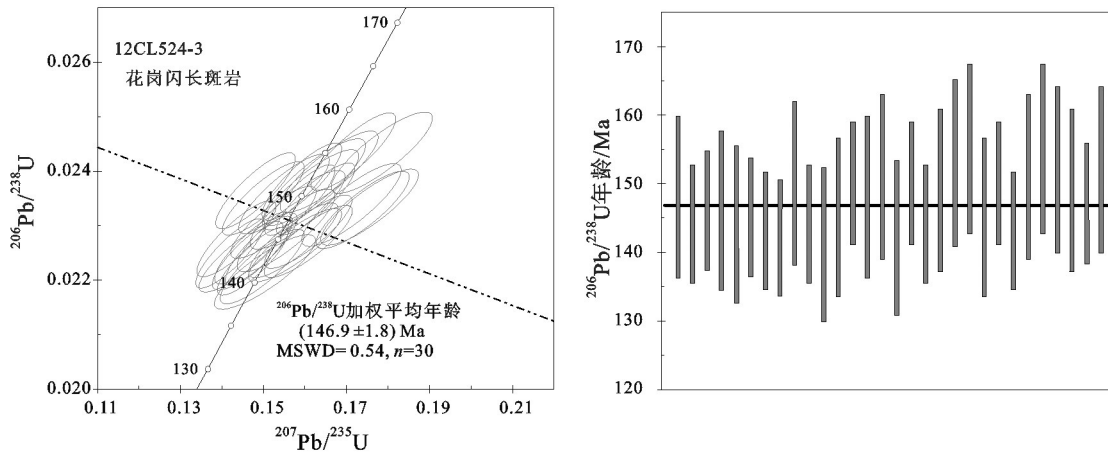


图15 花岗闪长斑岩(12CL524-3)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
 Fig.15 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of granodiorite porphyry (12CL524-3)



图16 长英质细晶岩(12CL525-5)锆石锆石阴极发光图像
 Fig.16 CL image of zircons of felsic aplite (12CL525-5)

Ar、Rb-Sr 和 U-Pb 等定年方法,获得岩浆岩同位素年龄范围为 87.0~185.5 Ma^[35,36],但限于技术的局限,数据的精度较低,而且一些分析结果未列出原始数据及误差范围使得其结果的可靠性难以判断。而后开展的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年方法获得的一些侵入岩体的同位素年龄范围在 135.8~139.8 Ma^[17,37]。近年来高精度 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学方法获得的大量的年代学数据,将侵入岩侵位时

间限定在 132.0~152.0 Ma^[12, 15, 17-18, 20, 27, 37-47](舒家店地区年龄数据见表 2),岩浆活动主要发生于 148.0~137.0 Ma,活动高峰期为 143.0~141.0 Ma^[43],由此铜陵地区的岩浆活动限定于晚侏罗世一早白垩世。在同一个岩体中不同的锆石有不同的年龄,其年龄可以相差 10 Ma 左右^[42]。

5.1 岩浆侵位时代

铜陵地区的花岗闪长斑岩的年龄变化不大。

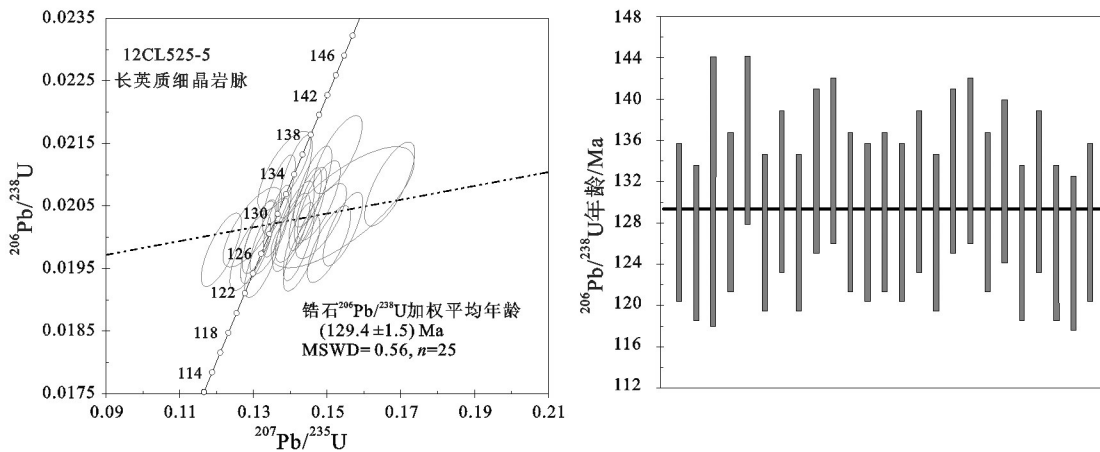


图 17 长英质细晶岩(12CL525-5)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
 Fig.17 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of felsic aplite (12CL525-3)

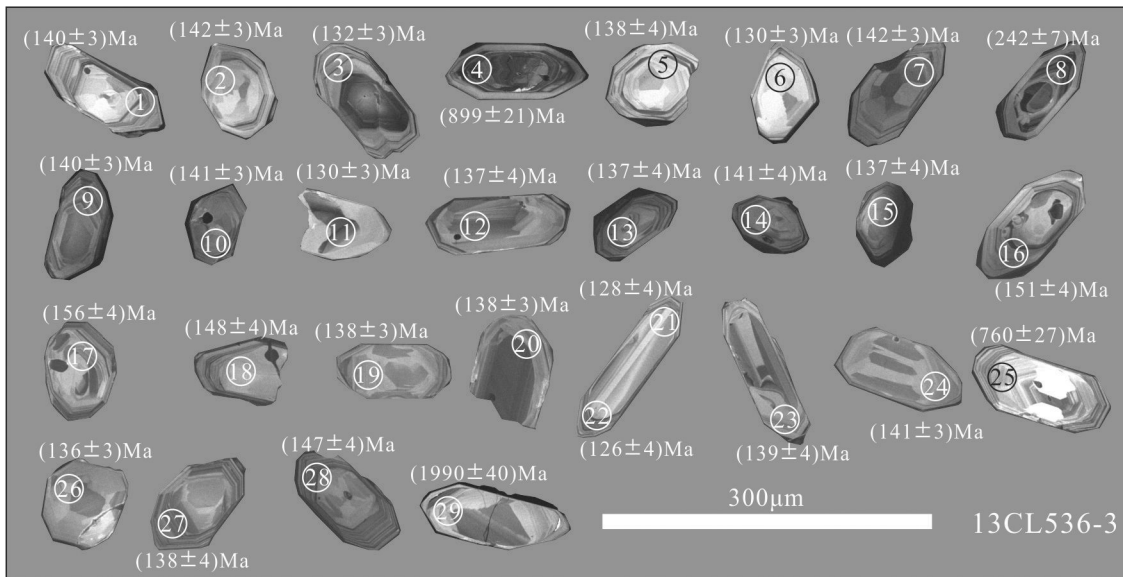


图 18 花岗闪长岩(13CL536-3)锆石锆石阴极发光图像
 Fig.18 CL image of zircons of granodiorite (13CL536-3)

锆石 LA-ICP-MS 测年方法获得的桥头扬花岗闪长斑岩的年龄为约 146.4 Ma, 姚家岭花岗闪长斑岩年龄为 140.7 Ma, 而锆石 SHRIMP 方法获得的瑶山花岗闪长斑岩的年龄为 146.0 Ma^[26]。本文获得的舒家店花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄为 147.2~147.0 Ma, 在误差范围内基本一致, 说明铜陵地区的花岗闪长斑岩的形成时间为 146.0 Ma 左右。

本文获得的舒家店辉石二长闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 144.8 Ma。吴才来等应用黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法获得的舒家店辉石二长闪长

岩年龄为 138.2 Ma^[17], 王世伟等获得的 U-Pb 年龄为 139.2 Ma^[22], 而安徽地矿局 321 地质队应用全岩 K-Ar 法给出了本区辉石闪长岩 102.4 Ma 的年龄^[35] (表 2), 与本文铜陵其他地区的辉石二长闪长岩相差很大, 可能是由于当时的技术条件所限引起。LA-ICP-MS 和 SHRIMP 方法获得的铜陵地区铜官山、白芒山及焦冲的辉石二长闪长岩的年龄在 137.0 ~ 144.8 Ma, 表明存在多次侵位事件^[28,42]。综合看来, 舒家店地区的辉石二长闪长岩的年龄最大相差近 6 Ma, 指示本区的辉石二长闪长岩可能也是多期侵入

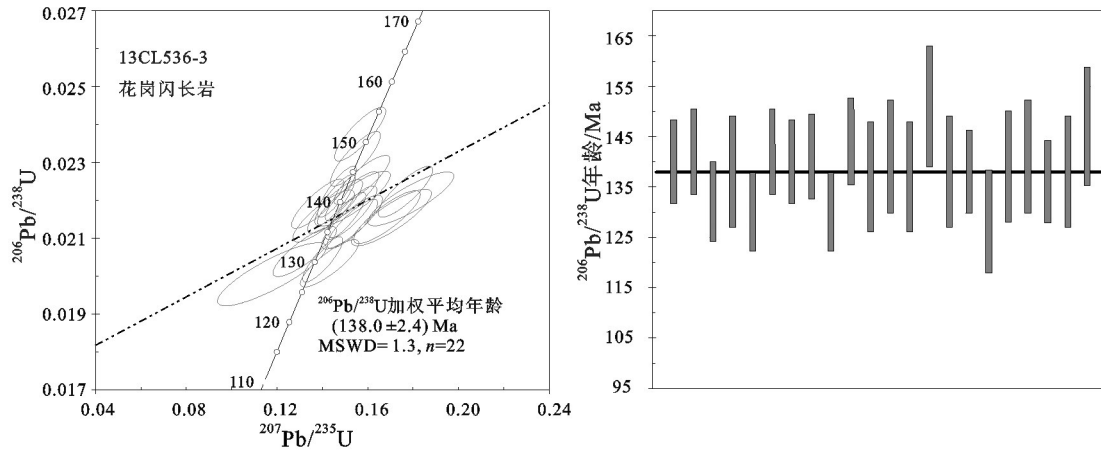


图19 花岗闪长岩(13CL536-3)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
 Fig.19 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of granodiorite (13CL536-3)

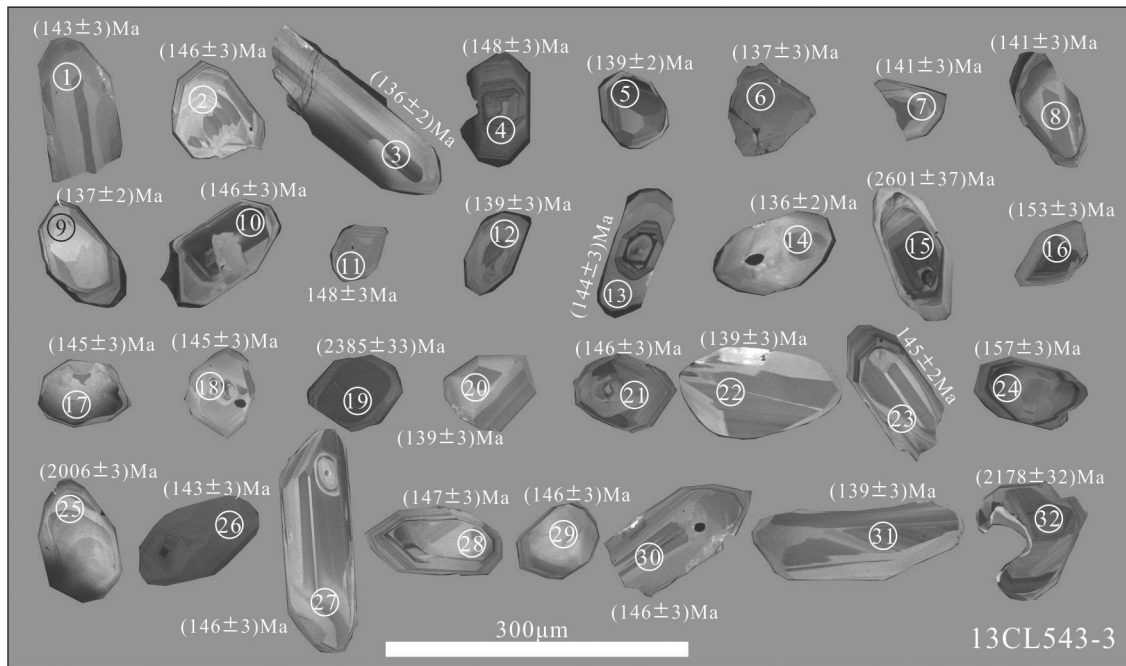


图20 石英二长闪长岩(13CL543-3)锆石锆石阴极发光图像
 Fig. 20 CL image of zircons of quartz monzodiorite (13CL543-3)

的,与整个铜陵地区晚侏罗世一早白垩世岩浆活动背景相对应。

本区石英二长闪长岩的锆石 LA-ICP-MS 年龄为 141.0 Ma。前人获得的铜陵地区铜官山、冬瓜山、西狮子山、大团山、鸡冠石、鸡冠山、凤凰山、焦冲、虎山、天鹅抱蛋山等岩体的石英二长闪长岩 SHRIIMP 及 LA-ICP-MS 法年龄范围在 132.7~143.9 Ma^[15,42-43,46,48-49]。其中,鸡冠石石英二长闪长岩

最年轻,焦冲石英二长闪长岩的 2 个年龄分别为 143.9 Ma 和 143.2 Ma,均较老,两个岩体相差超过 10 Ma,表明铜陵地区石英二长闪长岩也是多期侵位的。对于舒家店石英二长闪长岩,安徽省地矿局 321 地质队曾经获得了 147.0 Ma 的全岩 K-Ar 年龄^[35],与其他研究者及本文获得的结果相差较大,年龄较老,其原因有 2 种可能性,一种是限于当时的技术条件得出的结果误差较大,另一种可能是本区存

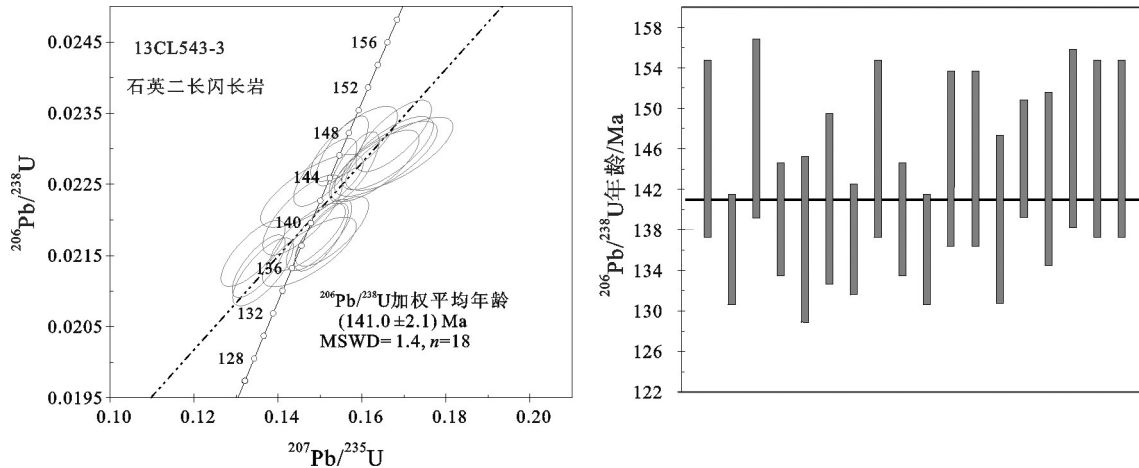


图21 石英二长闪长岩(13CL543-3)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值
Fig. 21 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia curve and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of quartz monzodiorite (13CL543-3)

在更早的石英二长闪长岩侵位活动? 这是有待继续探究的问题。

花岗闪长岩是舒家店岩体的主要岩性之一,在铜陵其他地区也广泛分布。本文获得的舒家店花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 138.0 Ma,对比铜陵地区其他侵入岩体的花岗闪长岩年龄范围 135.5~144.2 Ma^[15,18,39,41,42,46,49,50],本区花岗闪长岩相对年轻。

花岗斑岩和长英质细晶岩为本区的岩脉,本次论文工作也对其进行了定年,获得的两个花岗斑岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 130.5 Ma 和 124.0 Ma,长英质细晶岩样品的为 129.4 Ma。吴才来等对凤凰山岩体开展定年研究工作,获得的花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 132.2 Ma^[9]。因此,作为侵入岩脉,花岗斑岩也经历了至少两次侵位,期间伴有长英质细晶岩脉形成。

从本文对舒家店地区侵入岩岩体开展的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究可以看出,舒家店地区年龄最新的是花岗斑岩,年龄为 124.0 Ma,年龄最老的是花岗闪长斑岩,年龄为 147.0 Ma,因此舒家店地区岩浆活动的时间大致为 147.0~124.0 Ma。

5.2 岩浆活动期次

对于铜陵地区岩浆活动的时序及其演化等问题也有较多的研究,如常印佛等对狮子山矿田研究提出其岩浆岩为逆演化序列^[1]。李进文应用 K-Ar 同位素测年技术对铜陵地区与成矿有关的侵入岩

进行了年代学研究,认为其总体侵位次序为花岗闪长岩→石英二长闪长岩→辉石二长闪长岩^[51]。吴才来等对铜陵狮子山地区的侵入岩开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究,得出区内岩浆侵位顺序为花岗闪长岩→石英二长闪长岩→辉石二长闪长岩^[42];对铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩进行年代学研究给出了铜陵地区岩浆侵位的大致顺序:花岗闪长斑岩/第一次花岗闪长岩→辉长闪长岩/第一次辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩/石英二长闪长岩→第二次花岗闪长岩→第二次辉石二长闪长岩^[43]。徐晓春等通过锆石 SHRIMP 同位素年代学研究认为铜陵地区岩浆侵位次序为花岗闪长岩→辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩^[46]。吴淦国等对铜陵地区 5 个典型中生代侵入岩体进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年工作,给出 151.8~142.8 Ma 的年龄^[45],认为晚侏罗世是铜陵地区岩浆活动的高峰期,并得出岩浆侵位的总体顺序由早至晚为石英二长(斑)岩→二长岩→花岗闪长岩→石英二长闪长岩→辉石二长闪长岩→辉长辉绿岩。

通过本文 U-Pb 同位素年代学研究及结合前人获得的定年资料,舒家店地区花岗闪长斑岩岩浆的活动时间为 147.0~146.9 Ma,辉石二长闪长岩岩浆活动时间为 144.8~138.2 Ma,石英二长闪长岩岩浆活动时间为约 141.0 Ma,花岗闪长岩活动时间为约 138.0 Ma,花岗斑岩脉侵入时间为 130.5~124.0 Ma,长英质岩脉侵入时间为约 129.4 Ma。因此,就舒家店地区来看,本区侵入岩活动的顺序为:花岗闪长

斑岩→辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩→花岗闪长岩→花岗斑岩脉/长英质岩脉。

本文得出的舒家店地区侵入岩活动顺序与吴才来等^[42]对整个铜陵地区研究得出的顺序相近,其中本文的花岗闪长岩相当于吴才来等得出的侵入岩活动次序的第二次花岗闪长岩。同时还可看到,前人对铜陵地区侵入岩侵入顺序的判断均有所不同,是前人就铜陵地区不同位置的岩体研究得出的不同的结论,这正反映了铜陵地区复杂的岩浆活动,其深层原因为地壳深部频繁的热活动,在岩浆活动方式上表现为脉动式侵位。

6 结 论

(1)舒家店地区中酸性侵入岩可化分为两个系列:高钾钙碱性系列和橄辉安粗岩系列。

(2)对舒家店地区中酸性侵入岩(脉)进行了LA-ICP-MS 锆石U-Pb年代学研究,各岩性样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U平均年龄分别为:花岗闪长斑岩147.0~146.9 Ma,辉石二长闪长岩144.8 Ma,石英二长闪长岩141.0 Ma,花岗闪长岩138.0 Ma,花岗斑岩130.5 Ma、124.0 Ma,长英质细晶岩129.4 Ma。

(3)根据文中定年数据,结合铜陵地区相关侵入岩定年资料,给出了舒家店地区侵入岩侵位次序:花岗闪长斑岩→辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩→花岗闪长岩→花岗斑岩脉/长英质岩脉,与前人获得的铜陵其他地区侵入岩侵位次序有差异,反映了铜陵地区晚侏罗世一早白垩世岩浆活动的复杂性和多期性。

致谢:本文工作得到了华东冶金地质勘查研究院曹晓生教授级高工的帮助和支持;审稿人和编辑对本文初稿提出了建设性的意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. The Iron-copper ore-forming Belt of Middle-Lower Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991 (in Chinese).
- [2] Wu Cailai, Wang Fusheng. Geochronology of intermediate-acid intrusion from Tongling, Anhui [J]. Continental Dynamics. 2000, 5 (1): 15-23.
- [3] Wu Cailai, Chen Songyong, Hao Meiyong, et al. The origin and

features of the two intermediate-acid intrusive series in Tongling area, Anhui, China [J]. Continental Dynamics. 2001, 6(1): 1-12.

- [4] 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[J]. 地球学报, 2003, (1): 41-48.
Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendeng, et al. Origin and Features of the Mesozoic intermediate-acid intrusive in the Tongling Area, Anhui, China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, (1):41-48 (in Chinese with English abstract).
- [5] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 712-730
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the middle and lower Yangtze Metallogenic Belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 712-730 (in Chinese with English abstract).
- [6] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-235.
Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, et al. Fe-Cu (Au) Metallogeny of the Middle-Lower Changjiang Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-235 (in Chinese).
- [7] 周珣若, 吴才来, 黄许陈, 等. 铜陵中酸性侵入岩同源包体特征及岩浆动力学[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12 (1): 20-31.
Zhou Xunruo, Wu Cailai, Huang Xuchen, et al. Characteristics of cognate inclusions in intermediate-acid intrusive rocks of Tongling area and their magmatic dynamics [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1993, 12(1): 20-31 (in Chinese with English abstract).
- [8] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩锆石群结晶特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(3): 239-247.
Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. Crystallization characteristics and genesis of the zircon group in intermediate-acid intrusive rocks of Tongling area [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1994, 13(3): 239-247 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩的包体岩石学研究[J]. 地球学报, 1997, 18 (2): 71-80.
Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. Enclave petrology of intermediate-acid intrusive rocks in Tongling district, Anhui [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18(2): 71-80 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邢凤鸣. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的碱质来源[J]. 安徽地质, 1996, 6(1): 15-18.
Xing Fengming. Alkaline source of mesozoic magmatic rocks along the reaches of the Yangtze River in Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 1996, 6(1): 15-18 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李文达, 毛建仁, 朱云鹤. 中国东南部中生代火成岩与矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1991: 1-159.
Li Wenda, Mao Jianren, Zhu Yunhe. Mesozoic Igneous rocks and Mineral Deposits of Southeast China [M]. Beijing: Seismological

- Press, 1991: 1–159 (in Chinese).
- [12] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, 33(04): 323–334.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling Area, Anhui Province, China and constraint to Geodynamics process [J]. Science in China (Series D), 2003, 46(8): 801–815 (in Chinese).
- [13] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿—地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 325–338.
- Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, et al. The Geochemical Characteristics of Mesozoic intermediate–acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis–geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 325–338 (in Chinese with English abstract).
- [14] 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 297–314.
- Wang Yang, Deng Jinfu, Ji Guangyi. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite–like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper–gold mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 297–314 (in Chinese with English abstract).
- [15] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 铜陵地区中生代侵入岩LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年代学及 Cu–Au 成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1782–1800.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, et al. Zircon U–Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implication for copper–gold mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1782–1800 (in Chinese with English abstract).
- [16] 瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 等. 安徽铜陵凤凰山燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其与金属成矿关系[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 311–323.
- Qu Hongying, Pei Rongfu, Li Jinwen, et al. Geochemical characteristics of the Fenghuangshan Yanshanian intermediate–acid intrusive rocks in Tongling, Anhui Province, and their relationship with the metallogenic process[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 311–323 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 12–19.
- Wu Cailai, Zhun Xunruo, Huang Xuchen, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of intrusive rocks from Tongling [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(4): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵地区铜官山矿田侵入岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1746–1758.
- Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, et al. Zircon SHRIMP dating of intrusive rocks from the Tongguanshan ore–field in Tongling, Anhui, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1746–1758 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2630–2652.
- Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, et al. Petrogenesis of the intermediate–acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling, Anhui, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2630–2652 (in Chinese with English abstract).
- [20] 赖小东, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 舒家店侵入岩地球化学特征及成矿意义[J]. 矿床地质, 2010, (S1): 203–204.
- Lai Xiaodong, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, et al. Geochemical characteristics of Shujiadian intrusive rocks and its significance to metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 2010, (S1): 203–204 (in Chinese).
- [21] 赖小东, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 铜陵舒家店岩体年代学、岩石地球化学特征及成矿意义[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 470–485.
- Lai Xiaodong, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, et al. Chronological–geochemical characteristics of the Shujiadian intrusion, Tongling ore cluster field: Its significance to metallogenesis [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 470–485 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王世伟, 周涛发, 袁峰, 等. 铜陵舒家店岩体的年代学和地球化学特征研究[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 849–861.
- Wang Shiwei, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Geochronology and geochemical characteristics of the Shujiadian intrusion in Tongling, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 849–861 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王世伟, 周涛发, 袁峰, 等. 铜陵舒家店斑岩铜矿成矿年代学研究及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3171–3180.
- Wang Shiwei, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Re–Os and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Shujiadian copper deposit in Tongling, China: Implications for regional metallogenesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(10): 3170–3180 (in Chinese with English abstract).
- [24] 段留安, 杨晓勇, 刘晓明, 等. 铜陵舒家店地区志留纪地层中金矿的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(2): 333–339.
- Duan Liuan, Yang Xiaoyong, Liu Xiaoming, et al. Discovery of gold deposit in the Silurian System in Shujiadian, Tongling ore cluster region and its significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(2): 333–339 (in Chinese with English abstract).
- [25] 吕玉琢, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽铜陵矿集区舒家店矿床辉钼矿 Re–Os 同位素年龄[J]. 矿物学报, 2011, (增刊): 621–622.
- Lv Yuzhuo, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. Molybdenite Re–Os isotopic age of Shujiadian mineral deposit in Tongling mineral cluster region, Anhui [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (Supp): 621–622 (in Chinese).

- [26] 王彪. 舒家店铜矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2010, 33(6): 906-910.
Wang Biao. Geological and geochemical characters of Shujiadian copper deposit and genesis analysis [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33(6): 906-910 (in Chinese with English abstract).
- [27] 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 等. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(S): 532-535.
Zeng Pusheng, Pei Rongfu, Hou Zengqian, et al. SEDEX-type massive sulfide deposits in Tongling Block, Anhui, China [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S): 532-535 (in Chinese).
- [28] 吴才来, 董树文, 郭祥炎. 中国铜陵中酸性侵入岩[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-219.
Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Xiangyan. Intermediate-acid Intrusive Rocks from Tongling, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-219 (in Chinese).
- [29] Rick wood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. Lithos, 1989, 22: 247-263.
- [30] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点[J]. 安徽地质, 1995, 11 (4): 409-422.
Xing Fengming, Xu Xiang. Basic characteristics of the Mesozoic magmatic rocks along the Yangtze River, Anhui [J]. Geology of Anhui, 1995, 11(4):409-422 (in Chinese with English abstract).
- [31] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345
- [32] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2):59-79.
- [33] Ludwig K R. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA, 2003.
- [34] Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology. 1998, 132 (3): 288-299.
- [35] 安徽省地矿局 321 地质队. 铜陵地区铜金等矿床综合预测报告[R]. 1990.
The 321 Team of Anhui Bureau of Geology and Mineral Deposits. Comprehensive Predictive Report of Cu-Ag. deposits in Tongling Area [R]. 1990 (in Chinese).
- [36] 储国正. 铜陵狮子山矿田构造及其控岩控矿作用的研究[J]. 安徽地质, 1992, 2(2): 1-14.
Chu Guozheng. Shizishan orefield tectonics and the characteristics of its control over rocks and ores [J]. Geology of Anhui, 1992, 2(2): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [37] 周泰禧, 李学明, 赵俊深, 等. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄[J]. 中国科学技术大学学报, 1987, 17 (3): 117-121.
Zhou Taixi, Li Xueming, Zhao Junshen, et al. Geochronology of igneous rocks from the Tongguanshan ore area of Anhui Province [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1987, 17(3): 117-121 (in Chinese).
- [38] 徐夕生, 范钦成, S Y O Reilly, 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[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1883-1891.
Xu Xisheng, Fan Qincheng, S Y O' Reilly, et al. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18): 1883-1891 (in Chinese).
- [39] 张达, 吴淦国, 狄永军, 等. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(6): 823-829.
Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, et al. Emplacement dynamics of Fenghuangshan Pluton (Tongling, Anhui Province): Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 823-829 (in Chinese with English abstract).
- [40] 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 等. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 71-77.
Du Yangsong, Li Shunting, Cao Yi, et al. UAFC-Related origin of the late Jurassic to early Cretaceous intrusions in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui Province, East China [J]. Geoscience, 2007, 21(1): 71-77 (in Chinese with English abstract).
- [41] 杨小男, 徐兆文, 张军, 等. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1543-1551.
Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Zhang Jun, et al. Geochronology and origin of Nanhongchong pluton in Shizishan ore-field, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1543-1551 (in Chinese with English abstract).
- [42] 吴才来, 董树文, 国和平, 等. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 2008, 24 (8): 1801-1812.
Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Heping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks from Shizishan, Tongling and the deep processes of magmatism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1801-1812 (in Chinese with English abstract).
- [43] 吴才来, 郭祥焱, 王次松, 等. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球化学, 2013, 42(1): 11-28.
Wu Cailai, Guo Xiangyan, Wang Cisong, et al. Zircon U-Pb

- dating of high-K calc-alkaline intrusive rocks from Tongling: Implications for the tectonic setting[J]. *Geochimica*, 2013, 42(1): 11–28 (in Chinese with English abstract).
- [44] 吴才来, 董树文, 王次松, 等. 铜陵地区晚古生代岩浆活动的发现: 来自凤凰山岩体 ZK66 钻孔岩心辉绿岩锆石 U-Pb 定年的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 715–729.
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Wang Cisong, et al. The discovery of late Paleozoic magmatism in Tongling area: Evidence from zircon U-Pb dating of diabase in Fenghuangshan ZK 66 drilling core [J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 715–729 (in Chinese with English abstract).
- [45] 吴淦国, 张达, 狄永军, 等. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2008, 38(5): 630–645.
- Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusives in the Tongling metallogenic cluster and its dynamic setting [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008, 38(5): 630–645 (in Chinese).
- [46] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 500–509.
- Xu Xiaochun, Lu Sanming, Xie Qiaoqin, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating for the magmatic rocks in Shizishan ore-field of Tongling, Anhui Province, and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 500–509 (in Chinese with English abstract).
- [47] 徐晓春, 楼金伟, 梁建峰, 等. 安徽铜陵矿集区矿床勘查与地质研究新进展[J]. *安徽地质*, 2011, 21(2): 119–130.
- Xu Xiaochun, Lou Jinwei, Liang Jianfeng, et al. Latest progress in ore deposit exploration and geological research in the Tongling ore concentration area, Anhui [J]. *Geology of Anhui*, 2011, 21(2): 119–130 (in Chinese with English abstract).
- [48] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. *中国地质*, 2004, 31(2): 169–173.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui [J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 169–173 (in Chinese with English abstract).
- [49] 瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 等. 安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(3): 581–590.
- Qu Hongying, Pei Rongfu, Li Jinwen, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Fenghuangshan quartz monzodiorite and granodiorite in Tongling area, Anhui Province and its geological implication [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(3): 581–590 (in Chinese with English abstract).
- [50] 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[J]. *地球化学*, 2006, 35(4): 359–366.
- Lou Yaer, Du Yangsong. Characteristics and zircon SHRIMP U-Pb ages of Mesozoic intrusive rocks in Fanchang, Anhui Province [J]. *Geochimica*, 2006, 35(4): 359–366 (in Chinese with English abstract).
- [51] 李进文. 铜陵矿集区矿田构造控矿与成矿化学动力学研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2004: 1–142.
- Li Jinwen. Ore-controlling Structure of Orefield and Ore-forming Chemical Kinetics of Mineral Assemblage Area in Tongling [D]. Doctoral Dissertation, Chinese Academy of Geological Sciences, 2004: 1–142 (in Chinese with English abstract).