

# 江西九瑞矿集区东雷湾矿区中酸性侵入岩及其铁镁质包体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约

杨堂礼<sup>1</sup>, 蒋少涌<sup>1,2\*</sup>

1.南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093

2.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 九瑞矿集区成矿与燕山期中酸性侵入岩体关系密切, 但对该区东雷湾矿床的地质地球化学研究还相对较少。对东雷湾矿区中酸性侵入岩(花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩)及其铁镁质包体进行了系统的锆石 U-Pb 年代学、矿物化学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素研究, 探讨其岩石成因。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年表明: 东雷湾中酸性侵入岩的成岩年龄为 144.3~148.7 Ma, 铁镁质包体的年龄为 146.4~147.1 Ma, 与寄主侵入岩花岗闪长斑岩的年龄一致。东雷湾侵入岩属准铝质范围, 岩石的  $Mg^{\#}$  较高(42.5~68.0, 平均 56.0), 并具有较高的相容元素含量, 富集轻稀土, Eu 异常不明显, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素。暗色铁镁质包体呈细粒结构, 常见针状磷灰石和钾长石斑晶。东雷湾样品的 Sr-Nd 同位素组成变化范围较小, 初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值位于 0.7064~0.7079,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化于 -5.80~-3.31,  $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$  为 1.2~1.4 Ga, 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -15.9~-3.6。样品的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$  值分别变化于 17.3333~18.2600、15.5135~15.6210、37.4041~38.3954 之间。详尽的元素和同位素地球化学特征表明, 东雷湾铁镁质包体是由拆沉的加厚下地壳发生部分熔融, 并在其上升过程中与地幔物质发生相互作用, 进而与花岗质岩浆混合过冷结晶形成的。该区侵入岩的形成很可能是因为加厚下地壳拆沉入软流圈地幔后发生部分熔融, 熔体与地幔橄榄岩相互作用后在上侵的过程分别形成了铁镁质岩石和花岗质岩石。

**关键词:** 中酸性侵入岩; 铁镁质包体; 岩石成因; 年代学; 地球化学; 东雷湾; 九瑞矿集区。

中图分类号: P581; P597

文章编号: 1000-2383(2015)12-2002-19

收稿日期: 2015-10-10

## Petrogenesis of Intermediate-Felsic Intrusive Rocks and Mafic Microgranular Enclaves (MMEs) from Dongleiwan Deposit in Jiurui Ore District, Jiangxi Province: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes

Yang Tangli<sup>1</sup>, Jiang Shaoyong<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The intermediate-felsic intrusive rocks show a close relationship with mineralization in the Jiurui ore district, however, the studies of these rocks in the Dongleiwan deposit are relatively rare. In this study, we present a detailed study on zircon geochronology, mineral chemistry, whole rock geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of both the intermediate-felsic intrusive rocks and their mafic microgranular enclaves (MMEs). LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields crystallization ages of 144.3~148.7 Ma for the felsic rocks and 146.4~147.1 Ma for the MMEs, indicating they are coeval. All the intrusive rocks

基金项目: 科技部“973”项目(No.2012CB416706); “十二五”国家科技支撑计划(No.2011BAB04B03)。

作者简介: 杨堂礼(1989—), 男, 硕士研究生, 矿床学专业。E-mail: yang-lee@163.com

\* 通讯作者: 蒋少涌, E-mail: shyjiang@nju.edu.cn; shyjiang@cug.edu.cn

引用格式: 杨堂礼, 蒋少涌, 2015. 江西九瑞矿集区东雷湾矿区中酸性侵入岩及其铁镁质包体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 2002~2020.

from the Dongleiwan deposit are metaluminous with high Mg<sup>#</sup> (42.5–68.0, with an average of 56.0) and high contents of compatible elements such as V, Cr, Co and Ni. The REE characteristics are LREE enriched and lack any significant Eu anomaly. The trace elements are characterized by enrichment of LILE and depletion of HFSE. The MMEs are characterized by microgranular texture, and contain acicular apatites and K-feldspar phenocrysts. The Dongleiwan rock samples have a narrow Sr-Nd isotopic ratio range with initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios from 0.706 4 to 0.707 9,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values from -5.80 to -3.31, and  $t_{\text{2DM}}(\text{Nd})$  values from 1.2 to 1.4 Ga. The samples show radiogenic Pb isotopic ratios with values of  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (17.333 3–18.260 0),  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (15.513 5–15.621 0) and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (37.404 1–38.395 4). The zircon Hf isotope analysis shows  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of -15.9 to -3.6. These data suggest that the MMEs were probably produced by mixing of mafic and felsic magmas, and the mafic magma was derived from partial melting of delaminated lower crust and may have reacted with surrounded mantle peridotites during its ascent. While the felsic intrusive rocks of this area have been formed by the upwelling of magma which have experienced strong crust-mantle interaction after the delamination of lower crust into the asthenosphere.

**Key words:** intermediate-felsic rock; mafic microgranular enclaves (MMEs); petrogenesis; geochronology; geochemistry; Dongleiwan; Jiurui ore district.

## 0 引言

长江中下游地区是我国重要的铁铜金多金属成矿带,与燕山期中酸性侵入岩有关的斑岩、矽卡岩矿床是区内最主要的矿化类型(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;曾键年等,2013),在该地区已发现超大型矿产地十余处、大型矿产地近60处,形成了鄂东南、九瑞、安庆—贵池、铜陵、庐枞、宁芜、宁镇等大中型矿床群集的矿集区(图1)。九瑞矿集区为七大矿集区中位于最南的一个,包括江西省西北部的九江市、

瑞昌市及各自周边辖区,该区金属资源以铜为主,矿床类型包括斑岩型、矽卡岩型以及块状硫化物型3种。近年来,随着国家深部找矿战略及整装勘查等工作的部署和展开,在九瑞的许多成矿远景区(如金鸡窝、武山外围、宝山等地)已经取得了找矿的显著进展,该区显示出非常大的深部成矿远景。

九瑞矿集区成矿与燕山期中酸性侵入岩体关系密切,但前人对这些侵入岩的地质地球化学研究还远不如铜陵矿集区的研究程度,对九瑞矿集区东南部的武山铜矿和城门山铜矿的研究成果较多(吴良

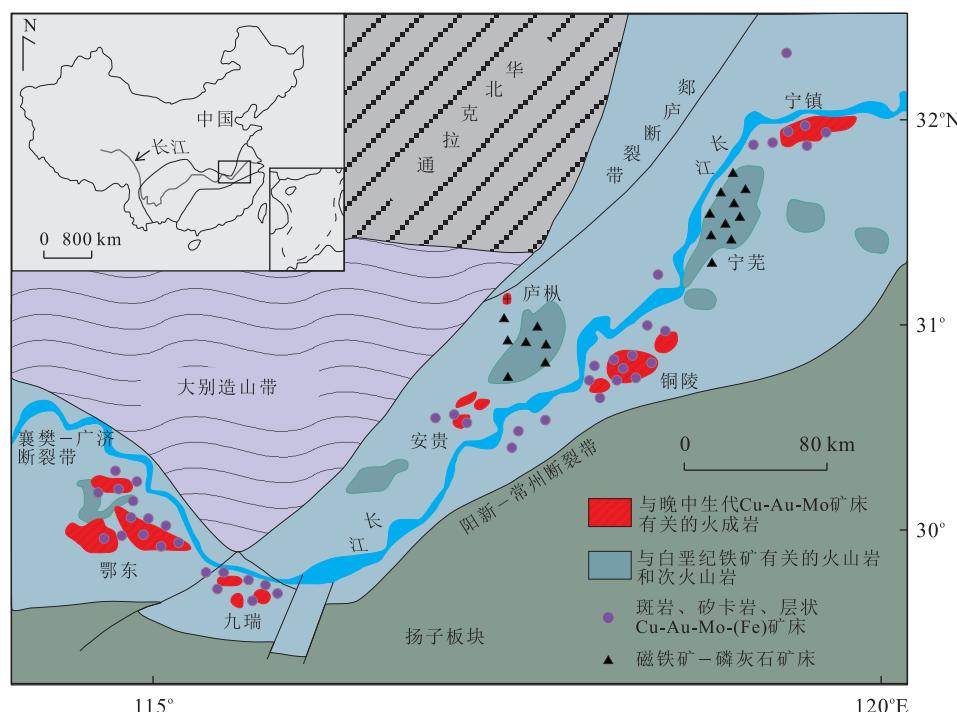


图 1 长江中下游成矿带的 7 个矿集区

Fig.1 Schematic illustration of the seven ore districts of the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt  
据 Yang et al.(2011)、Mao et al.(2011)和 Pan and Dong(1999)修改

士和邹晓秋,1997;丁昕等,2006;Ding *et al.*, 2006;李进文等,2007;蒋少涌等,2008;孔凡斌等,2012;文春华等,2012).东雷湾矿区是赣西北地质大队于 20 世纪 60 年代在九瑞矿集区西北部发现的一处矽卡岩型 Cu-Mo-Au 矿床,近几年来在该矿区的深部和外围发现了新的工业矿体及较好的深部找矿前景,但对该矿床的地质地球化学研究还相对较少.作者在东雷湾花岗闪长斑岩中发现了暗色铁镁质包体,其形成年龄、物源以及与寄主岩体的关系还未见研究报道.本文以东雷湾中酸性侵入岩和同期铁镁质包体为研究对象,通过系统的锆石 U-Pb 定年、矿物电子探针成分分析、岩石主微量元素和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学研究,来探讨该区的岩石成因及其地质意义.

## 1 地质背景

九瑞矿集区位于扬子板块北缘、下扬子断裂凹陷带西段,该地区北西西向的基底断裂为一级控岩控矿构造,沿该断裂由北西至南东依次出露有邓家山、东雷湾、宝山、武山、丁家山、城门山等岩株(图 2),该区发育褶皱构造,见多个轴向近平行交替出现的背斜、向斜的复式褶皱,总体呈现向南东弯曲的弧

形复式褶皱带(图 2).区内主要的侵入岩有花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩,也见少量石英斑岩、花岗细晶岩和煌斑岩脉,通常呈岩枝、小岩株状侵入到泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系地层中,形成斑岩或矽卡岩型矿床.岩株状侵入岩基本位于北西西向基底断裂上,而其他脉状岩体则多沿地层间不整合面及层内薄弱面贯入式侵位,与组成复式褶皱带的地层走向方向一致.前人的研究将九瑞矿集区内的构造—岩浆—成矿划分为 5 个亚带,自北西向南东为:东雷湾—通江岭成矿亚带、丫头山—宝山—夫山成矿亚带、宋家湾—武山成矿亚带、大浪—洋鸡山—丁家山成矿亚带和长山—城门山成矿亚带(刘迅,1990;瞿裕生等,1992,1999).

东雷湾矿区位于东雷湾—通江岭构造—岩浆—成矿亚带.该区岩浆岩主要为东雷湾岩体,岩体形态呈浑圆状岩株,岩性以花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩为主,见少许辉绿玢岩和花岗细晶岩脉,局部有零星的铁镁质包体.花岗闪长斑岩呈岩枝状侵入到三叠系—石炭系灰岩、灰质白云岩中,在接触部位发生矽卡岩化及大理岩化.矽卡岩矿物主要有石榴子石、透辉石、硅灰石、透闪石等,矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿及少量白钨矿.

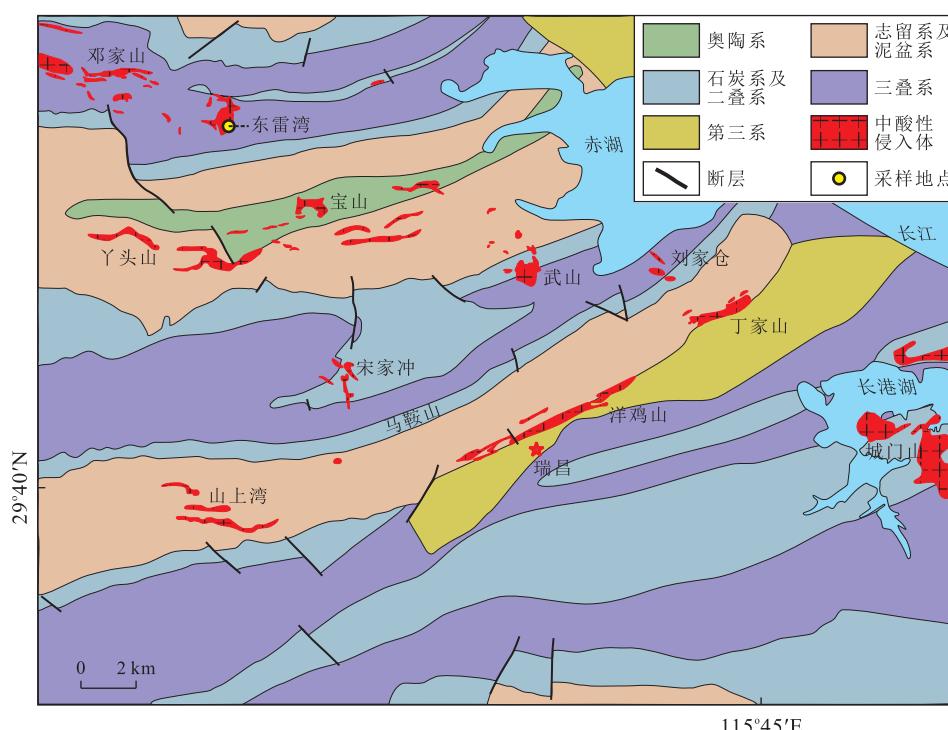


图 2 九瑞矿集区地质简图及采样地点

Fig.2 Jiurui district and sample location

## 2 样品与分析方法

### 2.1 采样与岩石学特征

笔者分析了采自东雷湾矿区的共计 16 个样品,其中 9 个采自岩心 ZK1-1,6 个采自井下开采上来的矿石堆,1 个采自野外露头(表 1)。采样时,尽量采集较新鲜的岩石,但部分样品仍可见轻微的蚀变作用,如绿泥石化等。花岗闪长斑岩呈斑状结构和块状构造,造岩矿物主要为斜长石(40%~45%)、钾长石(15%~20%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~10%)和角闪石(2%~5%)及少量副矿物(磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石等)(<1%)(图 3)。石英闪长玢岩为细粒斑状结构,斑晶主要为斜长石、黑云母和角闪石,斜长石常具环带结构,基质由斜长石(35%~40%)、钾长石(22%~25%)、石英(15%~18%)、黑云母(5%~8%)、角闪石(4%~6%)组成(图 3)。样品 DLW-16 和 DLW-17 为花岗闪长斑岩中的铁镁质包体,直径为 10~15 cm(图 3),主要造岩矿物类型与围岩一致,但铁镁矿物含量更高(黑云母~15%,角闪石~10%),并发育针状磷灰石(图 3f)。样

品 DLW-22 为采自山路边的花岗闪长斑岩的风化产物。

### 2.2 锆石 U-Pb 定年

笔者挑选了 7 个样品将其磨成 60 目,按常规的重力和磁选方法分选出锆石,然后在双目镜下将晶型好的锆石颗粒挑选出来,并依照宋彪等(2002)的方法制靶。对锆石靶进行阴极发光 CL 图像拍摄以观察锆石内部结构,从而在进行 LA-ICP-MS 定年时选择合适的点位。LA-ICP-MS 分析所用仪器为 New Wave UP213 激光剥蚀系统及 Agilent 7500a 型 ICP-MS。激光剥蚀直径为 21  $\mu\text{m}$ ,使用锆石标样 91500 进行内部元素分馏的校正,并用 Glitter(4.0) 软件分析同位素数据。普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法, U-Pb 年龄协和图使用 Isoplot (3.23)(Ludwig, 2003) 绘制。

### 2.3 锆石原位 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素分析所用仪器为 Neptune MC-ICP-MS 及与之相连的 New Wave UP193 激光剥蚀探针。在进行  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值计算时, $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数采用  $1.867 \times 10^{-11}$ ,并采用 Bouvier *et al.* (2008) 推荐

表 1 东雷湾侵入岩采样地点、岩石类型、锆石定年结果及锆石 Hf 同位素总结

Table 1 Summary of the sample localities, rock types, zircon U-Pb dating results and zircon Hf isotopic composition for the Dongleiwan intrusive rocks

样品号	岩石类型	采样地点	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	Th/U	年龄(Ma)	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
DLW-01	花岗闪长斑岩	岩心						
DLW-02	花岗闪长斑岩	岩心						
DLW-03	花岗闪长斑岩	岩心	167~491 ave=286	230~433 ave=335	0.71~1.15 ave=0.84	148.7±1.8	-7.9~-4.0 ave=-5.8	1 419~1 667 ave=1 535
DLW-04	花岗闪长斑岩	岩心						
DLW-05	石英闪长玢岩	岩心						
DLW-06	石英闪长玢岩	岩心						
DLW-07	石英闪长玢岩	岩心						
DLW-08	石英闪长玢岩	岩心						
DLW-09	石英闪长玢岩	岩心	113~760 ave=300	226~787 ave=392	0.41~1.18 ave=0.74	145.5±1.1	-15.9~-4.1 ave=-6.7	1 427~2 168 ave=1 590
DLW-12	花岗闪长斑岩	矿石堆						
DLW-13	花岗闪长斑岩	矿石堆						
DLW-14	花岗闪长斑岩	矿石堆						
DLW-15	花岗闪长斑岩	矿石堆	147~378 ave=261	221~418 ave=317	0.60~0.98 ave=0.81	146.5±1.7	-9.8~-3.6 ave=-6.4	1 401~1 786 ave=1 569
DLW-16	铁镁质包体	矿石堆						
DLW-17	铁镁质包体	矿石堆	190~380 ave=269	253~378 ave=321	0.67~1.09 ave=0.84	146.4±1.8	-10.2~-4.3 ave=-6.9	1 447~1 805 ave=1 600
DLW-22	花岗闪长斑岩 风化物	山路边 露头	149~1 342 ave=153	210~693 ave=325	0.65~1.94 ave=0.47	147.1±1.3	-8.4~-4.5 ave=-5.8 ave=-8.0	1 452~1 702 ave=1 533 ave=1 668

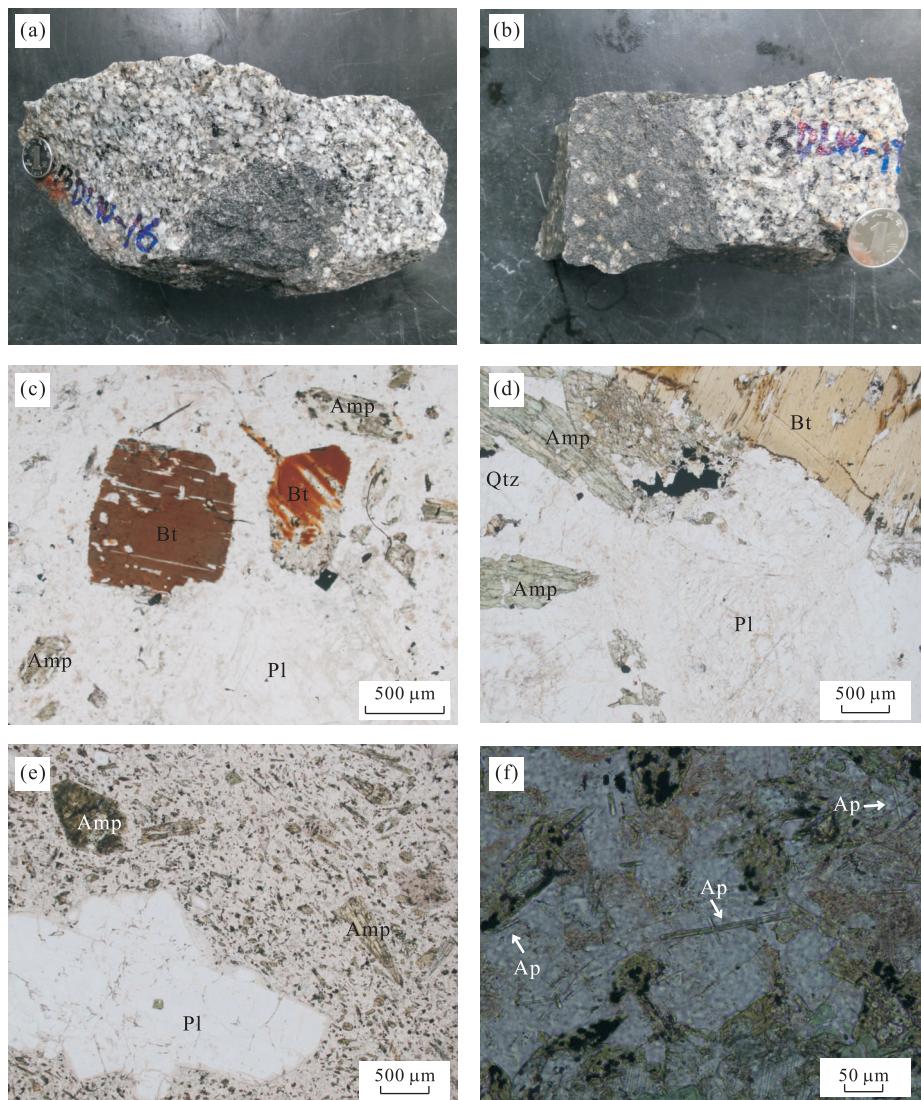


图 3 东雷湾矿区铁镁质包体照片及岩石薄片照片

Fig.3 Photos of mafic enclaves and microphotographs of polished thin sections of the Dongleiwan intrusive rocks  
a,b. 铁镁质包体照片;c,d.花岗闪长斑岩薄片照片,单偏光;e.石英闪长玢岩薄片照片,单偏光;f.铁镁质包体薄片照片中的针状磷灰石,单偏光.矿物缩写:Pl.斜长石;Amp.角闪石;Bt.黑云母;Qtz.石英;Ap.磷灰石

的球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 785)及 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.033 6),Hf模式年龄计算时采用当前亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.283 25)和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.038 4)(Griffin *et al.*, 2000),采用的地壳参数为 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.015)及 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.015)(Griffin *et al.*, 2002).

#### 2.4 矿物化学

笔者挑选出一些有代表性的长石、角闪石和黑云母进行矿物化学成分分析,所用仪器为 JEOL JXA-8100 型电子探针,激光束直径为 1  $\mu\text{m}$ ,加速电压为 15 kV,电流强度为 10 nA.

#### 2.5 全岩主量及微量元素

将样品粉碎至 200 目用于全岩化学成分分析.主

量元素采用熔片法使用 Thermo Scientific ARL Series XRF 测定,精度优于 5%.微量元素使用 Finnigan Element II 型 HR-ICP-MS 测定,分析流程与高剑峰等(2003)类似.将 50 mg 样品粉末用 HF 和 HNO<sub>3</sub> 混合酸溶于 Teflon 罐中,加入 Rh 作为内标以监测 ICP-MS 测定过程中的信号漂移.测定精度优于 10%.

#### 2.6 全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析

对 Sr-Nd 同位素分析,将 50 mg 样品粉末用与微量元素分析相同的方法溶解,然后采用濮巍等(2005)的方法将 Sr 和 Nd 分离以用于同位素组成测定.在计算  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值时采用现代球粒陨石值( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$  (Goldstein *et al.*, 1984) 和( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.196\ 7$  (Jacobsen and

Wasserburg, 1980), 计算两阶段模式年龄  $t_{2\text{DM}}$  时所用参数为  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513\ 151$  和  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.213\ 6$  (Liew and Hofmann, 1988).

将样品 DLW-12 中的钾长石脉分离出来并粉碎, 然后挑出钾长石用于 Pb 同位素分析。将岩石样品粉末和钾长石样品用与微量元素分析相同的方法溶解并通过离子交换法分离提纯 Pb 以用于同位素组成测定。

上述实验除电子探针在中国冶金地质总局山东局完成外, 其余的在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成。

### 3 分析结果

#### 3.1 形成时代

表 1 归纳了东雷湾样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据, 完整数据见附表 1 ([www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx))。每个分析点的误差用  $1\sigma$  表示,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的加权平均年龄值以 95% 置信度表示。由于个别锆石点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  年龄不协和, 因而在计算年龄时将其排除掉。样品的 U-Pb 年龄协和图及其代表性的 CL 图像见图 4。大多数锆石颗粒呈双锥长柱状, 长宽比约 2:1~3:1, 可见显著的岩浆震荡环带, 为典型的岩浆结晶锆石。

花岗闪长斑岩(DLW-03、DLW-12、DLW-15)的锆石 Th/U 比值变化于 0.59~1.24, 与岩浆锆石范围一致, 其年龄值可代表岩石的结晶年龄, 得到的加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为  $148.7 \pm 1.8\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=1.3)、 $148.0 \pm 1.3\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=0.49)、 $146.5 \pm 1.7\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=1.2)。铁镁质包体(DLW-16、DLW-17)的锆石 Th/U 比值变化于 0.65~1.94, 给出的加权平均年龄分别为  $146.4 \pm 1.8\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=1.3)、 $147.1 \pm 1.3\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=0.78)。石英闪长玢岩(DLW-09)的锆石 Th/U 比值变化于 0.41~1.18, 其加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $145.5 \pm 1.1\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=0.65)。花岗闪长斑岩的风化产物 DLW-22 的锆石 Th/U 比值变化于 0.19~0.85, 可能由于风化作用的影响导致锆石中部分铅被淋滤掉, 给出的加权平均年龄比其他样品略小, 为  $144.3 \pm 2.2\text{ Ma}$  ( $2\sigma$ 、MSWD=2.0)。

#### 3.2 矿物化学

东雷湾侵入岩中的长石、角闪石、黑云母电子探针分析结果分别见附表 2、附表 3、附表 4 ([www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx))。

[earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx)).

花岗闪长斑岩斜长石 An 值位于  $30.6\sim39.4$ , 平均值为 32.9, 在斜长石分类图中全部落于中长石范围(图 5a)。此外, 花岗闪长斑岩中还含有少量钾长石。石英闪长玢岩斜长石 An 值位于  $23.9\sim31.1$  之间, 平均值为 27.3, 大多数属于更长石, 少量为中长石(图 5a)。铁镁质包体中斜长石 An 值位于  $19.1\sim28.1$  之间, 比寄主花岗闪长斑岩值低, 且含有钾长石斑晶, 斑晶 Or 值位于  $84.0\sim93.7$  之间。

根据 Leake(1997) 的角闪石命名方案, 花岗闪长斑岩中的角闪石大多为镁角闪石, 还含有少量钙角闪石(图 5b)。利用 Schmidt(1992) 的角闪石压力计算得到花岗闪长斑岩中的角闪石结晶压力为  $3.7\sim7.6\text{ kbar}$ (平均  $5.0\text{ kbar}$ ), 相当于岩浆侵位结晶时的深度大约为 17 km。

花岗闪长斑岩、铁镁质包体中的黑云母均为镁质黑云母(图 5c),  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$  为  $0.32\sim0.49$ , 高于武山花岗闪长斑岩中黑云母的值( $0.11\sim0.35$ , 蒋少涌等, 2008)且显示包体与寄主岩石的黑云母化学成分类似。在  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  三元图解中(图 5d), 样品点大都位于  $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$  缓冲线上, 显示了高的氧逸度环境。

#### 3.3 主量及微量元素

东雷湾侵入岩的主量元素及微量元素含量分析结果列于表 2。在  $\text{SiO}_2$  vs.  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  分类图解中(图 6a), 位于花岗闪长岩、闪长岩范围的为高钾钙碱性岩石(图 7c)。铁镁质包体  $\text{SiO}_2$  含量为  $52.39\%\sim54.29\%$ , 位于二长闪长岩范围(图 6a)。东雷湾侵入岩均属准铝质范围(图 6b)。

在球粒陨石标准化图解中(图 8), 东雷湾花岗质岩石均呈轻稀土富集型, Eu 异常不明显, 同时从原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 8)可看出, 花岗质岩石富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, Sr、Pb 呈弱的负异常或正异常, Nb、Ta、Ti 负异常明显。值得注意的是, 东雷湾花岗质岩石具有较高的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  和  $\text{Sr}/\text{Y}$  比值, 较低的  $\text{Yb}_N$  和 Y 值, 显示出埃达克质岩石的亲和性(图 9)。铁镁质岩石呈弱的 Eu 和 Sr 负异常, 且显示铁镁质包体与寄主岩石稀土元素配分型式相似, 但包体稀土总量( $176.4 \times 10^{-6}\sim214.5 \times 10^{-6}$ )比寄主岩石( $117.7 \times 10^{-6}\sim221.1 \times 10^{-6}$ , 平均  $158.3 \times 10^{-6}$ )高, 轻重稀土分异程度( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 12.29\sim12.75$ )比寄主岩石( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 15.71\sim35.75$ , 平均 24.86)小。将东雷湾数据与 Xu *et al.* (2014) 研究结果对比可发现: 东雷湾地区与九瑞其他地区岩体呈现相

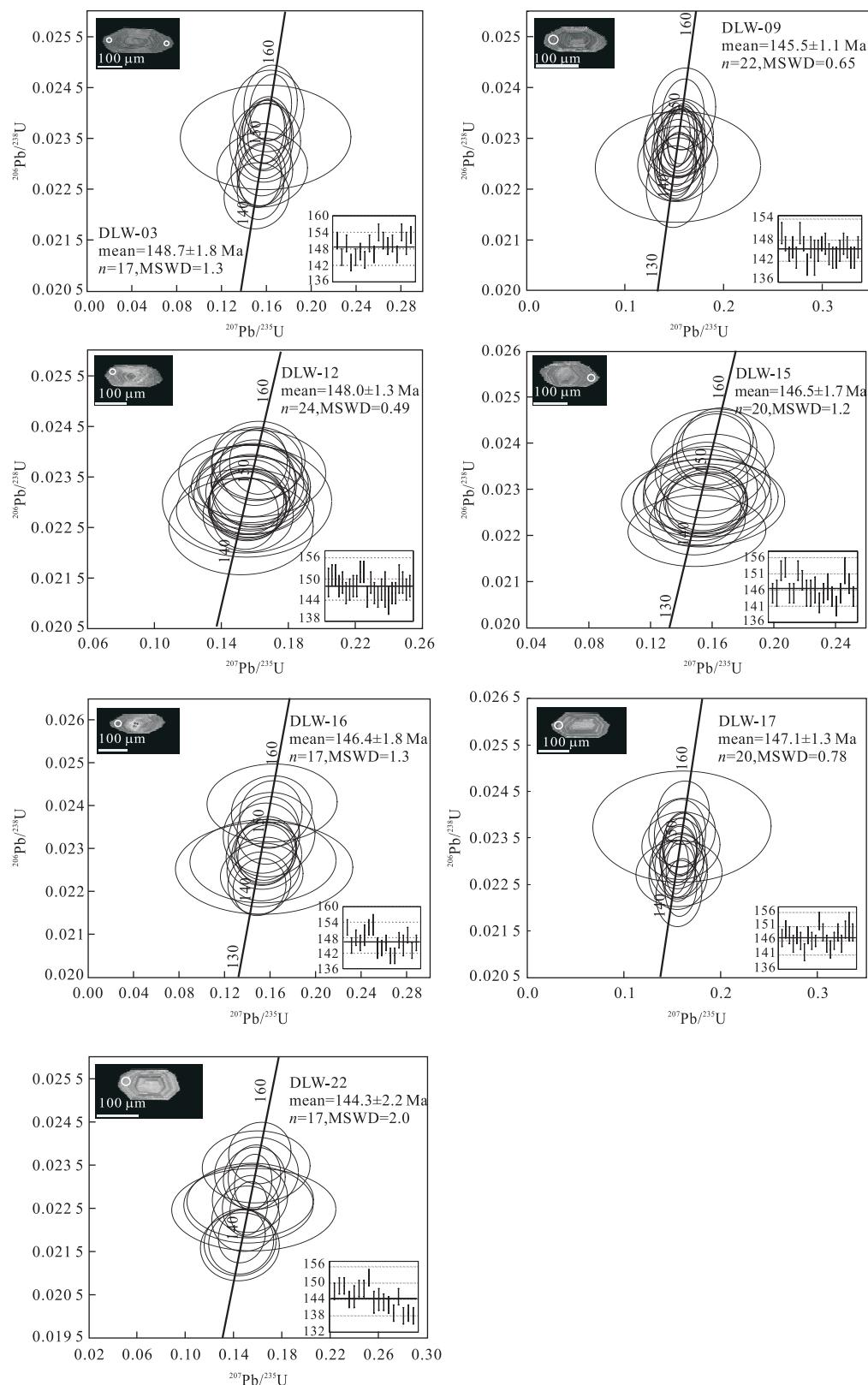


图 4 东雷湾侵入岩锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Donglewan intrusive rocks

似的稀土和微量元素特征,表明九瑞地区的岩浆岩具有一定的成因联系。

#### 3.4 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征

东雷湾侵入岩全岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果

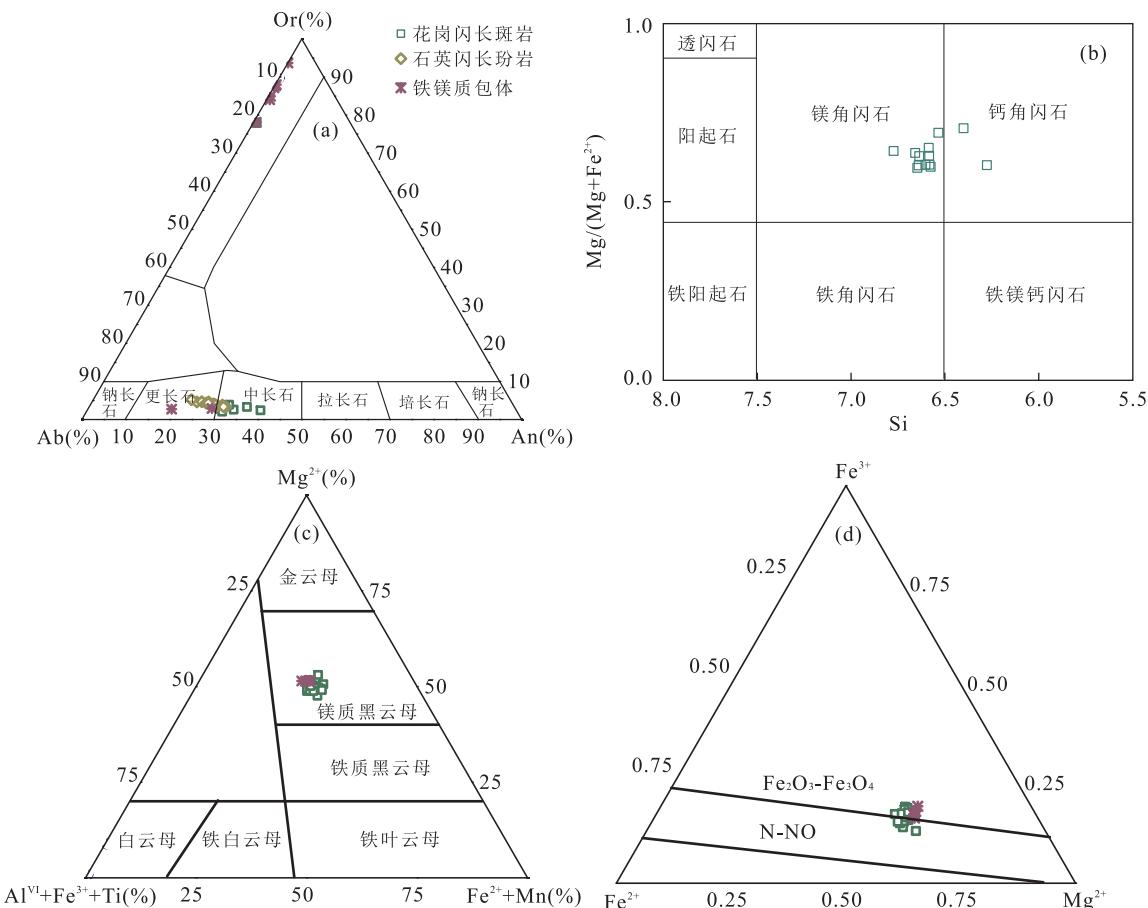


图 5 东雷湾侵入岩矿物成分图解

Fig.5 Classification and discrimination diagrams of minerals from the Dongleiwan intrusive rocks

a.长石分类图(底图据 Deer *et al.*, 1992); b.角闪石分类图(底图据 Leake, 1997); c.云母分类图(底图据 Foster, 1960); d.黑云母  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  图解(底图据 Wones and Eugster, 1965)

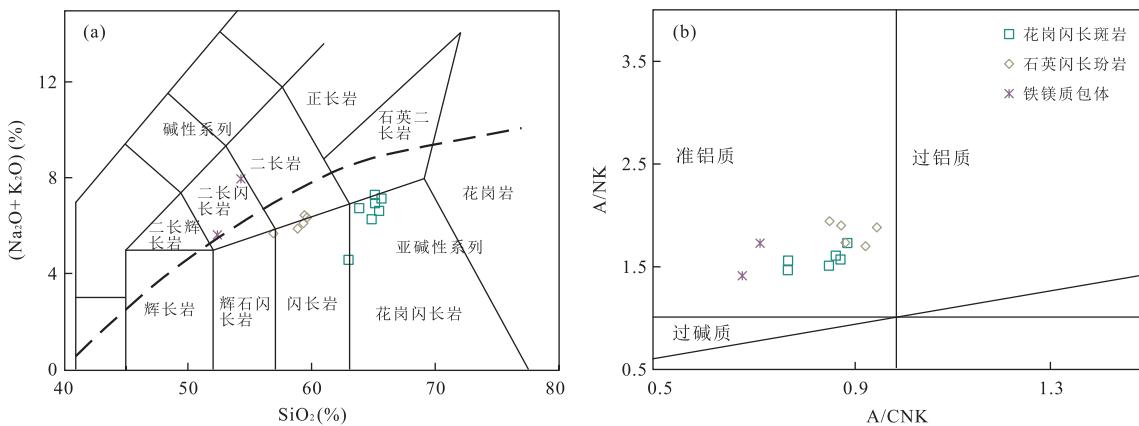


图 6 东雷湾侵入岩  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  图解(a)和  $\text{A}/\text{NK}$  vs.  $\text{A}/\text{CNK}$  图解(b)

Fig.6 Plot of  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (a) and A/NK vs. A/CNK (b)

a.底图据 Irvine and Baragar(1971), Middlemost(1994); b.底图据 Maniar and Piccoli(1989)

见表3。从表3可以看出,东雷湾侵入岩的Sr-Nd同位素组成变化范围较小,初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值位于0.7064~0.7079之间,ε<sub>Nd</sub>(t)值变化于-5.80~

—3.31之间,利用两阶段模式(Liew and Hofmann, 1988)计算出的Nd模式年龄 $t_{\text{2DM}}$ 为1.2~1.4 Ga, 样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $\lambda$ )、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $\lambda$ )、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $\lambda$ )

表 2 东雷湾侵入岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 1 Results of major (%), trace and rare earth ( $10^{-6}$ ) element compositions of the Dongleewan intrusive rocks

样品	花岗闪长斑岩				石英闪长玢岩					花岗闪长斑岩				铁镁质包体	
	DLW-01	DLW-02	DLW-03	DLW-04	DLW-05	DLW-06	DLW-07	DLW-08	DLW-09	DLW-12	DLW-13	DLW-14	DLW-16	DLW-17	
SiO <sub>2</sub>	64.85	65.13	65.46	62.99	56.92	59.64	59.43	58.87	59.35	63.86	65.12	65.65	52.39	54.29	
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.49	0.45	0.50	0.96	0.82	0.88	0.90	0.84	0.65	0.50	0.58	1.12	0.94	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.29	15.59	15.13	17.36	15.09	15.38	15.51	15.28	15.77	14.76	14.81	14.00	13.79	15.23	
FeO <sup>T</sup>	3.73	3.96	3.34	3.59	6.34	5.48	5.95	6.10	5.57	4.15	3.14	2.81	9.01	4.65	
MnO	0.06	0.08	0.08	0.06	0.11	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.08	0.15	0.10	
MgO	1.39	1.88	1.76	2.04	4.03	3.24	3.60	3.73	3.26	2.52	1.91	2.02	5.34	4.40	
CaO	4.49	4.23	4.33	3.19	5.35	4.57	4.09	5.06	4.43	5.23	4.06	4.65	6.14	6.31	
Na <sub>2</sub> O	3.67	4.31	4.01	1.93	2.90	3.59	3.86	2.99	3.18	3.89	3.44	3.26	3.39	3.87	
K <sub>2</sub> O	2.59	2.62	2.60	2.64	2.77	2.74	2.57	2.88	2.91	2.83	3.84	3.87	2.22	4.08	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.20	0.20	0.19	0.34	0.28	0.30	0.29	0.28	0.27	0.22	0.20	0.40	0.26	
烧失量	2.54	1.63	1.92	4.43	4.27	3.59	2.91	3.45	3.46	1.35	2.52	2.93	5.16	5.80	
总量	99.25	100.1	99.28	98.92	99.08	99.41	99.18	99.64	99.14	99.60	99.64	100.0	99.11	99.93	
ACNK	0.90	0.88	0.88	1.47	0.86	0.90	0.94	0.89	0.96	0.78	0.86	0.78	0.72	0.68	
Mg <sup>#</sup>	42.5	48.5	51.1	53.0	55.7	53.9	54.5	54.8	53.7	54.6	54.6	58.7	54.0	65.2	
Li	12.48	12.99	14.19	21.15	22.46	19.62	20.38	19.24	21.49	9.55	15.89	16.68	36.29	23.21	
Be	1.57	1.78	1.56	1.91	1.52	1.65	1.59	1.55	1.59	1.61	1.74	1.56	2.23	1.96	
Sc	2.91	2.60	2.56	3.73	9.90	5.13	4.10	10.23	4.44	5.80	3.61	5.03	12.03	10.13	
Ti	2.703	2.912	2.715	2.791	5.748	4.850	5.271	5.362	4.864	3.809	2.989	3.288	6.270	5.306	
V	46.37	51.13	44.18	49.7	102	86.18	95.5	92.6	84.7	67.8	57	48.4	107	88.3	
Cr	104	128	117	113	84.8	71.9	63.9	84.1	67.2	132	144	141	515	211	
Mn	478	742	659	524	950	849	725	943	841	791	663	772	1300	956	
Co	16.09	16.18	15.03	15.67	36.03	29.19	29.51	34.14	28.30	21.17	13.99	14.39	54.30	29.27	
Ni	22.53	27.72	25.19	25.61	37.01	31.88	31.86	35.73	32.17	28.99	27.91	28.57	69.81	41.55	
Cu	81.67	27.92	73.11	25.14	27.46	22.69	25.01	25.19	22.89	589	204	143	177	268	
Zn	43.41	59.61	56.78	59.64	98.48	87.46	79.76	89.20	87.34	60.76	43.08	47.34	118.4	80.33	
Ga	16.18	14.79	14.19	16.00	16.39	13.72	13.33	16.15	13.74	12.80	12.90	12.53	19.28	16.22	
Rb	11.62	4.43	4.45	3.82	18.61	10.41	11.56	24.52	14.89	23.68	30.04	39.57	56.13	65.77	
Sr	659	682	703	342	679	832	865	672	716	586	514	579	457	605	
Y	15.22	16.77	15.56	11.66	24.54	21.29	25.64	23.33	20.14	19.90	13.85	16.06	31.96	31.49	
Zr	147	160	151	156	164	163	164	159	159	192	156	159	155	136	
Nb	15.43	16.35	14.73	15.53	14.96	14.37	14.73	14.77	14.55	18.43	16.18	17.55	27.68	23.73	
Mo	0.38	0.58	0.37	0.43	0.33	0.38	0.59	0.27	0.28	2.12	7.12	134.2	4.40	2.09	
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Sn	1.17	1.15	1.52	1.14	1.26	1.20	1.27	1.24	1.17	1.94	1.39	1.62	2.65	2.88	
Cs	1.41	0.13	1.14	1.55	1.19	2.97	4.04	1.79	5.42	0.71	5.28	2.70	0.74	0.72	
Ba	705	551	899	367	390	362	381	466	352	413	668	608	343	464	
La	55.85	28.79	45.77	30.95	55.22	44.54	51.43	49.40	42.53	51.60	22.95	33.89	42.66	39.11	
Ce	103	70.58	69.10	67.39	97.37	71.42	83.52	73.62	66.17	74.04	58.31	57.09	86.49	69.18	
Pr	10.27	6.17	7.16	5.61	10.89	8.30	9.79	9.28	8.23	8.54	4.77	6.39	10.85	8.51	
Nd	34.69	24.51	26.12	20.41	41.77	32.52	38.53	36.87	32.25	32.65	18.77	24.61	44.61	34.19	
Sm	4.81	4.44	4.24	3.38	7.12	5.69	6.72	6.54	5.62	5.45	3.42	4.29	8.25	6.39	
Eu	1.48	1.37	1.50	0.93	1.94	1.59	1.85	1.83	1.53	1.41	1.17	1.30	1.87	1.91	
Gd	4.85	3.91	3.97	3.13	6.50	6.05	5.78	5.03	4.97	3.10	3.84	7.23	5.87		
Tb	0.54	0.52	0.49	0.40	0.83	0.66	0.79	0.77	0.65	0.63	0.41	0.51	1.02	0.84	
Dy	2.34	2.49	2.22	1.92	3.87	3.11	3.73	3.63	3.11	2.92	2.06	2.39	5.06	4.41	
Ho	0.41	0.44	0.39	0.34	0.68	0.54	0.65	0.63	0.54	0.51	0.37	0.43	0.90	0.81	
Er	1.24	1.27	1.12	1.01	1.91	1.51	1.83	1.77	1.53	1.45	1.09	1.24	2.58	2.37	
Tm	0.16	0.17	0.14	0.14	0.24	0.19	0.23	0.22	0.20	0.19	0.15	0.16	0.35	0.33	
Yb	1.05	1.10	0.95	0.93	1.53	1.22	1.49	1.43	1.26	1.21	0.99	1.09	2.26	2.15	
Lu	0.16	0.17	0.15	0.14	0.22	0.18	0.22	0.21	0.19	0.18	0.15	0.17	0.34	0.33	
Hf	4.32	4.68	4.35	4.46	4.60	4.62	4.69	4.55	4.57	5.49	4.57	4.78	4.66	4.16	
Ta	0.90	0.94	0.86	0.83	0.68	0.67	0.69	0.68	0.68	1.04	0.86	0.93	1.30	1.01	
W	0.95	0.87	0.51	5.39	0.86	0.66	0.97	0.66	0.68	1.20	1.16	1.11	8.28	4.26	
Pb	6.97	4.73	6.60	4.82	5.85	3.18	3.89	7.33	5.12	3.41	6.08	8.55	9.96	5.78	
Bi	0.29	0.07	0.15	0.07	0.14	0.05	0.05	0.06	0.05	0.21	0.15	0.13	3.49	0.13	
Th	14.03	6.31	8.75	4.68	6.46	6.36	7.18	5.76	5.54	7.59	6.17	7.95	4.16	5.53	
U	0.86	1.20	0.76	0.97	1.62	1.51	1.50	1.56	1.43	1.79	1.31	2.00	2.70	3.57	
ΣREE	221.1	145.9	163.3	136.7	230.1	176.6	206.8	192.0	168.9	185.8	117.7	137.4	214.5	176.4	
(La/Yb) <sub>N</sub>	35.75	17.67	32.51	22.46	24.40	24.54	23.33	23.32	22.81	28.64	15.71	20.99	12.75	12.29	
Eu/Eu <sup>*</sup>	0.93	0.99	1.10	0.86	0.85	0.89	0.87	0.89	0.87	0.81	1.08	0.96	0.72	0.94	

注: ACNK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ; Mg<sup>#</sup> =  $100 \times n(\text{MgO})/n(\text{MgO} + 0.9 \times \text{FeO}^T)$ .

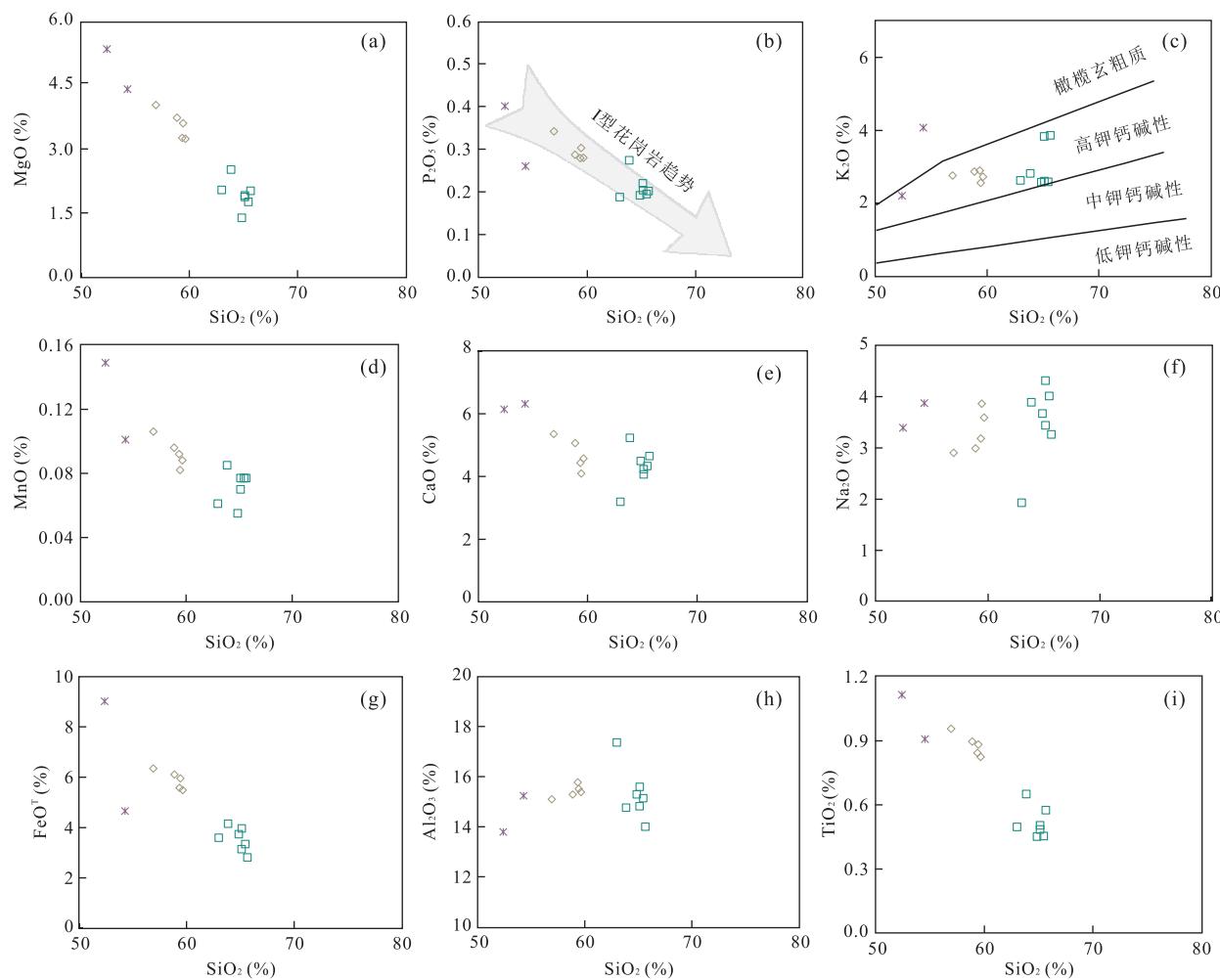


图 7 东雷湾侵入岩主量元素哈克图解(图例同图 6)

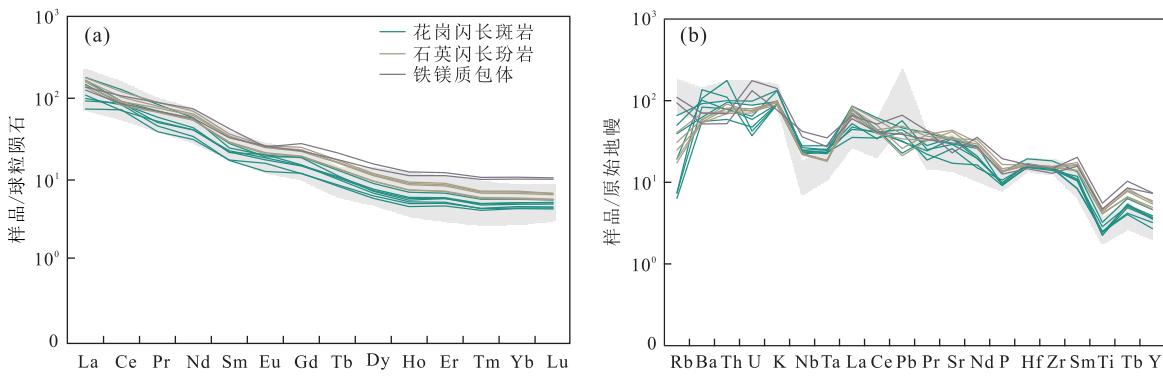
Fig.7 Plots of major elements vs. SiO<sub>2</sub> for the Dongleiwan intrusive rocks

图 8 东雷湾侵入岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.8 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergram (b) of the Dongleiwan intrusive rocks

a.球粒陨石标准化值据 Boynton(1984);b.原始地幔标准化值据 McDonough and Sun(1995);阴影部分为九瑞其他地区数据,据 Xu et al.(2014)

值分别变化于 17.333 3~18.260 0、15.513 5~15.621 0 和 37.404 1~38.395 4 之间。

锆石原位激光蚀样的 MC-ICP-MS Hf 同位素

分析结果归纳于表 1 中,完整数据见附表 5([www.earth-science.net/index.aspx](http://www.earth-science.net/index.aspx))。分析结果表明,东雷湾样品的锆石初始<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值在 0.282 245~

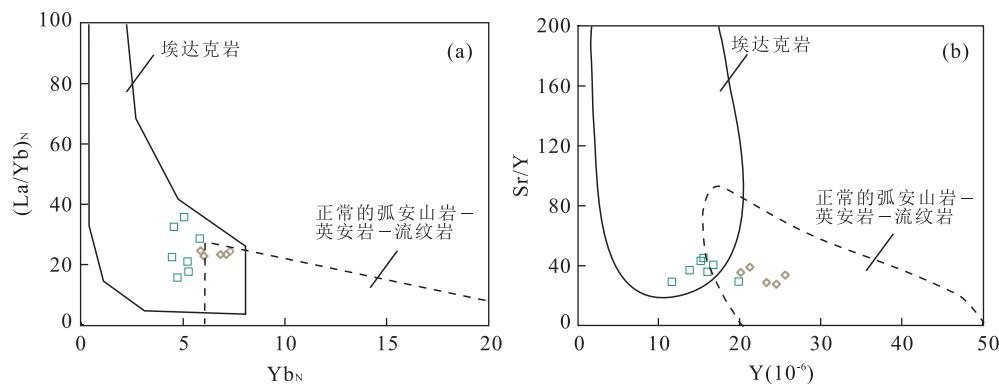
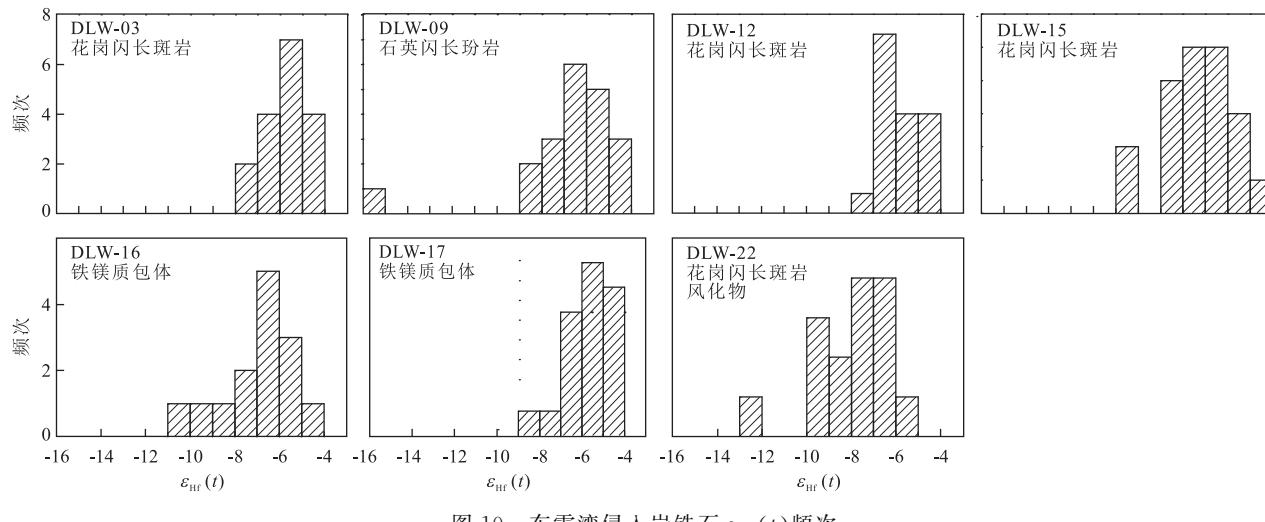
图 9 东雷湾花岗质岩石  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  vs.  $\text{Yb}_N$ (a) 及  $\text{Sr}/\text{Y}$  vs.  $\text{Y}(10^{-6})$  图解(图例同图 6)Fig.9  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  vs.  $\text{Yb}_N$ (a) and  $\text{Sr}/\text{Y}$  vs.  $\text{Y}$  diagrams (b) of the Dongleiwan granitoidsa.底图据 Defant and Drummond(1990); b.底图据 Defant *et al.*(2002)

表 3 东雷湾侵入岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 3 Sr-Nd and Pb isotopic compositions of the Dongleiwan intrusive rocks

样品号	$\text{Rb}$ ( $10^{-6}$ )	$\text{Sr}$ ( $10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$I_{\text{Sr}}$	$\text{Sm}$ ( $10^{-6}$ )	$\text{Nd}$ ( $10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
DLW-01	11.62	659.1	0.132 1	0.707 459	10	0.707 180	4.81	34.69	0.083 7	0.512 259
DLW-02	4.43	681.8	0.048 7	0.707 340	7	0.707 237	4.44	24.51	0.109 5	0.512 271
DLW-03	4.45	703.1	0.047 5	0.707 313	10	0.707 213	4.24	26.12	0.098 0	0.512 262
DLW-04	3.82	341.7	0.083 8	0.707 761	12	0.707 584	3.38	20.41	0.100 1	0.512 243
DLW-05	18.61	679.4	0.205 3	0.707 252	9	0.706 827	7.12	41.77	0.103 0	0.512 380
DLW-06	10.41	831.9	0.093 8	0.707 135	7	0.706 941	5.69	32.52	0.105 8	0.512 352
DLW-07	11.56	865.0	0.100 2	0.707 091	5	0.706 884	6.72	38.53	0.105 4	0.512 360
DLW-08	24.52	671.7	0.273 6	0.707 213	8	0.706 647	6.54	36.87	0.107 1	0.512 371
DLW-09	14.89	715.5	0.156 0	0.707 127	10	0.706 804	5.62	32.25	0.105 2	0.512 343
DLW-12	23.68	586.1	0.302 8	0.707 677	6	0.707 040	5.45	32.65	0.100 9	0.512 298
DLW-13	30.04	513.7	0.438 3	0.708 092	10	0.707 170	3.42	18.77	0.110 0	0.512 265
DLW-14	39.57	579.4	0.512 0	0.708 048	8	0.706 971	4.29	24.61	0.105 2	0.512 256
DLW-16	56.13	456.9	0.920 9	0.708 338	10	0.706 422	8.25	44.61	0.111 7	0.512 314
DLW-17	65.77	605.5	0.814 2	0.708 349	7	0.706 647	6.39	34.19	0.112 9	0.512 324
Kfs	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

样品号	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}$ (Ga)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$2\sigma$
DLW-01	6	-5.34	1.37	17.852 4	8	15.549 5	7	37.739 4	20
DLW-02	6	-5.60	1.39	17.623 9	4	15.516 6	6	37.718 6	15
DLW-03	8	-5.56	1.39	17.904 5	6	15.591 9	6	37.870 7	15
DLW-04	6	-5.97	1.42	17.927 0	7	15.530 6	5	38.234 9	18
DLW-05	5	-3.31	1.21	17.642 5	7	15.525 1	6	37.983 7	20
DLW-06	6	-3.90	1.25	17.333 3	4	15.513 5	4	37.452 6	12
DLW-07	5	-3.74	1.24	17.478 1	6	15.515 5	6	37.592 7	18
DLW-08	6	-3.56	1.23	17.780 7	5	15.534 5	5	38.135 2	12
DLW-09	8	-4.07	1.27	17.644 2	6	15.525 5	4	37.935 3	16
DLW-12	4	-4.90	1.33	17.402 5	6	15.558 9	6	37.404 1	15
DLW-13	9	-5.71	1.40	17.844 2	5	15.550 4	4	38.004 2	14
DLW-14	5	-5.80	1.41	17.843 5	8	15.547 5	5	38.116 2	21
DLW-16	7	-4.77	1.32	17.711 6	8	15.551 2	5	38.218 3	20
DLW-17	7	-4.61	1.31	17.448 0	10	15.621 0	7	38.176 7	21
Kfs	—	—	—	17.905 7	7	15.534 2	6	38.197 1	19

图 10 东雷湾侵入岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  频次Fig.10 Zircon  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the Dongleewan intrusive rocks

0.282 596 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在  $-15.9 \sim -3.6$ (图 10) 之间,计算的  $T_{\text{DM2}}$  值为  $1.4 \sim 2.2$  Ga.

## 4 讨论

### 4.1 成岩年龄及意义

成岩成矿年龄的确定,对于理解矿床的形成过程、确定矿床的成因以及对进一步找矿都具有十分重要的作用.Li *et al.*(2010)测得东雷湾无矿化花岗闪长斑岩锆石 SIMS 年龄为  $146.0 \pm 1.0$  Ma, 贾丽琼等(2015)利用锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素定年方法测得东雷湾花岗闪长斑岩年龄为  $142.2 \pm 0.5$  Ma, 同时对矿床中的辉钼矿采用 Re-Os 同位素定年方法测得成矿年龄为  $143.3 \pm 5.2$  Ma. 本文测得的东雷湾侵入岩年龄分布于  $144.3 \sim 148.7$  Ma 之间,与前人研究结果相比稍偏高一些,但在误差范围内一致,说明东雷湾矿区侵入岩属燕山晚期岩浆活动的产物. 前人对九瑞地区多种岩性的侵入岩进行了详细的年龄测定工作,得到的年龄分布在  $138.2 \pm 1.8$  Ma 至  $149.6 \pm 3.0$  Ma 之间(Ding *et al.*, 2006; 李亮和蒋少涌, 2009; Li *et al.*, 2010; 陈志洪等, 2011; 徐耀明等, 2013), 显示了九瑞地区岩浆活动的时代相对集中的特征. 另外,本文得到的两个铁镁质包体的年龄( $146.4 \pm 1.8$  Ma,  $147.1 \pm 1.3$  Ma)与寄主花岗闪长斑岩的年龄在误差范围内一致,因此二者是同时期岩浆活动的产物.

### 4.2 铁镁质包体成因

铁镁质微粒包体在花岗质岩石中分布广泛,对其进行深入系统的地质及地球化学研究,可以揭示

深部岩浆作用过程,有助于了解寄主岩浆起源与成因演化等问题,已成为研究岩浆混合作用重要的研究对象(王德滋等,1992). 关于铁镁质微粒包体的成因,前人提出了不同观点,包括源岩残留体(Chappell *et al.*, 1987; White *et al.*, 1999)、围岩捕虏体(Maas *et al.*, 1997)、早期结晶体熔融分离(Dahlquist, 2002; Donaire *et al.*, 2005)以及不同岩浆的混合(Perugini *et al.*, 2003; Barbarin, 2005)等.

东雷湾花岗闪长斑岩中的铁镁质包体具火成结构并发育针状磷灰石,与 Zhao *et al.*(2012)报道的骑田岭花岗岩中的包体类似. 针状磷灰石被认为是在温度较高的基性岩浆与温度较低的花岗质岩浆混合的情况下过冷结晶形成的(Sparks and Marshall, 1986). 另外,包体中存在钾长石斑晶,且包体与寄主花岗闪长斑岩的年龄在误差范围内一致,包体中也没有继承锆石的发现,表明其很可能是岩浆混合作用的产物. 通过上述现象可初步排除源岩残留和围岩捕虏体的成因,而显示包体应来源于岩浆的混合作用. 铁镁质包体与寄主岩石的黑云母斑晶化学成分、全岩 Sr-Nd 同位素组成相似,这可能是由岩浆混合过程中化学和同位素平衡引起的,前人研究表明(Lesher, 1990; Poli *et al.*, 1996),在岩浆混合过程中,同位素平衡会比化学平衡更快达到.

在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图 11)中,铁镁质包体的 Sr-Nd 同位素组成位于地幔和加厚的扬子下地壳成因的埃达克岩之间,表明包体的形成受二者相互作用的影响. 另外,包体的 Pb 同位素组成位于加厚下地壳、亏损地幔和 EMII 的值之间(图 12),表明包体的物质来源具有混合型,进一步佐证了上述观

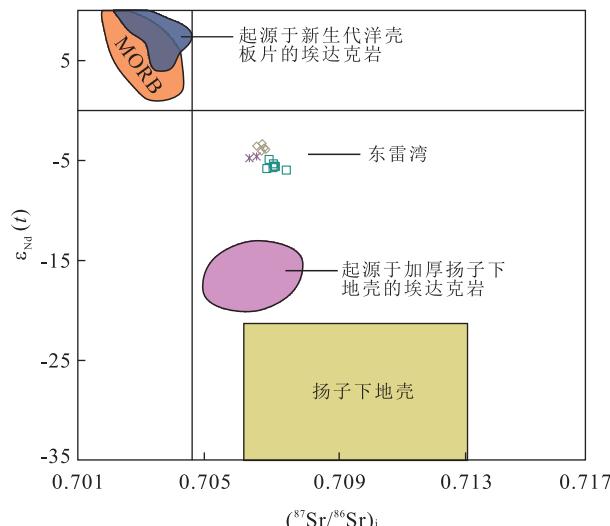


图 11 东雷湾侵入岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图例同图 6)

Fig.11 Plot of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  of the Dongleiwan intrusive rocks

点。东雷湾铁镁质包体的  $Mg^{\#}$  含量较高(54.0~65.2),并具有较高含量的 V、Cr、Co、Ni 等相容元素,因此笔者认为地幔物质对包体的形成具有重要的贡献。此外,测得包体的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-4.3 \sim -10.2$ ,也支持其壳幔混合成因。结合前人对九瑞地区的研究(蒋少涌等,2008; Xu et al., 2014),笔者认为东雷湾铁镁质包体很可能是由拆沉的加厚下地壳发生部分熔融,并在其上升过程中与地幔橄榄岩发生相互作用,进而与花岗质岩浆混合过冷结晶形成的。

#### 4.3 东雷湾中酸性侵入岩成因

东雷湾花岗质岩石具有 I 型花岗岩的特征:(1)在矿物组成上,不含过铝质矿物,而含黑云母、角闪石等铁镁质矿物;(2)岩石均为准铝质岩石;(3)在哈克图解上(图 7), $P_2\text{O}_5$  含量随  $\text{SiO}_2$  的增加而降低,具有 I 型花岗岩的趋势(Chappell, 1999);(4)在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}^T$  关系图上(图 13a, 13b)显示出 I 型花岗岩特征。

前人对长江中下游成矿带与斑岩和矽卡岩矿床有关的侵入岩成因做过许多研究,关于晚中生代花岗质岩石的动力学过程和起源得出了不同的结论,主要包括以下 4 种:(1)由富集岩石圈地幔经 AFC 过程形成(Yan et al., 2003; Xie et al., 2008; Li et al., 2009; Yuan et al., 2011);(2)起源于洋脊俯冲过程中的洋壳部分熔融(Liu et al., 2010; Ling et al., 2011; Sun et al., 2011);(3)由未经拆沉的加厚下地壳部分熔融形成(He et al., 2011; Ling et al., 2011);(4)由拆沉的加厚下地壳部分熔融作

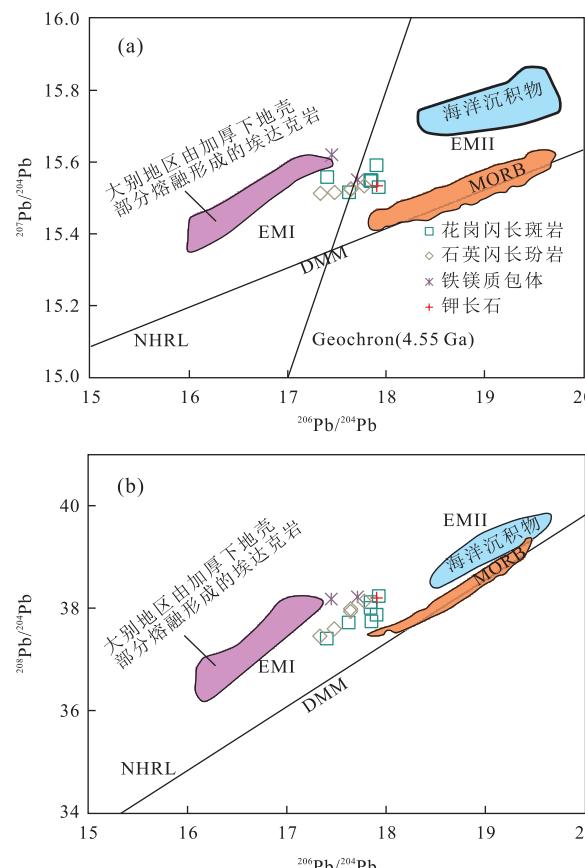


图 12 东雷湾侵入岩初始 Pb 同位素组成

Fig.12 Initial Pb isotopic compositions of the Dongleiwan intrusive rocks

大别地区数据 He et al.(2011), Liu et al.(2012)

用并与软流圈地幔相互作用形成(蒋少涌等,2008;李亮和蒋少涌,2009; Yang et al., 2011; Xu et al., 2014)。与花岗质岩石相比,同期的铁镁质岩石的地球化学和同位素数据却很少(Xu et al., 2014),通过对其进行研究可揭示岩石圈地幔的特征并有助于探讨花岗质岩石的成因。

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\text{SiO}_2$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\text{SiO}_2$  图解有助于判别岩浆演化过程中是否经历了 AFC 过程。如果岩浆在上侵过程中受到了地壳物质的同化混染,则  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值应随着  $\text{SiO}_2$  含量的升高而升高,而  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值则会随着  $\text{SiO}_2$  含量的升高而降低。图 13c 和 13d 中岩石的 Sr、Nd 同位素数据显示出一定的上述趋势,表明东雷湾矿区的岩浆在演化过程中可能经历了一定程度的地壳物质的同化混染作用。从稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(图 8)可看出,东雷湾侵入岩没有表现出 Eu 和 Sr 的负异常,因而没经历明显的斜长石的分离结晶。 $\text{La}/\text{Yb}-\text{La}$  图解可区别出分离结晶作用和部分熔融作用,在图

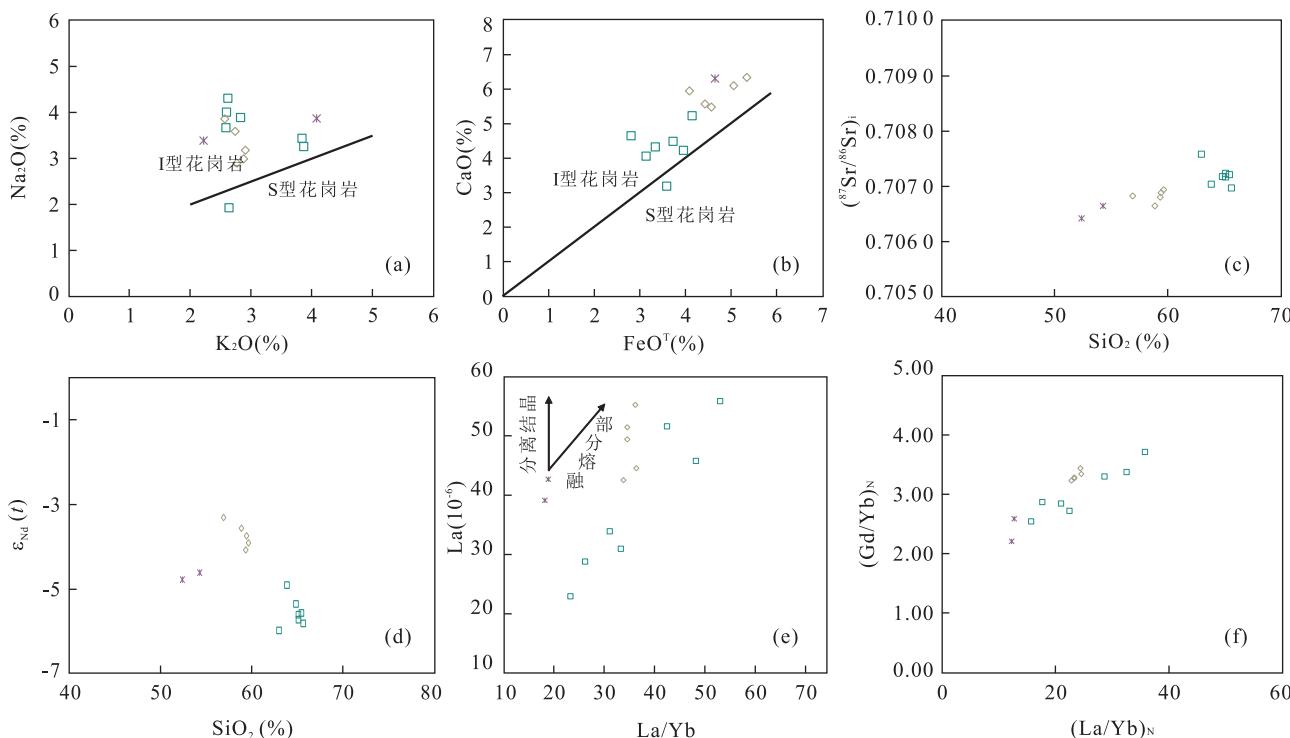


图 13 东雷湾侵入岩  $\text{Na}_2\text{O}$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$ (a)、 $\text{CaO}$  vs.  $\text{FeO}^T$ (b)、 $\text{SiO}_2$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (c)、 $\text{SiO}_2$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (d)、 $\text{La}/\text{Yb}$  vs.  $\text{La}$ (e) 和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  vs.  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (f) 图解

Fig.13 Plots of  $\text{Na}_2\text{O}$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  (a),  $\text{CaO}$  vs.  $\text{FeO}^T$  (b),  $\text{SiO}_2$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  (c),  $\text{SiO}_2$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (d),  $\text{La}/\text{Yb}$  vs.  $\text{La}$  (e) and  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  vs.  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (f) of the Dongleiwan intrusive rocks

图 a 据 Chappell(1999);图例同图 6

13e 中,东雷湾样品表现出部分熔融作用形成的岩石的特征,而与分离结晶作用形成的岩石特征不同。从以上讨论可看出,东雷湾侵入岩是由部分熔融作用形成的。

东雷湾侵入岩具有明显的 Y 亏损特征(图 8),说明石榴子石很有可能在源区作为部分熔融作用的残留相存在。研究表明(Huang and He, 2010; He et al., 2011),石榴子石是唯一能够明显分异中稀土和重稀土的造岩矿物,因此源区石榴子石的存在可以同时升高部分熔融作用形成的岩浆中的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  值(Klein et al., 2000; Petermann et al., 2004)。图 13f 中,东雷湾矿区侵入岩的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  值表现出正相关关系,进一步证明源区存在石榴子石残留。另外从东雷湾侵入岩无 Eu 和 Sr 负异常的特征可看出残留相没有斜长石,通常认为残留矿物相存在石榴子石而不存在斜长石的岩浆源区出现在大于 40 km 的深部(Rapp and Watson, 1995; Petford and Atherton, 1996),因此东雷湾侵入岩的形成应与加厚下地壳的部分熔融作用有关,而不是由富集岩石圈地幔经分

离结晶同化混染作用形成。

东雷湾侵入岩具有很高的  $\text{Mg}^\#$  含量(表 2),除两个样品外,其余均大于 50,且 V、Cr、Co、Ni 等相容元素含量也较高( $V = 44.2 \times 10^{-6} \sim 106.8 \times 10^{-6}$ ,平均  $74.8 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Cr} = 63.9 \times 10^{-6} \sim 515.3 \times 10^{-6}$ ,平均  $135.2 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Co} = 14.0 \times 10^{-6} \sim 54.3 \times 10^{-6}$ ,平均  $25.4 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Ni} = 22.5 \times 10^{-6} \sim 69.8 \times 10^{-6}$ ,平均  $34.2 \times 10^{-6}$ ),高于武山的值(蒋少涌等,2008),表明地幔物质具有明显的贡献。在 Sr-Nd 同位素组成图解上(图 11),东雷湾矿区岩石也与未经拆沉的加厚下地壳熔融形成的岩石明显不同(以大别地区岩石为例),相比之下前者的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值明显高于后者。另一方面,东雷湾矿区岩石的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值与俯冲洋壳部分熔融形成的岩石的值相比也表现出明显不同,前者要低于后者(Defant et al., 1992; Kay et al., 1993)。因此,从东雷湾矿区样品的岩石地球化学和同位素地球化学特征可以看出,该区侵入岩的形成很可能是因为加厚下地壳拆沉入软流圈地幔后发生部分熔融,熔体与地幔相互作用后在上侵的过程分别形成了铁镁质岩石和花岗质岩石。

## 5 结论

(1) 东雷湾中酸性侵入岩的成岩年龄为 144.3~148.7 Ma, 铁镁质包体的年龄为 146.4~147.1 Ma, 与寄主花岗闪长斑岩的年龄一致。

(2) 岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 东雷湾铁镁质包体是由拆沉的加厚下地壳发生部分熔融, 并在其上升过程中与地幔物质发生相互作用, 进而与花岗质岩浆混合过冷结晶形成的。

(3) 东雷湾矿区样品的岩石地球化学和同位素地球化学研究表明, 该区侵入岩的形成很可能是因为加厚下地壳拆沉入软流圈地幔后发生部分熔融, 熔体与地幔相互作用后在上侵的过程分别形成了铁镁质岩石和花岗质岩石。

致谢: 野外工作得到了江西省国土资源厅、江西地质矿产勘查开发局和赣西北地质大队的大力支持, 作者在此深表谢意。感谢南京大学孙岩、孙明志、边立曾、熊永根等教授对本工作的指导及对本文提出的宝贵修改意见。匿名审稿人给出了很好的评阅意见, 在此一并表示感谢!

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Barbarin, B., 2005. Mafic Magmatic Enclaves and Mafic Rocks Associated with Some Granitoids of the Central Sierra Nevada Batholith, California: Nature, Origin, and Relations with the Hosts. *Lithos*, 80(1): 155–177. doi: 10.1016/j.lithos.2004.05.010
- Bouvier, A., Vervoort, J.D., Patchett, P.J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57. doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.010
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63–114.
- Chang, Y.F., Liu, X.P., Wu, Y.C., 1991. The Copper-Iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chappell, B., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00086-3
- Chappell, B., White, A., Wyborn, D., 1987. The Importance of Residual Source Material (Restite) in Granite Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28(6): 1111–1138. doi: 10.1093/petrology/28.6.1111
- Chen, Z.H., Xing, G.F., Guo, K.Y., et al., 2011. Zircon U-Pb Ages of Ore-Bearing Granitic Bodies in Northern Jiujiang-Ruichang Metallogenic District of the Mineralization Belt of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1146–1158 (in Chinese with English abstract).
- Dahlquist, J.A., 2002. Mafic Microgranular Enclaves: Early Segregation from Metaluminous Magma (Sierra de Chepes), Pampean Ranges, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(6): 643–655. doi: 10.1016/S0895-9811(02)00112-8
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2. Longman Scientific & Technical, Hong Kong.
- Defant, M., Jackson, T.E., Drummond, M.S., et al., 1992. The Geochemistry of Young Volcanism throughout Western Panama and Southeastern Costa Rica: An Overview. *Journal of the Geological Society*, 149(4): 569–579. doi: 10.1144/gsjgs.149.4.0569
- Defant, M.J., Xu, J., Kepezhinskas, P., et al., 2002. Adakites: Some Variations on a Theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129–142.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665.
- Ding, X., Jiang, S.Y., Ni, P., et al., 2006. Zircon SIMS U-Pb Geochronology of Host Granitoids in Wushan and Yongping Copper Deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 383–389 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Jiang, S.Y., Zhao, K.D., et al., 2006. In-Situ U-Pb SIMS Dating and Trace Element (EMPA) Composition of Zircon from a Granodiorite Porphyry in the Wushan Copper Deposit, China. *Mineralogy and Petrology*, 86(1–2): 29–44. doi: 10.1007/s00710-005-0093-5
- Donaire, T., Pascual, E., Pin, C., et al., 2005. Microgranular Enclaves as Evidence of Rapid Cooling in Granitoid Rocks: The Case of the Los Pedroches Granodiorite, Iberian Massif, Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3): 247–265. doi: 10.1007/s00410-005-0652-0
- Foster, M.D., 1960. Interpretation of the Composition of Tri-

- octahedral Micas. U.S. Geological Survey, Washington D. C., 70—89.
- Gao, J. F., Lu, J. J., Lai, M. Y., et al., 2003. Analysis of Trace Elements in Rock Samples Using HR-ICPMS. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(6): 844—850 (in Chinese with English abstract).
- Goldstein, S. L., O'Nions, R. K., Hamilton, P. J., 1984. A Sm-Nd Isotopic Study of Atmospheric Dusts and Particulates from Major River Systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221—236. doi: 10.1016/0012-821X(84)90007-4
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3—4): 237—269. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00082-8
- He, Y., Li, S., Hoefs, J., et al., 2011. Post-Collisional Granitoids from the Dabie Orogen: New Evidence for Partial Melting of a Thickened Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3815—3838. doi: 10.1016/j.gca.2011.04.011
- Huang, F., He, Y. S., 2010. Partial Melting of the Dry Mafic Continental Crust: Implications for Petrogenesis of C-Type Adakites. *Chinese Science Bulletin*, 55(22): 2428—2439. doi: 10.1007/s11434-010-3224-2
- Irvine, T., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548.
- Jacobsen, S. B., Wasserburg, G. J., 1980. Sm-Nd Isotopic Evolution of Chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 139—155. doi: 10.1016/0012-821X(80)90125-9
- Jia, L. Q., Yang, D., Xu, W. Y., et al., 2015. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Dongleiwan Skarn Cu Polymetallic Deposit in the Jiujiang-Ruichang Ore Concentration Area of Jiangxi Province and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 177—186 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y., Li, L., Zhu, B., et al., 2008. Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of Granodiorite from the Wushan Copper Deposit, Jiangxi Province and Their Implications for Petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1679—1690 (in Chinese with English abstract).
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Marquez, M., 1993. Evidence in Cerro Pampa Volcanic Rocks for Slab-Melting Prior to Ridge-Trench Collision in Southern South America. *The Journal of Geology*, 101(6): 703—714.
- Klein, M., Stosch, H. G., Seck, H., et al., 2000. Experimental Partitioning of High Field Strength and Rare Earth Elements between Clinopyroxene and Garnet in Andesitic to Tonalitic Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 99—115. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00178-7
- Kong, F. B., Jiang, S. Y., Xu, Y. M., et al., 2012. Submarine Hydrothermal Exhalation with Superimposed Magmatic-Hydrothermal Mineralization in the Wushan Copper Deposit, Jiangxi Province: Constraints from Geology, Ore Texture and Ore Deposit Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3929—3937 (in Chinese with English abstract).
- Leake, B. E., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61(405): 1019—1037.
- Lesher, C., 1990. Decoupling of Chemical and Isotopic Exchange during Magma Mixing. *Nature*, 344(6263): 235—237. doi: 10.1038/344235a0
- Li, J. W., Li, X. H., Pei, R. F., et al., 2007. Re-Os Age of Molybdenite from the Southern Ore Zone of the Wushan Copper Deposit, Jiangxi Province, and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 801—807 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W., Zhao, X. F., Zhou, M. F., et al., 2009. Late Mesozoic Magmatism from the Daye Region, Eastern China: U-Pb Ages, Petrogenesis, and Geodynamic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383—409. doi: 10.1007/s00410-008-0341-x
- Li, L., Jiang, S. Y., 2009. Petrogenesis and Geochemistry of the Dengjiashan Porphyritic Granodiorite, Jiujiang-Ruichang Metallogenic District of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2877—2888 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Wang, X. C., et al., 2010. SIMS U-Pb Zircon Geochronology of Porphyry Cu-Au-(Mo) Deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China: Magmatic Response to Early Cretaceous Lithospheric Extension. *Lithos*, 119(3): 427—438. doi: 10.1016/j.lithos.2010.07.018
- Liew, T. C., Hofmann, A. W., 1988. Precambrian Crustal

- Components, Plutonic Associations, Plate Environment of the Hercynian Fold Belt of Central Europe: Indications from a Nd and Sr Isotopic Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 129—138. doi: 10.1007/BF00402106
- Ling, M.X., Wang, F.Y., Ding, X., et al., 2011. Different Origins of Adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Geochemical Constraints. *International Geology Review*, 53(5—6): 727—740. doi: 10.1080/00206814.2010.482349
- Liu, S. A., Li, S., Guo, S., et al., 2012. The Cretaceous Adakitic-Basaltic-Granitic Magma Sequence on South-Eastern Margin of the North China Craton: Implications for Lithospheric Thinning Mechanism. *Lithos*, 134: 163—178. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.015
- Liu, S.A., Li, S., He, Y., et al., 2010. Geochemical Contrasts between Early Cretaceous Ore-Bearing and Ore-Barren High-Mg Adakites in Central-Eastern China: Implications for Petrogenesis and Cu-Au Mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24): 7160—7178. doi: doi: 10.1016/j.gca.2010.09.003
- Liu, X., 1990. The Mechanism of Structural Control of Ore Formation and Geochemical Characteristics in the Massive Sulfide Deposits of the Wushan Copper Ore Field, Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, (1): 22—32 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special publication, (4).
- Maas, R., Nicholls, I. A., Legg, C., 1997. Igneous and Metamorphic Enclaves in the S-Type Dredge Granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Evidence for Crustal Melting and Magma Mixing. *Journal of Petrology*, 38(7): 815—841. doi: 10.1093/petroj/38.7.815
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016—7606(1989)101<635:TDOG>2.3.CO;2
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Duan, C., et al., 2011. A Tectono-Genetic Model for Porphyry-Skarn-Stratabound Cu-Au-Mo-Fe and Magnetite-Apatite Deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294—314. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.07.010
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3): 223—253. doi: 10.1016/0009—2541(94)00140—4
- Middlemost, E. A., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215—224. doi: 10.1016/0012—8252(94)90029—9
- Pan, Y., Dong, P., 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) Metallogenic Belt, East Central China: Intrusion- and Wall Rock-Hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag Deposits. *Ore Geology Reviews*, 15(4): 177—242. doi: 10.1016/S0169—1368(99)00022—0
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. doi: 10.1007/BF00384745
- Pertermann, M., Hirschmann, M., Hametner, K., et al., 2004. Experimental Determination of Trace Element Partitioning between Garnet and Silica-Rich Liquid during Anhydrous Partial Melting of MORB-Like Eclogite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5), doi: 10.1029/2003GC000638
- Perugini, D., Poli, G., Christofides, G., et al., 2003. Magma Mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: Evidence from Mafic Microgranular Enclaves. *Mineralogy and Petrology*, 78(3—4): 173—200. doi: 10.1007/s00710—002—0225—0
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491—1521. doi: 10.1093/petrology/37.6.1491
- Poli, G., Tommasini, S., Halliday, A., 1996. Trace Element and Isotopic Exchange during Acid-Basic Magma Interaction Processes. *Geological Society of America Special Papers*, 315: 225—232. doi: 10.1130/0—8137—2315—9.225
- Pu, W., Gao, J.F., Zhao, K.D., et al., 2005. Separation Method of Rb-Sr, Sm-Nd Using DCTA and HIBA. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(4): 445—450 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891
- Schmidt, M.W., 1992. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-in-Hornblende Barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2—3): 304—310. doi: 10.1007/BF00310745
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).

- Sparks, R., Marshall, L., 1986. Thermal and Mechanical Constraints on Mixing between Mafic and Silicic Magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1–4):99–124.doi:10.1016/0377–0273(86)90041–7
- Sun, W.D., Zhang, H., Ling, M.X., et al., 2011. The Genetic Association of Adakites and Cu-Au Ore Deposits. *International Geology Review*, 53(5–6):691–703.doi:10.1080/00206814.2010.507362
- Wang, D.Z., Zhou, X.M., Xu, X.S., et al., 1992. On Geneses of Microgranitoid Enclaves. *Journal of Guilin College of Geology*, 12(3):235–241 (in Chinese with English abstract).
- Wen, C.H., Xu, W.Y., Zhong, H., et al., 2012. Fluid Inclusion Study of the Chengmenshan Porphyry Mo-Cu Deposit in the Jiujiang-Ruichang District. *Acta Geologica Sinica*, 86(10):1604–1620 (in Chinese with English abstract).
- White, A.J.R., Chappell, B.W., Wyborn, D., 1999. Application of the Restite Model to the Dedick Granodiorite and Its Enclaves—A Reinterpretation of the Observations and Data of Maas et al. (1997). *Journal of Petrology*, 40(3):413–421.doi:10.1093/petroj/40.3.413
- Wones, D., Eugster, H., 1965. Stability of Biotite—Experiment Theory and Application. *American Mineralogist*, 50(9):1228–1272.
- Wu, L.S., Zou, X.Q., 1997. Re-Os Isotopic Age Study of the Chengmenshan Copper Deposit, Jiangxi Province. *Mineral Deposits*, 16(4):376–381 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G.Q., Mao, J.W., Li, R.L., et al., 2008. Geochemistry and Nd-Sr Isotopic Studies of Late Mesozoic Granitoids in the Southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Petrogenesis and Tectonic Setting. *Lithos*, 104(1):216–230.doi:10.1016/j.lithos.2007.12.008
- Xu, Y.M., Jiang, S.Y., Zhu, Z.Y., et al., 2013. Geochronology, Geochemistry and Mineralogy of Ore-Bearing and Ore-Barren Intermediate-Acid Intrusive Rocks from the Jiurui Ore District, Jiangxi Province and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12):4291–4310 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.M., Jiang, S.Y., Zhu, Z.Y., et al., 2014. Petrogenesis of Late Mesozoic Granitoids and Coeval Mafic Rocks from the Jiurui District in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt of Eastern China: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 190–191:467–484.doi:10.1016/j.lithos.2013.12.022
- Yan, J., Chen, J.F., Yu, G., et al., 2003. Pb Isotopic Characteristics of Late Mesozoic Mafic Rocks from the Lower Yangtze Region: Evidence for Enriched Mantle. *Geological Journal of China Universities*, 9(2):195–206 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.Y., Jiang, S.Y., Li, L., et al., 2011. Late Mesozoic Magmatism of the Jiurui Mineralization District in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China: Precise U-Pb Ages and Geodynamic Implications. *Gondwana Research*, 20(4):831–843.doi:10.1016/j.gr.2011.03.012
- Yuan, F., Zhou, T., Liu, J., et al., 2011. Petrogenesis of Volcanic and Intrusive Rocks of the Zhuanqiao Stage, Lu-zong Basin, Yangtze Metallogenic Belt, East China: Implications for Ore Deposition. *International Geology Review*, 53(5–6):526–541.doi:10.1080/00206814.2010.496246
- Zeng, J.N., Li, J.W., Chen, J.H., et al., 2013. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Anjishan Intrusive Rocks in Ningzhen District Jiangsu, and Its Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1):57–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Yao, S.Z., Lin, X.D., et al., 1992. The Metallogenic Features of Fe and Cu (Au) in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y.S., Yao, S.Z., Zhou, Z.G., 1999. Research on Orefield Tectonics of Copper and Gold Deposits in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Yang, S.Y., et al., 2012. Mineral Chemistry, Trace Elements and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and Petrogenesis of Cailing and Furong Granites and Mafic Enclaves from the Qitianling Batholith in the Shi-Hang Zone, South China. *Gondwana Research*, 22(1):310–324.doi:10.1016/j.gr.2011.09.010

## 附中文参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌,1991.长江中下游铜铁成矿带.北京:地质出版社.
- 陈志洪,邢光福,郭坤一,等,2011.长江中下游成矿带九瑞矿集区(北部)含矿岩体的锆石U-Pb定年及其地质意义.地质学报,85(7):1146–1158.
- 丁昕,蒋少涌,倪培等,2005.江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石SIMS U-Pb年代学.高校地质学报,11(3):383–389.
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,等,2003.岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析.南京大学学报(自然科学版),39(6):844–850.
- 贾丽琼,杨丹,徐文艺,2015.江西九瑞地区东雷湾矽卡岩型铜多金属矿床锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地

- 质意义.地球学报,36(2):177—186.
- 蒋少涌,李亮,朱碧,等,2008.江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨.岩石学报,24(8):1679—1690.
- 孔凡斌,蒋少涌,徐耀明,等,2012.江西武山铜矿床海底喷流与岩浆热液叠加成矿作用:控矿地质条件,矿石结构构造与矿床地球化学制约.岩石学报,28(12):3929—3937.
- 李进文,李旭辉,裴荣富,等,2007.江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义.地质学报,81(6):801—807.
- 李亮,蒋少涌,2009.长江中下游地区九瑞矿集区邓家山花岗闪长斑岩的地球化学与成因研究.岩石学报,25(11):2877—2888.
- 刘迅,1990.江西武山铜矿田块状硫化物矿床的构造控矿机制及地球化学特征.地质学报,(1):22—32.
- 濮巍,高剑锋,赵葵东,等,2005.利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr,Sm-Nd 的方法.南京大学学报(自然科学),41(4):445—450.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等,2002.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论.地质论评,48(增刊):26—30.
- 王德滋,周新民,徐夕生,等,1992.微粒花岗岩类包体的成因.桂林冶金地质学院学报,12(3):235—241.
- 文春华,徐文艺,钟宏,等,2012.九瑞矿集区城门山斑岩型铜矿床流体包裹体研究.地质学报,86(10):1604—1620.
- 吴良士,邹晓秋,1997.江西城门山铜矿铼—锇同位素年龄研究.矿床地质,16(4):376—381.
- 徐耀明,蒋少涌,朱志勇,等,2013.江西九瑞矿集区成矿与未成矿中酸性侵入岩年代学、岩石化学、矿物化学特征的异同及地质意义.岩石学报,29(12):4291.
- 闫峻,陈江峰,喻钢,等,2003.长江中下游晚中生代中基性岩的铅同位素特征:富集地幔的证据.高校地质学报,9(2):195—206.
- 曾键年,李锦伟,陈津华,等,2013.宁镇地区安基山侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,38(1):57—67.
- 翟裕生,姚书振,林新多,等,1992.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律.北京:地质出版社.
- 翟裕生,姚书振,周宗贵,1999.长江中下游铜金矿床矿田构造.武汉:中国地质大学出版社.

附表 1 东雷湾侵入岩锆石 U-Pb 定年结果

Appendix Table 1 Results of zircon U-Pb dating of Dongleiwan samples

测点号	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(\text{Ma})$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}(\text{Ma})$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$		
				比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$		
DLW-03 花岗闪长斑岩																					
DLW-03-01	217	286	0.76	0.04914	0.00435	0.16005	0.01412	0.02367	0.00043	155	201	151	12	151	3	151	12	151	3		
DLW-03-02	281	351	0.80	0.04930	0.00402	0.15441	0.01254	0.02276	0.00041	162	185	146	11	145	3	145	11	145	3		
DLW-03-03	208	294	0.71	0.04926	0.00513	0.15907	0.01645	0.02348	0.00051	160	234	150	14	150	3	150	14	150	3		
DLW-03-04	197	277	0.71	0.04917	0.00623	0.15126	0.01912	0.02237	0.00043	156	266	143	17	143	3	143	17	143	3		
DLW-03-05	336	375	0.90	0.04955	0.00453	0.15543	0.01416	0.02279	0.00041	174	208	147	12	145	3	145	12	145	3		
DLW-03-06	333	349	0.95	0.04951	0.00516	0.15732	0.01628	0.02308	0.00047	172	234	148	14	147	3	147	14	147	3		
DLW-03-07	329	334	0.99	0.04988	0.00443	0.15470	0.01367	0.02254	0.00042	189	202	146	12	144	3	144	12	144	3		
DLW-03-08	214	284	0.75	0.04925	0.00471	0.15948	0.01519	0.02353	0.00044	160	217	150	13	150	3	150	13	150	3		
DLW-03-09	372	414	0.90	0.04965	0.00848	0.15633	0.02663	0.02289	0.00049	179	324	147	23	146	3	146	23	146	3		
DLW-03-10	280	338	0.83	0.04910	0.00474	0.16378	0.01570	0.02420	0.00049	153	219	154	14	154	3	154	14	154	3		
DLW-03-11	491	425	1.15	0.04902	0.00332	0.15979	0.01081	0.02364	0.00042	149	153	151	9	151	3	151	9	151	3		
DLW-03-12	167	230	0.73	0.04925	0.00650	0.15894	0.02086	0.02341	0.00051	160	272	150	18	149	3	149	18	149	3		
DLW-03-13	431	433	1.00	0.04890	0.00388	0.15887	0.01256	0.02357	0.00045	143	179	150	11	150	3	150	11	150	3		
DLW-03-14	263	348	0.76	0.04956	0.00578	0.15602	0.01816	0.02284	0.00044	174	259	147	16	146	3	146	16	146	3		
DLW-03-15	302	360	0.84	0.04929	0.00371	0.16384	0.01231	0.02411	0.00043	162	171	154	11	154	3	154	11	154	3		
DLW-03-16	254	343	0.74	0.04913	0.01553	0.15934	0.05022	0.02352	0.00068	154	538	150	44	150	4	150	44	150	4		
DLW-03-17	188	247	0.76	0.04883	0.00635	0.16182	0.02093	0.02404	0.00053	140	265	152	18	153	3	153	18	153	3		
DLW-09 石英闪长玢岩																					
DLW-09-01	285	345	0.83	0.04912	0.00440	0.15879	0.01416	0.02347	0.00046	154	203	150	12	150	3	150	12	150	3		
DLW-09-02	760	787	0.97	0.04885	0.00232	0.15492	0.00738	0.02301	0.00038	141	108	146	6	147	2	147	6	147	2		
DLW-09-03	175	422	0.41	0.04922	0.00355	0.15364	0.01106	0.02265	0.00039	158	164	145	10	144	2	144	10	144	2		
DLW-09-04	254	316	0.80	0.04933	0.00479	0.15571	0.01507	0.02291	0.00044	164	221	147	13	146	3	146	13	146	3		
DLW-09-05	183	314	0.58	0.04921	0.00429	0.15250	0.01326	0.02248	0.00040	158	198	144	12	143	3	143	12	143	3		
DLW-09-06	146	235	0.62	0.04924	0.00653	0.16007	0.02110	0.02358	0.00053	159	273	151	18	150	3	150	18	150	3		
DLW-09-07	429	441	0.97	0.04953	0.00318	0.15756	0.01011	0.02309	0.00039	173	147	149	9	147	2	147	9	147	2		
DLW-09-08	237	315	0.75	0.04949	0.00627	0.15029	0.01889	0.02205	0.00053	171	269	142	17	141	3	141	17	141	3		
DLW-09-09	273	473	0.58	0.04883	0.00735	0.15413	0.02317	0.02290	0.00044	140	298	146	20	146	3	146	20	146	3		
DLW-09-10	359	379	0.95	0.04974	0.01793	0.15377	0.05529	0.02244	0.00072	183	620	145	49	143	5	143	49	143	5		
DLW-09-11	211	277	0.76	0.04915	0.00561	0.15402	0.01751	0.02279	0.00046	155	253	145	15	145	3	145	15	145	3		
DLW-09-12	334	419	0.80	0.04848	0.00351	0.15387	0.01115	0.02304	0.00039	123	163	145	10	147	2	147	10	147	2		
DLW-09-13	113	226	0.50	0.04930	0.00723	0.15546	0.02268	0.02302	0.00050	162	295	147	20	147	3	147	20	147	3		
DLW-09-14	227	403	0.56	0.05056	0.00527	0.15302	0.01600	0.02266	0.00047	198	236	145	14	144	3	144	14	144	3		
DLW-09-15	537	457	1.18	0.04947	0.00389	0.15323	0.01201	0.02247	0.00043	170	179	145	11	143	3	143	11	143	3		
DLW-09-16	129	293	0.44	0.04968	0.00869	0.15362	0.02680	0.02250	0.00049	180	330	145	24	143	3	143	24	143	3		

续附表 1

测点号	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(\text{Ma})$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}(\text{Ma})$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$	
				比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$
DLW-09 石英闪长玢岩													
DLW-09-17	152	267	0.57	0.04819	0.00682	0.15126	0.02130	0.02277	0.00052	109	284	143	145
DLW-09-18	338	318	1.07	0.04923	0.00544	0.15525	0.01706	0.02303	0.00047	159	245	147	147
DLW-09-19	289	342	0.84	0.04927	0.00492	0.15572	0.01548	0.02293	0.00047	161	224	147	146
DLW-09-20	370	588	0.63	0.05004	0.00529	0.15478	0.01633	0.02244	0.00043	197	237	146	143
DLW-09-21	567	564	1.01	0.04987	0.00620	0.15355	0.01906	0.02239	0.00041	189	264	145	143
DLW-09-22	224	443	0.51	0.04955	0.00365	0.15641	0.01151	0.02298	0.00041	174	168	148	146
DLW-12 花岗闪长斑岩													
DLW-12-01	342	394	0.87	0.04957	0.00525	0.15962	0.01672	0.02337	0.00057	175	238	150	149
DLW-12-02	232	298	0.78	0.04920	0.00548	0.16115	0.01789	0.02376	0.00048	157	247	152	151
DLW-12-03	411	377	1.09	0.04903	0.00427	0.16005	0.01384	0.02368	0.00049	149	197	151	151
DLW-12-04	186	242	0.77	0.04931	0.00700	0.15737	0.02226	0.02315	0.00051	163	285	148	148
DLW-12-05	277	299	0.93	0.04921	0.00519	0.15897	0.01670	0.02343	0.00047	158	237	150	149
DLW-12-06	301	317	0.95	0.04920	0.00489	0.15559	0.01542	0.02294	0.00045	157	222	147	146
DLW-12-07	378	351	1.08	0.04886	0.00460	0.15530	0.01458	0.02305	0.00045	141	214	147	147
DLW-12-08	211	296	0.71	0.04925	0.00555	0.15743	0.01764	0.02319	0.00050	160	250	148	148
DLW-12-09	291	310	0.94	0.04930	0.00475	0.15757	0.01515	0.02318	0.00044	162	219	149	148
DLW-12-10	277	293	0.95	0.04939	0.00560	0.16224	0.01830	0.02383	0.00051	166	252	153	152
DLW-12-11	534	432	1.24	0.04940	0.00347	0.16219	0.01139	0.02381	0.00043	167	160	153	152
DLW-12-12	277	296	0.94	0.04972	0.00569	0.15602	0.01779	0.02275	0.00048	182	254	147	146
DLW-12-13	189	261	0.72	0.04945	0.00675	0.15919	0.02163	0.02336	0.00053	169	279	150	149
DLW-12-14	338	342	0.99	0.04919	0.00488	0.15576	0.01541	0.02297	0.00045	157	222	147	146
DLW-12-15	541	524	1.03	0.04911	0.00420	0.15420	0.01313	0.02278	0.00047	153	194	146	145
DLW-12-16	299	327	0.91	0.04948	0.00506	0.15687	0.01598	0.02299	0.00045	171	229	148	147
DLW-12-17	190	234	0.81	0.04897	0.01059	0.15537	0.03337	0.02302	0.00073	146	386	147	147
DLW-12-18	153	212	0.72	0.04890	0.00923	0.15178	0.02847	0.02252	0.00063	143	348	143	144
DLW-12-19	330	358	0.92	0.04916	0.00488	0.15534	0.01538	0.02292	0.00045	155	222	147	146
DLW-12-20	138	187	0.74	0.04900	0.00865	0.15426	0.02712	0.02283	0.00055	148	326	146	146
DLW-12-21	106	181	0.59	0.04876	0.00896	0.15845	0.02900	0.02357	0.00057	136	338	149	150
DLW-12-22	247	243	1.02	0.04882	0.00658	0.15729	0.02112	0.02337	0.00051	139	275	148	149
DLW-12-23	186	217	0.86	0.04915	0.00751	0.15668	0.02385	0.02313	0.00051	155	303	148	147
DLW-12-24	264	269	0.98	0.04909	0.00737	0.15766	0.02352	0.02330	0.00055	152	302	149	148
DLW-15 花岗闪长斑岩													
DLW-15-01	288	306	0.94	0.04939	0.00559	0.15511	0.01750	0.02278	0.00047	166	251	146	145
DLW-15-02	271	324	0.83	0.04957	0.00989	0.15585	0.03101	0.02281	0.00056	175	365	147	145
DLW-15-03	378	391	0.97	0.04917	0.00554	0.16159	0.01808	0.02385	0.00055	156	250	152	152

续附表 1

测点号	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(\text{Ma})$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$	
				比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$
DLW-15 花岗闪长斑岩													
DLW-15-04	258	353	0.73	0.049 33	0.004 62	0.163 56	0.015 28	0.024 05	0.000 47	164	212	154	13
DLW-15-05	268	300	0.89	0.050 05	0.005 64	0.156 45	0.017 57	0.022 68	0.000 46	197	253	148	15
DLW-15-06	321	350	0.92	0.049 58	0.005 17	0.155 63	0.016 19	0.022 77	0.000 44	175	234	147	14
DLW-15-07	325	399	0.81	0.048 94	0.004 84	0.160 93	0.015 83	0.023 86	0.000 51	145	221	152	14
DLW-15-08	168	246	0.68	0.049 37	0.007 38	0.158 96	0.023 64	0.023 36	0.000 55	165	301	150	21
DLW-15-09	202	250	0.81	0.048 99	0.009 49	0.153 58	0.029 54	0.022 75	0.000 66	147	353	145	26
DLW-15-10	227	317	0.72	0.049 23	0.011 21	0.154 11	0.034 96	0.022 71	0.000 62	159	403	146	31
DLW-15-11	235	314	0.75	0.048 14	0.007 76	0.152 39	0.024 42	0.022 96	0.000 60	106	300	144	22
DLW-15-12	212	280	0.75	0.048 88	0.006 70	0.150 37	0.020 53	0.022 32	0.000 49	142	277	142	18
DLW-15-13	313	364	0.86	0.049 35	0.008 35	0.155 04	0.026 16	0.022 79	0.000 50	164	319	146	23
DLW-15-14	170	226	0.75	0.049 35	0.008 48	0.157 04	0.026 88	0.023 08	0.000 56	164	324	148	24
DLW-15-15	369	418	0.88	0.049 00	0.005 65	0.152 31	0.017 46	0.022 55	0.000 50	148	250	144	15
DLW-15-16	349	355	0.98	0.049 27	0.009 72	0.150 12	0.029 53	0.022 10	0.000 51	161	360	142	26
DLW-15-17	175	290	0.60	0.048 88	0.006 27	0.153 17	0.019 58	0.022 73	0.000 50	142	264	145	17
DLW-15-18	147	221	0.66	0.048 76	0.008 02	0.160 36	0.026 27	0.023 86	0.000 58	136	309	151	23
DLW-15-19	312	353	0.88	0.048 39	0.005 87	0.154 78	0.018 65	0.023 20	0.000 54	118	251	146	16
DLW-15-20	235	283	0.83	0.048 99	0.006 41	0.152 69	0.019 92	0.022 61	0.000 48	147	269	144	18
DLW-16 铁镁质包体													
DLW-16-01	238	265	0.90	0.049 09	0.007 14	0.161 50	0.023 39	0.023 86	0.000 55	152	292	152	20
DLW-16-02	190	253	0.75	0.049 14	0.007 00	0.154 64	0.021 94	0.022 82	0.000 51	155	286	146	19
DLW-16-03	278	309	0.90	0.048 29	0.006 51	0.154 68	0.020 74	0.023 24	0.000 54	114	269	146	18
DLW-16-04	258	311	0.83	0.049 36	0.005 76	0.156 10	0.018 13	0.022 94	0.000 49	165	256	147	16
DLW-16-05	209	296	0.71	0.049 60	0.008 36	0.159 19	0.026 63	0.023 32	0.000 65	176	320	150	23
DLW-16-06	283	361	0.78	0.049 00	0.005 55	0.160 75	0.018 13	0.023 79	0.000 52	148	248	151	16
DLW-16-07	209	310	0.67	0.048 79	0.011 41	0.161 83	0.037 76	0.024 06	0.000 60	138	408	152	33
DLW-16-08	380	348	1.09	0.049 83	0.016 61	0.154 82	0.051 45	0.022 54	0.000 71	187	572	146	45
DLW-16-09	255	0.97	0.049 66	0.006 83	0.154 19	0.021 14	0.022 52	0.000 49	179	281	146	19	144
DLW-16-10	225	313	0.72	0.049 01	0.005 93	0.154 54	0.018 62	0.022 88	0.000 49	148	256	146	16
DLW-16-11	283	330	0.86	0.049 24	0.005 99	0.150 59	0.018 24	0.022 19	0.000 48	159	258	142	16
DLW-16-12	346	366	0.94	0.049 49	0.005 05	0.150 77	0.015 35	0.022 10	0.000 44	171	229	143	14
DLW-16-13	265	331	0.80	0.049 34	0.005 49	0.156 39	0.017 33	0.023 00	0.000 49	164	247	148	15
DLW-16-14	295	320	0.92	0.049 17	0.013 59	0.153 83	0.042 38	0.022 70	0.000 64	156	472	145	37
DLW-16-15	290	378	0.77	0.049 05	0.005 62	0.158 32	0.018 03	0.023 42	0.000 52	150	251	149	16
DLW-16-16	312	351	0.89	0.049 49	0.007 79	0.152 72	0.023 97	0.022 38	0.000 49	171	310	144	21
DLW-16-17	269	357	0.75	0.049 50	0.005 09	0.155 95	0.015 99	0.022 85	0.000 46	172	230	147	14

续附表 1

测点号	Th( $10^{-6}$ )	U( $10^{-6}$ )	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(\text{Ma})$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}(\text{Ma})$	
				比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$	年龄	$1\sigma$
<b>DLW-17 铁镁质包体</b>													
DLW-17-01	210	282	0.75	0.049 07	0.003 96	0.156 16	0.012 55	0.023 11	0.000 42	151	183	147	3
DLW-17-02	240	294	0.82	0.049 21	0.007 00	0.160 10	0.022 69	0.023 61	0.000 49	158	285	151	3
DLW-17-03	346	341	1.02	0.049 43	0.003 52	0.158 67	0.011 25	0.023 30	0.000 42	168	162	150	3
DLW-17-04	375	366	1.02	0.050 03	0.003 67	0.156 69	0.011 44	0.022 75	0.000 41	196	167	148	3
DLW-17-05	248	286	0.87	0.049 04	0.004 01	0.156 30	0.012 73	0.023 16	0.000 41	150	185	147	3
DLW-17-06	149	230	0.65	0.049 84	0.005 29	0.157 19	0.016 60	0.022 91	0.000 46	188	238	148	3
DLW-17-07	223	318	0.70	0.051 12	0.005 15	0.156 91	0.015 69	0.022 30	0.000 47	246	230	148	3
DLW-17-08	164	238	0.69	0.049 14	0.005 66	0.156 74	0.017 91	0.023 16	0.000 50	155	252	148	3
DLW-17-09	240	341	0.70	0.049 67	0.003 76	0.156 55	0.011 76	0.022 87	0.000 43	180	173	148	3
DLW-17-10	1342	693	1.94	0.049 27	0.002 43	0.155 21	0.007 61	0.022 87	0.000 38	161	113	147	2
DLW-17-11	393	368	1.07	0.048 77	0.005 32	0.161 64	0.017 54	0.024 04	0.000 45	137	241	152	3
DLW-17-12	283	325	0.87	0.049 43	0.008 32	0.158 97	0.026 66	0.023 33	0.000 48	168	319	150	3
DLW-17-13	507	427	1.19	0.050 11	0.009 41	0.157 01	0.029 39	0.022 73	0.000 47	200	349	148	3
DLW-17-14	370	348	1.06	0.051 42	0.003 55	0.159 01	0.010 89	0.022 43	0.000 41	260	159	150	10
DLW-17-15	227	298	0.76	0.049 54	0.006 27	0.156 22	0.019 69	0.022 88	0.000 46	173	269	147	3
DLW-17-16	227	301	0.76	0.049 90	0.004 30	0.160 58	0.013 74	0.023 36	0.000 44	190	196	151	12
DLW-17-17	221	292	0.76	0.049 91	0.006 43	0.156 16	0.019 97	0.022 70	0.000 49	191	274	147	18
DLW-17-18	365	251	1.45	0.048 64	0.005 43	0.158 02	0.017 50	0.023 60	0.000 48	131	244	149	15
DLW-17-19	151	210	0.72	0.048 96	0.018 67	0.160 06	0.060 84	0.023 74	0.000 79	146	647	151	5
DLW-17-20	297	316	0.94	0.049 43	0.003 95	0.159 33	0.012 64	0.023 38	0.000 44	168	182	150	11
<b>DLW-22 花岗闪长斑岩风化物</b>													
DLW-22-01	130	591	0.22	0.049 09	0.003 25	0.156 31	0.010 23	0.023 10	0.000 43	152	150	147	3
DLW-22-02	60	320	0.19	0.049 10	0.009 15	0.158 79	0.029 47	0.023 46	0.000 55	153	345	150	3
DLW-22-03	82	233	0.35	0.049 50	0.007 18	0.159 05	0.022 89	0.023 31	0.000 55	172	291	150	20
DLW-22-04	244	406	0.60	0.049 59	0.005 01	0.154 16	0.015 42	0.022 55	0.000 47	176	226	146	14
DLW-22-05	104	246	0.42	0.049 22	0.011 10	0.153 86	0.034 58	0.022 68	0.000 57	158	401	145	30
DLW-22-06	220	401	0.55	0.049 13	0.004 53	0.157 38	0.014 37	0.023 24	0.000 48	154	209	148	13
DLW-22-07	145	291	0.50	0.049 17	0.005 34	0.157 23	0.016 91	0.023 19	0.000 48	156	244	148	15
DLW-22-08	230	270	0.85	0.049 35	0.005 23	0.161 79	0.017 04	0.023 78	0.000 47	164	238	152	15
DLW-22-09	94	221	0.42	0.050 63	0.014 54	0.156 84	0.044 88	0.022 47	0.000 63	224	500	148	39
DLW-22-10	74	184	0.40	0.048 97	0.011 41	0.152 48	0.035 39	0.022 59	0.000 59	146	409	144	31
DLW-22-11	384	565	0.68	0.049 20	0.003 31	0.152 58	0.010 25	0.022 50	0.000 41	157	153	144	9
DLW-22-12	149	292	0.51	0.048 91	0.006 07	0.150 05	0.018 49	0.022 26	0.000 50	144	260	142	16
DLW-22-13	246	401	0.61	0.048 77	0.004 27	0.146 93	0.021 83	0.021 86	0.000 41	137	198	139	11
DLW-22-14	119	260	0.46	0.049 04	0.006 61	0.153 63	0.020 57	0.022 73	0.000 52	150	275	145	18
DLW-22-15	85	292	0.29	0.048 64	0.006 62	0.145 49	0.019 67	0.021 71	0.000 51	131	272	138	17
DLW-22-16	140	313	0.45	0.048 90	0.005 97	0.146 39	0.017 76	0.021 72	0.000 49	143	259	139	16
DLW-22-17	99	245	0.41	0.048 79	0.007 29	0.145 28	0.021 57	0.021 61	0.000 52	138	295	138	19

附表 2 东雷湾侵入岩长石斑晶化学组成(%)与结构计算

Appendix Table 2 Electron microprobe analyses and structural formula of feldspar from the Dongleewan intrusive rocks

样品号	花岗闪长斑岩						石英闪长玢岩						DLW-07					
	DLW-01			DLW-03			DLW-13			DLW-05			DLW-07			DLW-07		
SiO <sub>2</sub>	58.78	60.39	60.95	60.53	65.07	64.83	60.63	59.82	60.56	61.02	61.32	62.27	62.00	61.34	62.86	62.72		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.39	24.30	24.05	24.01	18.38	18.29	24.25	24.95	24.19	24.14	23.79	22.89	23.39	23.78	22.59	23.00		
FeO	0.20	0.22	0.22	0.16	0.09	0.07	0.21	0.20	0.21	0.18	0.20	0.09	0.20	0.19	0.19	0.16		
CaO	8.04	6.57	6.35	6.15	0.12	0.16	6.22	7.13	6.16	6.22	5.80	4.79	5.52	5.98	4.50	5.04		
Na <sub>2</sub> O	6.56	7.01	7.18	7.30	2.30	2.36	7.46	6.67	7.31	7.34	7.40	7.93	7.49	7.27	8.07	7.86		
K <sub>2</sub> O	0.41	0.43	0.66	0.63	12.79	13.10	0.35	0.54	0.61	0.64	0.60	0.77	0.67	0.63	0.87	0.80		
Sum	99.38	98.92	99.42	98.78	98.75	98.81	99.13	99.31	99.05	99.55	99.10	98.73	99.27	99.19	99.07	99.57		
Si	10.58	10.85	10.91	10.90	12.02	12.00	10.87	10.73	10.88	10.91	10.99	11.17	11.08	10.98	11.24	11.17		
Al	5.38	5.15	5.07	5.10	4.00	3.99	5.13	5.28	5.12	5.08	5.02	4.84	4.92	5.02	4.76	4.83		
Fe	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02		
Ca	1.55	1.27	1.22	1.19	0.02	0.03	1.19	1.37	1.19	1.19	1.11	0.92	1.06	1.15	0.86	0.96		
Na	2.29	2.44	2.49	2.55	0.82	0.85	2.60	2.32	2.55	2.54	2.57	2.76	2.59	2.52	2.80	2.71		
K	0.09	0.10	0.15	0.14	3.01	3.09	0.08	0.12	0.14	0.14	0.14	0.18	0.15	0.14	0.20	0.18		
An	39.4	33.2	31.5	30.6	0.6	0.8	30.9	35.9	30.6	30.7	29.1	23.9	27.8	30.1	22.3	24.9		
Ab	58.2	64.2	64.5	65.7	21.3	21.3	67.1	60.8	65.7	65.6	67.3	71.6	68.2	66.2	72.5	70.3		
Or	2.4	2.6	3.9	3.7	78.1	77.9	2.1	3.3	3.6	3.7	3.6	4.6	4.0	3.8	5.2	4.7		
样品号	石英闪长玢岩						铁镁质包体						DLW-17					
	DLW-07			DLW-09			DLW-16			DLW-07			DLW-17			DLW-17		
SiO <sub>2</sub>	60.77	61.19	62.23	62.13	62.00	62.20	61.63	64.72	61.72	64.51	63.97	64.32	65.69	65.91	64.90	65.90		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.94	23.97	23.11	23.57	23.63	23.08	23.43	22.42	23.66	18.22	18.46	18.26	18.20	18.07	18.33	18.10		
FeO	0.20	0.13	0.15	0.11	0.12	0.05	0.16	0.21	0.20	0.20	0.08	0.12	0.08	0.17	0.03	0.09		
CaO	6.26	6.01	5.17	5.60	5.67	5.18	5.36	3.84	5.64	0.13	0.12	0.08	0.03	0.05	0.00	0.03		
Na <sub>2</sub> O	7.29	7.19	7.43	7.53	7.48	7.61	7.69	8.72	7.64	1.69	2.25	1.60	1.35	1.34	0.70	1.43		
K <sub>2</sub> O	0.57	0.56	0.75	0.68	0.65	0.72	0.74	0.45	0.50	14.10	12.54	14.04	14.88	15.06	15.84	14.90		
Sum	99.01	99.05	98.84	99.63	99.54	98.83	99.01	100.36	99.35	98.87	97.43	98.43	100.24	100.60	99.80	100.44		
Si	10.92	10.96	11.15	11.06	11.14	11.05	11.14	11.37	11.02	11.99	11.97	11.99	12.05	12.06	12.00	12.06		
Al	5.07	5.06	4.88	4.95	4.96	4.87	4.95	4.64	4.98	3.99	4.07	4.01	3.93	3.90	4.00	3.90		
Fe	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00	0.01		
Ca	1.20	1.15	0.99	1.07	1.08	0.99	1.03	0.72	1.08	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00		
Na	2.54	2.50	2.58	2.60	2.58	2.64	2.67	2.97	2.65	0.61	0.82	0.58	0.48	0.47	0.25	0.51		
K	0.13	0.13	0.17	0.16	0.15	0.16	0.17	0.10	0.11	3.34	2.99	3.34	3.48	3.52	3.74	3.48		
An	31.1	30.5	26.5	28.0	28.4	26.1	26.6	19.1	28.1	0.7	0.6	0.4	0.2	0.2	0.0	0.1		
Ab	65.6	66.1	68.9	68.0	67.8	69.5	69.0	78.3	68.9	15.3	21.3	14.7	12.1	11.8	6.3	12.7		
Or	3.3	3.4	4.6	4.1	3.9	4.3	4.1	2.7	2.9	84.0	78.1	84.9	87.7	87.9	93.7	87.1		

附表 3 东雷湾侵入岩角闪石化学组成(%)与结构计算

Appendix Table 3 Representative electron microprobe analyses (%) and structural formula of amphibole from Dongleiwan intrusive rocks

元素	DLW-01						DLW-03					
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	Si	Al(iv)
SiO <sub>2</sub>	44.30	43.35	44.46	42.59	44.77	44.69	44.19	44.95	44.18	44.93	44.31	45.98
TiO <sub>2</sub>	1.27	1.28	1.20	1.76	1.37	1.32	1.53	1.31	1.43	1.43	1.16	1.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.54	10.36	10.90	12.86	9.26	9.13	9.55	8.74	9.62	9.11	9.49	8.14
FeO	16.77	17.88	13.72	15.99	17.25	17.16	17.18	16.85	17.48	17.32	16.93	16.66
MnO	0.39	0.39	0.30	0.37	0.38	0.41	0.44	0.33	0.40	0.43	0.42	0.43
MgO	11.15	10.91	12.42	10.38	10.87	11.00	10.75	11.51	10.60	10.92	10.83	11.74
CaO	11.24	10.42	11.45	11.38	11.25	11.12	11.32	11.33	11.15	11.39	11.30	11.35
Na <sub>2</sub> O	1.73	1.57	1.97	2.14	1.62	1.46	1.69	1.64	1.54	1.61	1.65	1.52
K <sub>2</sub> O	0.94	0.86	0.68	0.81	1.10	0.99	1.05	0.85	1.12	1.19	1.01	0.81
Total	97.31	97.00	97.11	98.28	97.85	97.27	97.70	97.51	97.40	98.32	97.36	97.73
基于 23 个氧的结构计算												
Si	6.584	6.401	6.535	6.276	6.640	6.637	6.576	6.658	6.582	6.647	6.604	6.774
Al(iv)	1.416	1.599	1.465	1.724	1.360	1.363	1.424	1.342	1.418	1.353	1.396	6.586
T 总和	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	1.414
Al (vi)	0.254	0.203	0.423	0.510	0.258	0.235	0.251	0.183	0.271	0.236	0.271	0.226
Ti	0.141	0.142	0.133	0.195	0.153	0.147	0.172	0.146	0.147	0.159	0.160	0.160
Fe(iii)	0.625	1.208	0.481	0.467	0.550	0.686	0.534	0.637	0.632	0.504	0.530	0.722
Fe(ii)	1.459	0.999	1.204	1.503	1.589	1.444	1.604	1.450	1.546	1.639	1.581	1.437
Mn	0.049	0.048	0.037	0.046	0.048	0.051	0.055	0.042	0.050	0.054	0.053	0.047
Mg	2.471	2.400	2.722	2.279	2.402	2.436	2.384	2.541	2.354	2.409	2.405	2.553
C 总和	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ca	1.789	1.647	1.803	1.797	1.769	1.765	1.805	1.798	1.780	1.805	1.804	1.792
Na	0.211	0.353	0.197	0.203	0.213	0.231	0.195	0.202	0.220	0.195	0.196	0.208
B 总和	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.287	0.095	0.364	0.407	0.252	0.190	0.292	0.269	0.226	0.226	0.229	0.224
K	0.178	0.162	0.128	0.153	0.207	0.188	0.199	0.161	0.213	0.224	0.192	0.153
A 总和	0.465	0.257	0.492	0.560	0.459	0.378	0.491	0.430	0.440	0.490	0.471	0.377
总和	15.465	15.257	15.492	15.560	15.459	15.378	15.491	15.430	15.440	15.490	15.471	15.377
压力 (kbar)	4.9	5.6	6.0	7.6	4.7	4.6	5.0	4.2	5.0	4.6	4.9	3.7

注: 表中 T 总和, C 总和, B 总和, A 总和分别代表角闪石结构式中 T, C, B, A 各位置中阳离子的总和。

附表 4 东雷湾侵入岩黑云母化学组成(%)与结构计算

Appendix Table 4 Representative electron microprobe analyses (%) and structural formula of biotite from Dongleiwan intrusive rocks

样品号	花岗闪长斑岩												铁镁质包体		
	DLW-01			DLW-03			DLW-04			DLW-13			DLW-15		
SiO <sub>2</sub>	37.48	37.30	38.04	36.64	37.16	37.36	36.99	37.30	36.66	37.33	37.05	36.86	37.31	37.48	37.42
TiO <sub>2</sub>	3.75	4.36	3.73	4.11	3.97	3.59	3.86	3.85	3.68	3.94	4.03	3.93	4.02	4.14	4.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.70	13.81	13.97	14.20	13.89	13.81	13.44	13.59	14.02	13.65	14.00	13.76	13.63	13.42	13.45
FeO	17.90	17.82	16.56	17.85	18.13	17.99	18.86	19.57	19.25	18.84	18.54	19.15	18.27	18.57	19.31
MnO	0.20	0.26	0.27	0.23	0.24	0.26	0.23	0.27	0.26	0.27	0.24	0.31	0.30	0.20	0.23
MgO	12.89	12.53	13.18	12.66	12.38	12.52	12.09	11.88	13.08	12.36	12.31	12.36	12.53	12.41	12.40
CaO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.13	0.12	0.11	0.24	0.18	0.22	0.24	0.20	0.21	0.23	0.17	0.17	0.18	0.12
K <sub>2</sub> O	9.53	9.61	9.40	9.44	9.16	8.97	9.53	9.30	8.66	9.59	9.04	9.22	9.34	9.45	9.37
Total	95.59	95.82	95.27	95.24	95.20	94.72	95.24	96.03	95.87	96.20	95.45	95.40	95.96	96.37	96.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.00	7.11	5.85	7.90	6.90	6.32	8.64	7.88	8.51	8.60	6.80	8.50	7.01	7.53	8.08
FeO	10.71	11.43	11.30	10.74	11.92	12.30	11.09	12.48	11.60	11.10	12.42	11.50	11.96	11.80	12.04
基于 22 个氧的结构计算															
Si	5.556	5.533	5.638	5.459	5.547	5.600	5.532	5.549	5.433	5.523	5.524	5.480	5.566	5.539	5.538
Al(iv)	2.393	2.414	2.362	2.494	2.443	2.400	2.368	2.383	2.449	2.380	2.460	2.410	2.345	2.400	2.374
T <sup>-</sup> 总和	7.950	7.948	8.000	7.952	7.990	8.000	7.900	7.931	7.882	7.903	7.985	7.890	7.961	7.905	7.883
Al(vi)	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.418	0.487	0.416	0.461	0.445	0.404	0.434	0.431	0.411	0.439	0.453	0.439	0.451	0.462	0.445
Fe <sup>3+</sup>	0.892	0.794	0.653	0.886	0.775	0.713	0.972	0.882	0.949	0.958	0.763	0.951	0.787	0.840	0.900
Fe <sup>2+</sup>	1.328	1.418	1.400	1.338	1.489	1.542	1.387	1.552	1.437	1.374	1.549	1.430	1.492	1.464	1.490
Mn	0.025	0.032	0.033	0.028	0.030	0.034	0.029	0.033	0.033	0.030	0.039	0.033	0.025	0.029	0.030
Mg	2.849	2.770	2.913	2.811	2.756	2.798	2.695	2.634	2.889	2.727	2.736	2.738	2.749	2.771	2.737
Ca	0.000	0.000	0.001	0.000	0.007	0.007	0.006	0.010	0.000	0.002	0.007	0.000	0.000	0.011	0.005
Fe <sup>3+</sup> /(Fe <sup>3+</sup> +Fe <sup>2+</sup> )	0.40	0.36	0.32	0.40	0.34	0.32	0.41	0.36	0.40	0.41	0.33	0.40	0.35	0.36	0.38
O-总和	5.512	5.500	5.494	5.525	5.502	5.536	5.523	5.540	5.728	5.530	5.534	5.605	5.517	5.562	5.602
Na	0.042	0.039	0.034	0.032	0.069	0.053	0.064	0.068	0.057	0.061	0.066	0.060	0.049	0.048	0.052
K	1.801	1.818	1.776	1.795	1.744	1.715	1.817	1.765	1.637	1.809	1.720	1.749	1.777	1.788	1.768
I-总和	1.843	1.857	1.810	1.827	1.812	1.768	1.881	1.833	1.694	1.871	1.786	1.809	1.826	1.837	1.758

注:表中 T-总和,O-总和,I-总和分别代表黑云母结构式中 T,O,I各位置中阳离子的总和。

附表 5 东雷湾侵入岩锆石原位 Lu-Hf 同位素 LA-MC-ICP-MS 分析结果  
Appendix Table 5 LA-MC-ICP-MS in situ analysis of zircon Lu-Hf isotopic composition of the Dongleiwan intrusive rocks

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(\tau)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{I},\text{Hf}}$
DLW-03 花岗闪长斑岩											
DLW-03-01	154	0.025 202	0.000 652	0.282 503	0.000 017	-10.0	-6.6	0.6	1 050	1 592	-0.98
DLW-03-02	146	0.034 589	0.000 895	0.282 552	0.000 019	-8.2	-5.1	0.7	988	1 488	-0.97
DLW-03-03	150	0.043 551	0.001 147	0.282 526	0.000 021	-9.1	-5.9	0.7	1 030	1 545	-0.97
DLW-03-04	150	0.017 567	0.000 463	0.282 556	0.000 020	-8.1	-4.8	0.7	971	1 474	-0.99
DLW-03-05	151	0.027 937	0.000 802	0.282 532	0.000 019	-8.9	-5.7	0.7	1 013	1 529	-0.98
DLW-03-06	154	0.035 792	0.001 029	0.282 566	0.000 019	-7.7	-4.4	0.7	971	1 453	-0.97
DLW-03-07	150	0.033 547	0.000 844	0.282 545	0.000 017	-8.5	-5.2	0.6	996	1 501	-0.97
DLW-03-08	146	0.022 431	0.000 584	0.282 555	0.000 020	-8.1	-5.0	0.7	976	1 481	-0.98
DLW-03-09	144	0.032 904	0.000 866	0.282 584	0.000 021	-7.1	-4.0	0.7	943	1 419	-0.97
DLW-03-10	147	0.026 820	0.000 703	0.282 521	0.000 018	-9.3	-6.1	0.6	1 026	1 556	-0.98
DLW-03-11	143	0.034 476	0.000 882	0.282 527	0.000 020	-9.1	-6.0	0.7	1 022	1 546	-0.97
DLW-03-12	145	0.026 222	0.000 722	0.282 479	0.000 018	-10.8	-7.7	0.6	1 085	1 651	-0.98
DLW-03-13	145	0.023 379	0.000 589	0.282 534	0.000 018	-8.9	-5.7	0.6	1 005	1 528	-0.98
DLW-03-14	151	0.031 240	0.000 797	0.282 502	0.000 019	-10.0	-6.7	0.7	1 055	1 597	-0.98
DLW-03-15	150	0.021 896	0.000 570	0.282 526	0.000 018	-9.2	-5.9	0.6	1 015	1 542	-0.98
DLW-03-16	150	0.044 035	0.001 385	0.282 472	0.000 027	-11.1	-7.9	1.0	1 114	1 667	-0.96
DLW-03-17	153	0.033 806	0.000 911	0.282 534	0.000 020	-8.9	-5.6	0.7	1 013	1 525	-0.97
DLW-09 石英闪长玢岩											
DLW-09-01	150	0.030 535	0.000 834	0.282 567	0.000 020	-7.7	-4.4	0.7	964	1 452	-0.98
DLW-09-02	146	0.041 917	0.001 081	0.282 468	0.000 019	-11.2	-8.1	0.7	1 111	1 676	-0.97
DLW-09-03	145	0.025 257	0.000 657	0.282 504	0.000 019	-9.9	-6.8	0.7	1 048	1 594	-0.98
DLW-09-04	146	0.029 992	0.001 026	0.282 579	0.000 020	-7.3	-4.1	0.7	953	1 428	-0.97
DLW-09-05	148	0.039 635	0.001 032	0.282 547	0.000 019	-8.4	-5.2	0.7	998	1 499	-0.97
DLW-09-06	141	0.040 085	0.001 065	0.282 519	0.000 017	-9.4	-6.4	0.6	1 038	1 565	-0.97
DLW-09-07	150	0.035 857	0.000 977	0.282 542	0.000 018	-8.6	-5.4	0.6	1 004	1 509	-0.97
DLW-09-08	144	0.019 834	0.000 562	0.282 519	0.000 018	-9.4	-6.3	0.6	1 025	1 562	-0.98
DLW-09-09	146	0.030 497	0.000 760	0.282 245	0.000 017	-19.1	-15.9	0.6	1 412	2 168	-0.98
DLW-09-10	143	0.037 645	0.000 992	0.282 527	0.000 020	-9.1	-6.0	0.7	1 025	1 546	-0.97
DLW-09-11	145	0.025 367	0.000 664	0.282 461	0.000 019	-11.5	-8.3	0.7	1 109	1 691	-0.98
DLW-09-12	146	0.039 697	0.001 077	0.282 580	0.000 018	-7.2	-4.1	0.6	953	1 427	-0.97
DLW-09-13	147	0.027 170	0.000 751	0.282 525	0.000 017	-9.2	-6.0	0.6	1 021	1 547	-0.98
DLW-09-14	144	0.031 758	0.000 898	0.282 490	0.000 017	-10.4	-7.3	0.6	1 075	1 628	-0.97
DLW-09-15	143	0.024 348	0.000 617	0.282 529	0.000 021	-9.0	-5.9	0.7	1 012	1 539	-0.98
DLW-09-16	143	0.024 650	0.000 756	0.282 485	0.000 017	-10.6	-7.5	0.6	1 077	1 637	-0.98
DLW-09-17	145	0.024 611	0.000 615	0.282 508	0.000 018	-9.8	-6.6	0.6	1 042	1 586	-0.98
DLW-09-18	147	0.025 153	0.000 652	0.282 504	0.000 018	-9.9	-6.7	0.7	1 048	1 592	-0.98
DLW-09-19	146	0.050 933	0.001 223	0.282 475	0.000 020	-11.0	-7.8	0.7	1 105	1 662	-0.96
DLW-09-20	143	0.039 713	0.001 067	0.282 552	0.000 019	-8.2	-5.2	0.7	992	1 491	-0.97
DLW-12 花岗闪长斑岩											
DLW-12-01	149	0.024 321	0.000 646	0.282 547	0.000 018	-8.4	-5.2	0.6	988	1 497	-0.98
DLW-12-02	147	0.035 145	0.000 919	0.282 502	0.000 016	-10.0	-6.8	0.6	1 059	1 600	-0.97

续附表 5

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(\tau)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
<b>DLW-12 花岗闪长斑岩</b>											
DLW-12-03	149	0.040 484	0.001 071	0.282 515	-9.5	-6.3	0.6	1.044	1 569	-0.97	-0.97
DLW-12-04	150	0.031 518	0.000 800	0.282 512	-9.6	-6.4	0.6	1.041	1 574	-0.98	-0.98
DLW-12-05	146	0.032 527	0.000 851	0.282 557	-7.4	-4.2	0.7	952	1 423	-0.97	-0.97
DLW-12-06	146	0.029 316	0.000 777	0.282 518	-9.4	-6.3	0.7	1 032	1 564	-0.98	-0.98
DLW-12-07	147	0.033 263	0.000 858	0.282 538	-8.7	-5.6	0.7	1 006	1 519	-0.97	-0.97
DLW-12-08	147	0.027 065	0.000 703	0.282 557	-8.1	-4.9	0.7	976	1 477	-0.98	-0.98
DLW-12-09	143	0.024 670	0.000 644	0.282 506	-9.9	-6.8	0.6	1 046	1 592	-0.98	-0.98
DLW-12-10	146	0.036 536	0.000 943	0.282 555	-9.1	-5.0	0.7	984	1 482	-0.97	-0.97
DLW-12-11	149	0.037 441	0.000 962	0.282 510	-9.0	-6.5	0.6	1 048	1 581	-0.97	-0.97
DLW-12-12	145	0.043 757	0.001 106	0.282 571	-7.6	-4.5	0.6	967	1 449	-0.97	-0.97
DLW-12-13	146	0.030 534	0.000 787	0.282 545	-8.5	-5.3	0.7	994	1 503	-0.98	-0.98
DLW-12-14	152	0.039 462	0.001 167	0.282 496	-10.2	-7.0	0.7	1 074	1 612	-0.97	-0.97
DLW-12-15	152	0.033 543	0.000 897	0.282 509	-9.8	-6.5	0.7	1 049	1 582	-0.97	-0.97
DLW-12-16	148	0.029 242	0.000 751	0.282 560	-8.0	-4.8	0.6	973	1 469	-0.98	-0.98
DLW-12-17	148	0.036 933	0.000 967	0.282 539	-8.7	-5.5	0.7	1 008	1 517	-0.97	-0.97
DLW-12-18	146	0.027 822	0.000 705	0.282 469	-11.2	-8.0	0.6	1 098	1 671	-0.98	-0.98
DLW-12-19	149	0.033 939	0.000 889	0.282 523	-9.3	-6.0	0.6	1 028	1 551	-0.97	-0.97
DLW-12-20	148	0.021 439	0.000 576	0.282 541	-8.6	-5.4	0.6	994	1 509	-0.98	-0.98
<b>DLW-15 花岗闪长斑岩</b>											
DLW-15-01	152	0.026 555	0.000 691	0.282 496	-10.2	-6.9	0.6	1 060	1 608	-0.98	-0.98
DLW-15-02	149	0.035 162	0.000 876	0.282 473	-11.0	-7.8	0.7	1 097	1 661	-0.97	-0.97
DLW-15-03	145	0.042 904	0.001 065	0.282 419	-13.0	-9.8	0.8	1 180	1 786	-0.97	-0.97
DLW-15-04	145	0.035 209	0.000 863	0.282 521	-9.3	-6.2	0.7	1 030	1 557	-0.97	-0.97
DLW-15-05	146	0.026 262	0.000 658	0.282 544	-8.5	-5.3	0.8	992	1 504	-0.98	-0.98
DLW-15-06	142	0.035 976	0.000 896	0.282 576	-7.4	-4.3	0.9	954	1 438	-0.97	-0.97
DLW-15-07	147	0.031 664	0.000 798	0.282 504	-9.9	-6.8	0.9	1 052	1 594	-0.98	-0.98
DLW-15-08	145	0.033 694	0.000 849	0.282 501	-10.1	-6.9	0.8	1 058	1 603	-0.97	-0.97
DLW-15-09	144	0.025 371	0.000 634	0.282 548	-8.4	-5.3	0.8	987	1 498	-0.98	-0.98
DLW-15-10	141	0.036 535	0.000 891	0.282 538	-8.7	-5.7	0.9	1 007	1 522	-0.97	-0.97
DLW-15-11	145	0.033 727	0.000 841	0.282 502	-9.7	-6.6	0.8	1 045	1 583	-0.97	-0.97
DLW-15-12	151	0.029 903	0.000 769	0.282 590	-6.9	-3.6	0.8	932	1 401	-0.98	-0.98
DLW-15-13	148	0.032 061	0.000 788	0.282 541	-8.6	-5.4	0.8	1 001	1 512	-0.98	-0.98
DLW-15-14	144	0.032 633	0.000 826	0.282 442	-12.1	-9.0	0.7	1 139	1 733	-0.98	-0.98
DLW-15-15	146	0.035 312	0.001 023	0.282 563	-7.9	-4.7	0.7	976	1 465	-0.97	-0.97
DLW-15-16	145	0.028 706	0.000 705	0.282 485	-10.6	-7.5	0.8	1 076	1 637	-0.98	-0.98
DLW-15-17	153	0.041 602	0.001 028	0.282 467	-11.3	-8.0	0.9	1 111	1 675	-0.97	-0.97
DLW-15-18	152	0.025 953	0.000 647	0.282 541	-8.6	-5.3	0.8	996	1 508	-0.98	-0.98
DLW-15-19	145	0.030 518	0.000 747	0.282 494	-10.3	-7.1	0.7	1 064	1 616	-0.98	-0.98
DLW-15-20	145	0.039 889	0.000 999	0.282 556	-8.1	-5.0	0.7	984	1 480	-0.97	-0.97
<b>DLW-16 铁镁质包体</b>											
DLW-16-01	146	0.045 517	0.001 227	0.282 545	0.000 018	-8.5	-5.3	0.7	1 006	1 505	-0.96
DLW-16-02	143	0.039 638	0.001 174	0.282 491	0.000 024	-10.4	-7.3	0.8	1 081	1 628	-0.97
DLW-16-03	145	0.030 284	0.000 823	0.282 545	0.000 016	-8.5	-5.4	0.6	996	1 505	-0.98

续附表 5

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(\tau)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lw/Hf}}$
<b>DLW-16 铁镁质包体</b>											
DLW-16-04	147	0.037 403	0.000 952	0.282 527	0.000 016	-9.1	-6.0	0.6	1.025	1.545	-0.97
DLW-16-05	146	0.026 236	0.000 820	0.282 458	0.000 028	-11.6	-8.4	1.0	1.118	1.698	-0.98
DLW-16-06	141	0.062 654	0.002 098	0.282 414	0.000 036	-13.1	-10.2	1.3	1.220	1.805	-0.94
DLW-16-07	146	0.033 322	0.000 990	0.282 426	0.000 028	-12.7	-9.6	1.0	1.167	1.769	-0.97
DLW-16-08	144	0.036 269	0.000 943	0.282 514	0.000 019	-9.6	-6.5	0.7	1.042	1.574	-0.97
DLW-16-09	153	0.038 129	0.001 131	0.282 492	0.000 028	-10.4	-7.1	1.0	1.078	1.619	-0.97
DLW-16-10	149	0.027 658	0.000 702	0.282 524	0.000 016	-9.2	-6.0	0.6	1.022	1.549	-0.98
DLW-16-11	146	0.032 001	0.000 823	0.282 520	0.000 018	-9.4	-6.2	0.6	1.031	1.560	-0.98
DLW-16-12	146	0.020 631	0.000 530	0.282 497	0.000 016	-10.2	-7.0	0.6	1.054	1.608	-0.98
DLW-16-13	148	0.022 940	0.000 581	0.282 503	0.000 018	-10.0	-6.7	0.6	1.047	1.594	-0.98
DLW-16-14	152	0.028 011	0.000 721	0.282 569	0.000 018	-7.7	-4.3	0.6	960	1.447	-0.98
<b>DLW-17 铁镁质包体</b>											
DLW-17-01	147	0.020 653	0.000 565	0.282 538	0.000 017	-8.7	-5.5	0.6	998	1.517	-0.98
DLW-17-02	150	0.022 007	0.000 598	0.282 505	0.000 017	-9.9	-6.6	0.6	1.045	1.588	-0.98
DLW-17-03	149	0.032 610	0.000 872	0.282 568	0.000 020	-7.7	-4.5	0.7	965	1.452	-0.97
DLW-17-04	145	0.025 321	0.000 719	0.282 503	0.000 018	-10.0	-6.8	0.6	1.052	1.538	-0.98
DLW-17-05	148	0.022 681	0.000 588	0.282 492	0.000 019	-10.4	-7.2	0.7	1.064	1.620	-0.98
DLW-17-06	146	0.024 708	0.000 658	0.282 531	0.000 017	-9.0	-5.8	0.6	1.010	1.533	-0.98
DLW-17-07	142	0.032 685	0.000 909	0.282 504	0.000 019	-9.9	-6.9	0.7	1.055	1.598	-0.97
DLW-17-08	148	0.027 945	0.000 759	0.282 557	0.000 019	-8.1	-4.8	0.7	977	1.475	-0.98
DLW-17-09	146	0.030 342	0.000 815	0.282 557	0.000 018	-8.1	-4.9	0.6	978	1.477	-0.98
DLW-17-10	146	0.070 950	0.001 743	0.282 550	0.000 032	-8.3	-5.2	1.1	1.013	1.499	-0.95
DLW-17-11	152	0.031 688	0.000 818	0.282 553	0.000 020	-8.2	-4.9	0.7	985	1.483	-0.98
DLW-17-12	149	0.040 680	0.001 094	0.282 546	0.000 017	-8.5	-5.3	0.6	1.001	1.502	-0.97
DLW-17-13	145	0.028 527	0.000 757	0.282 522	0.000 022	-9.3	-6.1	0.8	1.026	1.555	-0.98
DLW-17-14	145	0.050 689	0.001 411	0.282 567	0.000 022	-7.7	-4.6	0.8	980	1.460	-0.96
DLW-17-15	146	0.026 481	0.000 672	0.282 549	0.000 023	-8.4	-5.2	0.8	986	1.495	-0.98
DLW-17-16	149	0.046 338	0.001 159	0.282 456	0.000 020	-11.6	-8.4	0.7	1.130	1.702	-0.97
DLW-17-17	145	0.039 725	0.001 035	0.282 504	0.000 020	-9.9	-6.8	0.7	1.059	1.597	-0.97
DLW-17-18	150	0.036 797	0.000 952	0.282 535	0.000 020	-8.8	-5.6	0.7	1.013	1.525	-0.97
DLW-17-19	151	0.040 820	0.001 044	0.282 560	0.000 022	-7.9	-4.7	0.8	980	1.468	-0.97
DLW-17-20	149	0.033 177	0.000 859	0.282 540	0.000 022	-8.7	-5.4	0.8	1.003	1.513	-0.97
<b>DLW-22 花岗闪长斑岩矿物</b>											
DLW-22-01	138	0.031 063	0.000 779	0.282 430	0.000 016	-12.5	-9.6	0.6	1.155	1.763	-0.98
DLW-22-02	139	0.023 421	0.000 604	0.282 439	0.000 015	-12.3	-9.2	0.5	1.138	1.743	-0.98
DLW-22-03	138	0.030 586	0.000 875	0.282 494	0.000 020	-10.3	-7.3	0.7	1.068	1.622	-0.97
DLW-22-04	145	0.039 332	0.001 143	0.282 356	0.000 031	-15.2	-12.1	1.1	1.271	1.926	-0.97
DLW-22-05	142	0.031 618	0.000 819	0.282 504	0.000 016	-9.9	-6.9	0.6	1.053	1.598	-0.98
DLW-22-06	149	0.035 959	0.001 028	0.282 481	0.000 017	-10.7	-7.5	0.6	1.090	1.645	-0.97
DLW-22-07	144	0.051 880	0.001 276	0.282 472	0.000 017	-11.1	-8.0	0.6	1.111	1.671	-0.96
DLW-22-08	152	0.042 033	0.001 114	0.282 470	0.000 016	-11.1	-7.9	0.6	1.109	1.669	-0.97
DLW-22-09	148	0.018 732	0.000 456	0.282 513	0.000 016	-9.6	-6.4	0.6	1.030	1.572	-0.99
DLW-22-10	148	0.031 226	0.000 792	0.282 437	0.000 015	-12.3	-9.1	0.5	1.145	1.741	-0.98
DLW-22-11	145	0.020 661	0.000 537	0.282 536	0.000 016	-8.8	-5.6	0.6	1.000	1.522	-0.98
DLW-22-12	144	0.035 092	0.000 935	0.282 503	0.000 017	-10.0	-6.9	0.6	1.058	1.600	-0.97
DLW-22-13	149	0.045 111	0.001 179	0.282 517	0.000 016	-9.5	-6.3	0.6	1.045	1.567	-0.96
DLW-22-14	147	0.031 479	0.000 865	0.282 471	0.000 016	-11.1	-7.9	0.6	1.100	1.668	-0.97
DLW-22-15	149	0.038 183	0.000 962	0.282 448	0.000 015	-11.9	-8.7	0.5	1.135	1.718	-0.97