

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.037>



# 拉萨地块措勤-隆格尔地区铁矿床成岩时代、岩石成因及构造环境指示

于玉帅<sup>1,2,3</sup>,周云<sup>2,3</sup>,鲍波<sup>2,3</sup>,高原<sup>4</sup>,杨竹森<sup>5</sup>

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌 330013  
2. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205  
3. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,湖北武汉 430205  
4. 江西省地质调查研究院,江西南昌 330030  
5. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037

**摘要:**为深入了解中北部拉萨地块构造背景,利用LA-ICP-MS技术对洛布勒铁矿床成矿花岗闪长岩锆石进行了U-Th-Pb同位素测定,分析了隆格尔、洛布勒铁矿床侵入岩岩石地球化学和Sr-Nd-Pb同位素组成。获得洛布勒花岗闪长岩锆石U-Pb年齡为111.3±1.6 Ma(MSWD=0.61, n=9)。隆格尔和洛布勒铁矿床侵入岩高硅(66.63%~69.02%和64.33%~64.82%)、富碱(全碱为5.91%~6.40%和5.81%~6.05%)、低A/CNK(0.91~0.97和0.94~0.95)、SiO<sub>2</sub>与P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量负相关;稀土元素总量较低(ΣREE为123.11×10<sup>-6</sup>~148.83×10<sup>-6</sup>和96.17×10<sup>-6</sup>~101.92×10<sup>-6</sup>),球粒陨石标准化配分模式图右倾,弱Eu负异常(0.70~0.82和0.79~0.81),富集大离子亲石元素Rb、Th、U、K、Pb等,亏损Ba和高场强元素Nb、Ta、Sr、Ti等。隆格尔花岗岩全岩和斜长石(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>为18.474和18.626,(<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>为15.657和15.722,(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>为38.592和39.145,(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>为0.704 757 6和0.707 047 3,(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub>为0.512 281和0.512 339,ε<sub>Nd</sub>(t)为-4.13和-2.99,t<sub>DM2</sub>为1.15 Ga和1.24 Ga;洛布勒花岗闪长岩(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>比值为18.281,(<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>比值为15.616,(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>i</sub>比值为38.369,(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>为0.706 551 4;(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub>为0.512 309,ε<sub>Nd</sub>(t)为-3.62,t<sub>DM2</sub>为1.20 Ga。结果表明,措勤-隆格尔铁矿床成矿侵入岩为中钾-高钾钙碱性岩I型花岗岩,为早白垩世晚期岛弧岩浆活动产物,岩浆源于地壳物质部分熔融,岩浆演化过程经历了壳幔岩浆混合和围岩混染。结合前人研究成果,通过对比白垩纪中北部拉萨地块和南部羌塘地块成矿事件的差异,提出中北部拉萨地块113±3 Ma岩浆活动和Fe(-Cu)成矿事件与向南俯冲的班公湖-怒江洋壳发生断离有关。

**关键词:**成岩时代;岩石成因;Sr-Nd-Pb同位素;铁矿;措勤;隆格尔;拉萨地块;岩石学。

中图分类号: P581;P597

文章编号: 1000-2383(2019)06-1888-17

收稿日期: 2018-11-07

## Geochronology, Petrogenesis and Its Tectonic Setting Significance of Intrusive Rocks from Coqen to Longgeer Iron Deposit, Lhasa Subterrane, Tibet, China

Yu Yushuai<sup>1,2,3</sup>, Zhou Yun<sup>2,3</sup>, Bao Bo<sup>2,3</sup>, Gao Yuan<sup>4</sup>, Yang Zhusen<sup>5</sup>

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China  
2. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, China  
3. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China  
4. Jiangxi Institute of Geology Survey, Nanchang 330030, China  
5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No.41503040);国家重点研发计划(No.2016YFC0600306)。

**作者简介:**于玉帅(1985—),男,助理研究员,博士研究生,从事地质找矿和矿床学研究。ORCID: 0000-0002-8567-0729. E-mail: shuai-yuyu1103@163.com

**引用格式:**于玉帅,周云,鲍波,等,2019.拉萨地块措勤-隆格尔地区铁矿床成岩时代、岩石成因及构造环境指示.地球科学,44(6):1888—1904.

**Abstract:** In order to gain an in-depth understanding of the tectonic setting of the north and central of Lhasa block, bulk-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotopic data for the ore-forming granodiorites of Luobule and Longgeer iron deposit are analyzed and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result ( $111.3 \pm 1.6$  Ma;  $MSWD=0.61$ ,  $n=9$ ) for the granodiorite of Luobule deposit. The Luobule and Longgeer ore-forming granodiorites are characterized with high silica ( $SiO_2$  contents are  $66.63\%-69.02\%$  and  $64.33\%-64.82\%$ , respectively), high alkali (alkali oxides contents are  $5.91\%-6.40\%$  and  $5.81\%-6.05\%$ , respectively), but low A/CNK ratios (0.91—0.97 and 0.94—0.95). These intrusive rocks are enriched in LILEs (e.g., Rb, Th, U, K, Pb) while depleted in Ba and HFSEs (e.g., Nb, Ta, Sr, Ti). There have right oblique in chondrite-normalized REE patterns and similar primitive mantle normalized trace element spectrum. In addition, the intrusive granodiorites of Luobule and Longgeer have low  $\Sigma$ REE ( $123.11 \times 10^{-6}$ — $148.83 \times 10^{-6}$  and  $96.17 \times 10^{-6}$ — $101.92 \times 10^{-6}$ , respectively) and negative Eu anomaly (0.70—0.82 and 0.79—0.81, respectively). The  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ , and  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  ratios of whole rock and plagioclase from Longgeer deposit are 18.474 and 18.626, 15.657 and 15.722, 38.592 and 39.145, 0.512 281 and 0.512 339, 0.704 757 6 and 0.707 047 3, respectively. The calculated  $\epsilon_{Nd}(t)$  and  $t_{DM2}$  of the whole rock and plagioclase from Longgeer deposit are  $-4.13$  and  $-2.99$ , 1.15 Ga and 1.24 Ga, respectively. In contrast, the  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$ ,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ ,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  and  $\epsilon_{Nd}(t)$  values of whole rock from Luobule are 18.281, 15.616, 38.369, 0.512 309, 0.706 551 4,  $-3.62$  and 1.20 Ga, respectively. The results above reveal that the ore-forming granodiorites were the product of arc magmatism in late stage of early Cretaceous and were medium-high-K calc-alkaline I-type granite. The primitive magma of the ore-forming plutons were mainly generated by partial melting of crustal materials with the mixing of crust-derived silicic melts and mantle-derived mafic melts and the assimilation of the corresponding wall rocks. Combined with the previous study, by force of contrast the metallogenic event of north and central Lhasa subterrane and southern Qiangtang subterrane, it is propose that there existed extensive magmatism ( $113 \pm 3$  Ma) and Fe(-Cu) ore-forming events in north and central Lhasa subterrane are closely related to the break-off of Bangong Co-Nujiang subducted oceanic crust.

**Key words:** geochronology; petrogenesis; Sr-Nd-Pb isotope; iron deposit; Coen; Longgeer; Lhasa subterrane; petrology.

## 0 引言

拉萨地块夹持于班公湖—怒江和雅鲁藏布江缝合带之间,广泛发育中新生代岩浆活动。南部拉萨地块中—新生代岩浆活动多认为是雅鲁藏布江洋壳向北俯冲的岩浆响应(莫宣学等,2005),而中北部拉萨地块中生代岩浆活动成因争议一直未断,主要观点有:与雅鲁藏布江洋壳向北俯冲有关(Ding *et al.*, 2003),受控于班公湖—怒江洋壳向南俯冲(莫宣学等,2005;朱弟成等,2009;Zhu *et al.*, 2009, 2016),或是由于Slainajap洋壳向南俯冲所致(康志强等,2008),亦或是受向南俯冲的班公湖—怒江洋壳和向北俯冲的雅鲁藏布江新特提斯洋壳的共同影响(苟正彬等,2018)。伴随着中新生代岩浆活动的发育,与其有关的成矿事件也普遍发育,如南部拉萨地块广泛发育新生代林子宗火山岩和白垩纪—新生代中酸性侵入岩以及与之相关的斑岩型Cu-Au(Mo)矿床,如甲玛、驱龙、厅宫、沙让、冲江、朱诺等;中部拉萨地块主要出露白垩纪则弄群火山岩和中酸性侵入岩,西段以中生代矽卡岩型Fe-Cu矿床为主,如尼雄、隆格尔、天宫尼勒、日阿、嘎拉勒、尕尔穷等,东段主要为新生代Pb-Zn矿床,如亚

贵拉、洞中拉、蒙亚啊、龙马拉、纳如松多、勒青拉等,北部拉萨地块主要发育早白垩纪晚期多尼组火山和中酸性侵入岩,以及斑岩—矽卡岩型Cu(-Au)矿床,如拔拉扎、梅雄、舍索等。

措勤—隆格尔地区位于中北部拉萨地块(图1a),与岩浆热液有关的Fe、Cu成矿作用是区内最具特色的成矿作用。区内除分布有尼雄、洛布勒和隆格尔等铁铜矿床外,近年来实施的矿产地质调查陆续发现了塔拉客勒拉、祝弄拉、日阿布、机勒、热那布来格、者得错、多家务、夺勒等铁矿床(点),以及德能、车机布勒、日阿布洗、雅辛等铜多金属矿床(点)。在前人研究基础之上,本文以措勤—隆格尔铁矿床(尼雄、隆格尔铁矿、洛布勒)为研究对象,利用LA-ICP-MS技术分析了洛布勒铁矿成矿花岗闪长岩锆石U-Th-Pb同位素组成以及隆格尔铁矿、洛布勒铁矿成矿侵入岩地球化学和Sr-Nd-Pb同位素组成。总结了区内与铁成矿有关的侵入岩时代、地球化学性质、Sr-Nd-Pb同位素组成,查明区内岩石类型、岩浆源区与岩石成因。在综合分析中北部拉萨地块和南部羌塘地块早白垩世岩浆活动及成矿作用基础之上,探讨了中北部拉萨地块早白垩世地球动力学背景。

## 1 典型矿床地质特征

### 1.1 洛布勒铁矿

洛布勒铁矿位于仲巴县洛布勒牛场附近,矿内区出露地层为早二叠世昂杰组、晚二叠世敌布错组、林子宗火山岩典中组和第四纪系松散堆积物。昂杰组以中厚层块状泥晶灰岩、微晶灰岩为主,含少量的生物碎屑灰岩、中薄层状长石石英细砂岩夹板岩。敌布错组岩性为含砾粗砂岩、含砾砂岩、中细粒石英砂岩、粉砂岩、板岩等。典中组为中、酸性火山岩组合,主要岩性为安山岩、英安岩、流纹岩及火山角砾岩、角砾凝灰岩,与昂杰组呈不整合接触(图 1b)。NW 向逆断裂穿过矿区,花岗闪长岩分布于断裂两侧。花岗闪长岩呈灰白色,中粗粒花岗结构,主要由石英(约 20%)、斜长石(约 40%)、钾长石(约 20%)、黑云母(约 10%)、普通角闪石(约 8%),以及副矿物磁铁矿、磷灰石、锆石等(约 2%)组成。其中发育有细粒闪长质包体,多呈椭圆状产出,直径不等,多为 5~15 cm,与寄主岩呈突变或渐变接触关系(图 2a)。闪长质包体呈灰黑色,矿物组成为斜长石(40%~50%)、石英(10%~15%)、普通角闪石(15%~20%)、黑云母(10%~15%)、钾长石(5%~8%),副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿等(<1%)。昂杰组灰岩蚀变以角岩化为主,其次为矽卡岩化、大理岩化等。

矿体赋存于花岗闪长岩与昂杰组形成矽卡岩带中,矽卡岩主要由蛇纹石、透闪石、透辉石、石榴子石、方解石、金云母等组成。矿体呈透镜体,宽 2~3 m,长约 50 m(图 1b)。矿石矿物为黑色、黑灰色磁铁矿,次为红褐色、钢灰色赤铁矿。脉石矿物主要为矽卡岩矿物、黄铁矿、石英、方解石等。矿石呈致密块状、角砾状、条带状等构造(图 2b),自形一半自形粒状结构、鳞片粒状变晶结构、海绵陨铁结构。

### 1.2 隆格尔铁矿

隆格尔铁矿位于仲巴县隆格尔乡,矿区出露地层为中二叠世下拉组厚层状生物碎屑灰岩,分布于矿区东北部,中北部分布有少量的第四系松散堆积物。矿区外围尚有二叠系拉嘎组深灰—灰绿色中厚块状细砾岩、含砾细粉砂岩和古近纪典中组火山岩分布。岩浆岩主要为黑云母二长花岗岩和石英闪长岩,黑云母二长花岗岩为灰白色、浅灰红色,中粗粒花岗结构,主要由石英(20%~25%)、斜长石(30%~40%)、钾长石(20%~25%)、黑云母(5%)、

普通角闪石(3%),以及副矿物磁铁矿、磷灰石、锆石等组成(<1%), SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $115.5 \pm 2.1$  Ma, 为早白垩世晚期岩浆活动产物(费凡等, 2015)。其中发育细粒闪长质包体,呈椭圆状产出,直径多为 5~15 cm,与寄主岩呈突变或渐变接触关系(图 2b),呈灰黑色,矿物组成为斜长石(40%~50%)、石英(10%~15%)、普通角闪石(15%~20%)、黑云母(10%~15%)、钾长石(5%~8%),副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿等(<1%)(图 2e)。矿区石英闪长岩呈绿灰色,为晚白垩世早期  $97.2 \pm 1.1$  Ma 侵位(费凡等, 2015)。

铁矿体呈不规则囊状产于下拉组灰岩与中粗粒黑云母二长花岗岩接触带中(图 1c)。矿石矿物主要为磁铁矿和少量褐铁矿,脉石矿物主要为矽卡岩矿物(石榴子石、透辉石、金云母、蛇纹石、绿帘石)、石英、方解石和少量的赤铁矿、黄铁矿、孔雀石等。矿石以致密块状、角砾状磁铁矿石为主,次为浸染状和条带状(图 2d);自形一半自形粒状结构、海绵陨铁结构。

### 1.3 尼雄矿田滚纠铁矿

尼雄矿田距南侧雅鲁藏布江缝合带 150 km,北侧班公湖—怒江缝合带 130 km,是中北部拉萨地块铁铜多金属成矿带的重要组成,包括滚纠、尼雄、沙松南和毛加嵘铁矿床及日阿铜矿床,其中以滚纠铁矿成矿潜力最大。

滚纠铁矿床自下而上出露二叠系下拉组、敌布错组地层,及沿沟谷、河湖分布的第四系。下拉组为深灰色厚层生物碎屑灰岩、粉晶白云岩,与上覆地层敌布错组不整合接触或断层接触。敌布错组为深灰、灰白色中—厚层状含砾砂岩、长石石英砂岩、细砂岩、粉砂岩等。矿区出露的侵入岩平面形态呈不规则椭圆形、圆形分布于木质顶一带,岩性为中细粒角闪黑云母二长花岗岩和中细粒角闪黑云母花岗闪长岩及少量的中酸、中基性岩脉。二长花岗岩和花岗闪长岩中发育细粒闪长质包体,多呈椭圆状产出,直径不等,一般为 5~20 cm,大者可达到 50 cm,与寄主岩呈突变或渐变接触关系(图 2e)。中细粒黑云母二长花岗岩,灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,由斜长石(40%~50%)、钾长石(15%~30%)、石英(15%~25%)、黑云母(<5%)、普通角闪石(3%),副矿物磷灰石、锆石、榍石等(<1%)组成。中细粒黑云母花岗闪长岩,灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,矿物组成为斜长石(50%~60%)、

钾长石(10%~15%)、石英(20%)、黑云母(约5%)、普通角闪石(约5%),副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石等(<1%).细粒闪长质包体,灰黑色,矿物组成为斜长石(40%~50%)、石英(15%~20%)、普通角闪石(15%~20%)、黑云母(10%~15%)、钾长石(<5%),副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石等(<1%).

滚纠铁矿区目前已发现的铁矿体主要赋存于矽卡岩带和敌布错组及其层间破碎带中,矽卡岩主要由方解石、透辉石、金云母、阳起石、石榴子石、透辉石、蛇纹石等组成.大部分为隐伏矿体,呈规模不等的透镜体状—脉状,走向长度200~700 m,厚度2.3~37.3 m(图1d).矿石矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿,脉石矿物为矽卡岩矿物、黄铁矿、黄铜矿等.矿石为半自形—他形粒状结构、残余鲕状结构等,致密块状、角砾状、稠密浸染状及条带状等构造(图2f).

尼雄矿田滚纠铁矿花岗闪长岩和二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为113.6±1.2 Ma和112.6±1.6 Ma(于玉帅等,2011),与磁铁矿密切伴生金云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄为112.6 Ma(于玉帅等,2012).范淑芳等(2015)再次利用LA-ICP-MS锆石U-Pb测年技术确认花岗闪长岩年龄为112.1±0.5 Ma.

## 2 分析方法

野外采集新鲜的洛布勒花岗闪长岩、隆格尔花岗岩样品,整理、编号、照相后送至河北省区域地质调查研究所进行粉碎和锆石、斜长石挑选.锆石阴极发光照相和LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成.前者在扫描电镜加载阴极发光仪上完成.后者测试仪器为连接193 nm ArF激光器的Agilent 7500a型ICP-MS,激光束斑直径为32 μm,用标准锆石91500和GJ-1为外标校正,NIST-610<sup>29</sup>Si作为内标测定锆石中U、Th和Pb的含量.分析结果用Glitter(ver4.0)计算样品的同位素比值,使用Isoplot软件进行U-Pb年龄计算及作图,年龄和同位素比值误差为1σ.

样品的主量元素、微量元素、稀土元素以及Sr-Nd-Pb同位素分析测试均在中国核工业地质分析研究中心完成.主量元素使用仪器为PHILIPS PW-2404 X-萤光光谱仪,分析精度优于5%.微量元素和稀土元素分析采用ELEMENT-2型等离子质谱仪,分析精度优于10%.全岩和斜长石Sr-Nd-Pb同位素使用MAT261型同位素质谱仪分析完成,Sr和Nd分离采用常规的离子交换技术,Sr和Nd测定值分

别用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.119 4和<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.721 9进行同位素质量分馏校正,分析精度2σ.Pb同位素分析使用离子交换树脂分离出铅,蒸干后分析,1 μg铅<sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb分析精度≤0.05%,<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb分析精度≤0.005%,分析精度2σ.

## 3 分析结果

### 3.1 锆石U-Pb测年

洛布勒花岗闪长岩锆石颗粒呈自形和半自形长柱状或短柱状,锆石阴极发光图像可见清晰的内部结构.部分可见清晰的核一边结构,核部发育扇状构造,边部发育密集的震荡环带,锆石颗粒较大,多为长柱状,长100~300 μm,宽80~120 μm.另一部分锆石颗粒较小,无核一边结构,主要发育密集的震荡环带.多为短柱状,长80~100 μm,宽60~80 μm.锆石U、Th、Pb同位素分析结果列于附表1, Th含量7.03×10<sup>-6</sup>~51.54×10<sup>-6</sup>, U含量24.31×10<sup>-6</sup>~112.16×10<sup>-6</sup>, Th/U含量呈较好的正相关性, Th/U比值为0.19~1.25均大于0.1.锆石阴极发光特征和特征元素的比值指示花岗闪长岩锆石为岩浆成因.

洛布勒花岗闪长岩23颗锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄的测定结果见附表1.<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄介于104.8±3.6~125.8±2.6 Ma,在U-Pb谐和图中呈现较好的谐和性(图4a),指示锆石结晶后没有U或Pb同位素的明显丢失或加入,说明锆石U-Pb体系是基本封闭的.其中,15个分析点位于锆石核部或核部边部接触部位,获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄较老,为117.4±3.6~125.8±2.6 Ma,加权平均年龄119.8±1.4 Ma(MSWD=0.58,n=15);其余9个位于锆石边部分析点获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄为104.8±3.6~113.8±2.5 Ma,加权平均年龄111.3±1.6 Ma(MSWD=0.61,n=9),代表了花岗闪长岩最终的结晶年龄.

### 3.2 主量元素

4件隆格尔粗粒花岗岩和2件洛布勒铁矿花岗闪长岩样品主量元素分析结果列于附表2.两者具有相似的主量元素特征,SiO<sub>2</sub>含量较高,为66.63%~69.02%和64.33%~64.82%;K<sub>2</sub>O含量为2.72%~3.06%和2.72%~2.74%,Na<sub>2</sub>O含量为3.19%~3.34%和3.31%~3.39%,全碱ALK(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)含量为5.91%~6.40%和5.81%~6.05%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为14.19%~14.92%和15.43%~15.51%;MgO含量为1.40%~1.83%和2.20%~2.23%;TiO<sub>2</sub>含量

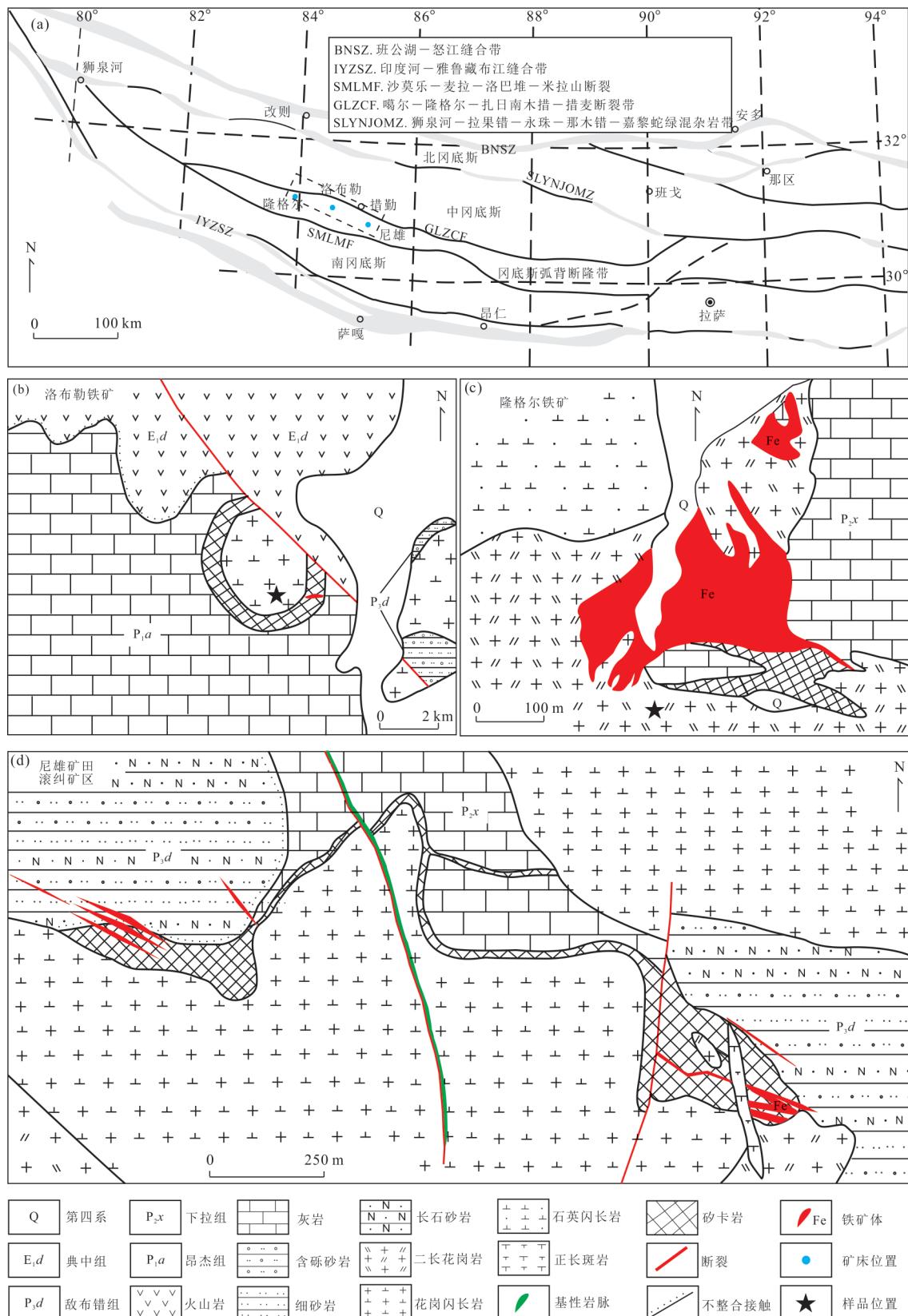


图 1 拉萨地块构造简图(a)和洛布勒(b)、隆格尔(c)和尼雄矿田滚纠(d)铁矿地质简图

Fig.1 Tectonic subdivisions of Lhasa block (a) and geological map Luobule (b), Longge (c) and Gunjiu (d) iron deposits

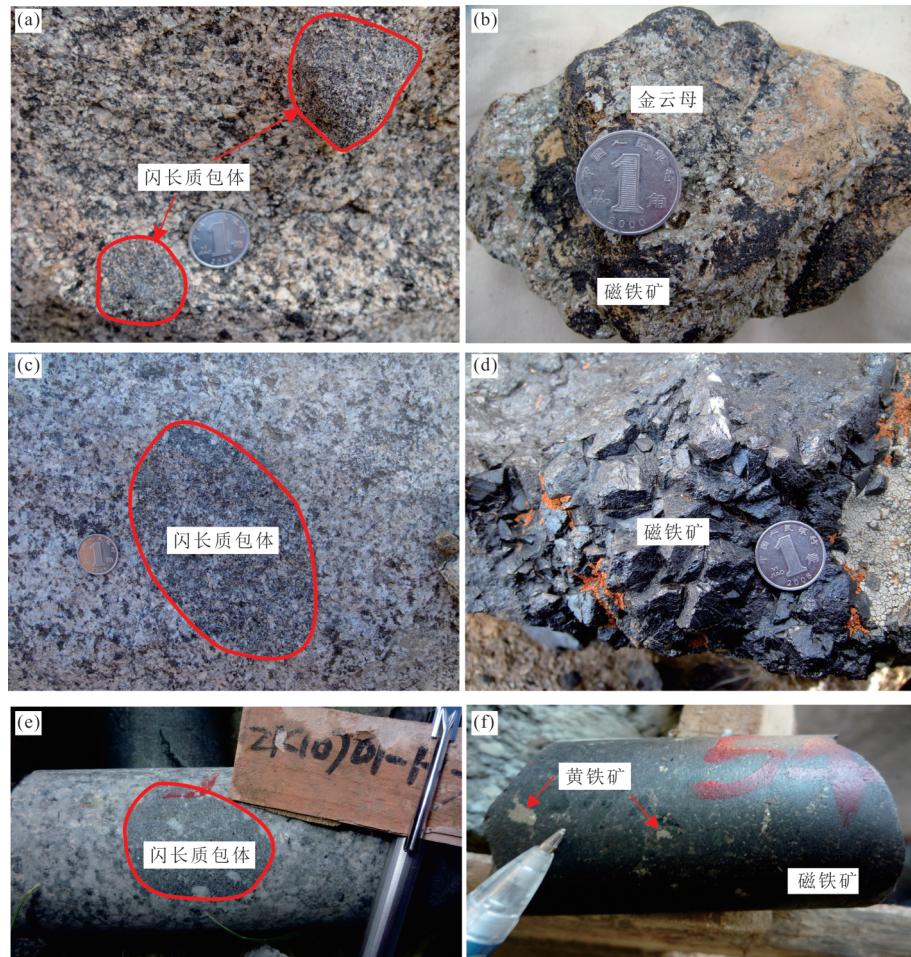
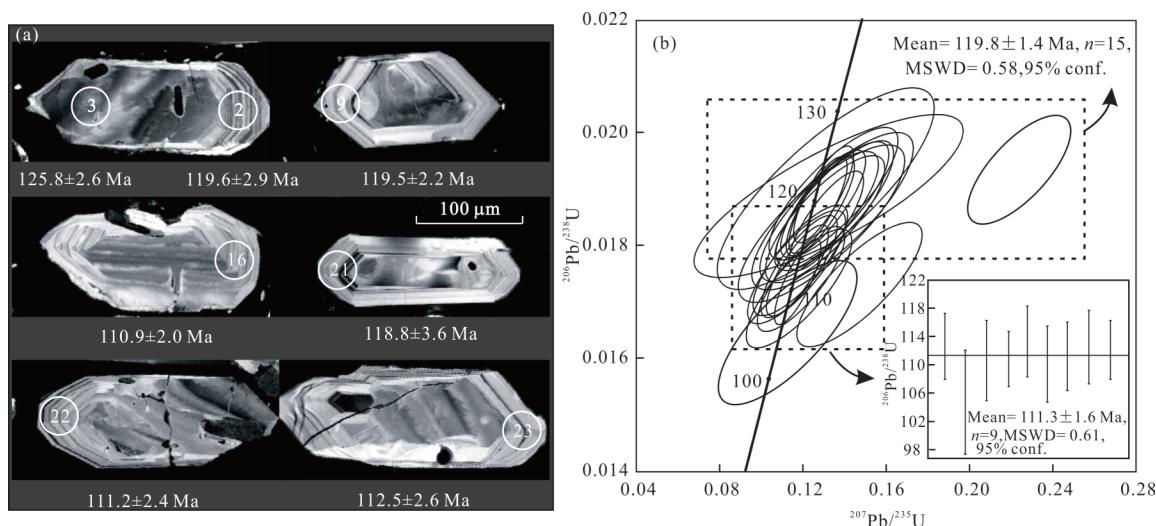


图2 洛布勒(a,b)、隆格尔(c,d)、尼雄矿田滚纠(e,f)铁矿侵入岩和矿石照片

Fig.2 Photos of intrusive rock and ore of Luobule (a, b), Longgeer (c, d) and Gunjiu (e, f) iron deposits

图3 洛布勒花岗闪长岩锆石CL图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和U-Pb谐和图Fig.3 Cathodoluminescence image and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  concordian diagram of zircon grains of Luobule granodiorite

较低,为0.50%~0.63%和0.56%~0.60%. $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量为0.12%~0.16%和0.12%.隆格尔粗粒花岗岩

在TAS图解上(图4a)位于花岗岩与花岗闪长岩分界位置,洛布勒铁矿花岗闪长岩位于花岗闪长岩区

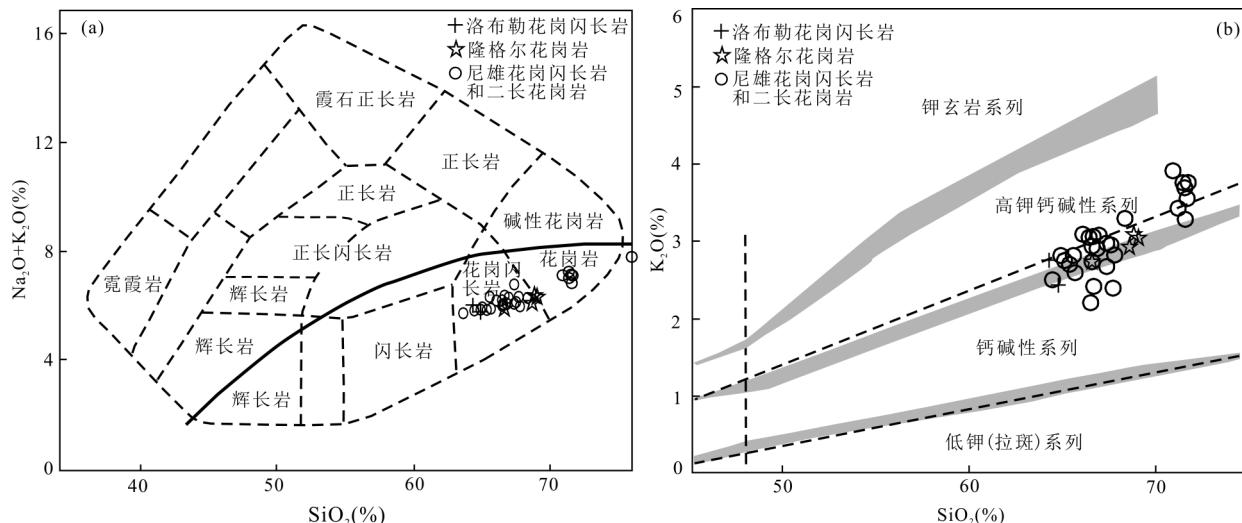
图 4 洛布勒、隆格尔、尼雄铁矿侵入岩 TAS(a) 和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>(b) 图解

Fig.4 TAS (a) and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (b) diagrams of intrusive rocks of Luobule, Longgeer and Nixiong iron deposits  
尼雄侵入岩据张晓倩等(2010);于玉帅等(2011);范淑芳等(2015)

域,在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图上(图 4b)显示样品为中钾—高钾钙碱性岩系列,铝饱和指数 A/CNK 分别为 0.91~0.97 和 0.94~0.95(<1.1),属于准铝质花岗岩.

### 3.3 稀土元素和微量元素

4 件隆格尔粗粒花岗岩和 2 件洛布勒铁矿花岗闪长岩样品稀土元素和微量元素分析结果见附表 2. 两者稀土元素总量较低,稀土总量( $\Sigma$ REE)为  $123.11 \times 10^{-6} \sim 148.83 \times 10^{-6}$  和  $96.17 \times 10^{-6} \sim 101.92 \times 10^{-6}$ , 低于我国花岗岩类  $\Sigma$ REE =  $218.5 \times 10^{-6}$ . 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图右倾(图 5a、5c 和 5e),  $(La/Yb)_N$  为 5.64~6.72 和 4.02~4.46, LREE 相对富集, HREE 相对亏损;  $(La/Sm)_N$  为 3.50~4.26 和 3.13~3.33,  $(Gd/Lu)_N$  比值为 1.20~1.28 和 1.12~1.14, 说明轻稀土分馏程度较大, 重稀土分馏不明显. 弱的 Eu 负异常,  $\delta Eu$  为 0.70~0.82 和 0.79~0.81. 微量元素富集 Rb、Th、U、K、Pb、Zr 和 Hf 等大离子亲石元素, 亏损 Ba 和 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等高场强元素(图 6b、6d 和 6f), Ba、Sr 亏损指示岩浆可能是壳源物质部分熔融的产物, 源区有斜长石残留或在岩浆演化过程中斜长石发生分离结晶.

### 3.4 Pb-Sr-Nd 同位素

隆格尔和洛布勒铁矿侵入岩全岩或单矿物(斜长石)Pb-Sr-Nd 同位素分析结果见表 1.

根据隆格尔花岗岩结晶年龄  $t=115.5$  Ma 扣除放射性成因铅后, 得到隆格尔花岗岩全岩  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 18.472,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 15.657,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 38.584. 1 件花岗岩中斜

长石  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 18.550,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 15.718,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 38.964. 全岩  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  为 0.704 757 6,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 281, 斜长石  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  为 0.707 047 3;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 339, 计算得到  $\epsilon_{Nd}(t)$  为 -4.13 和 -2.99, 二阶段 Nd 模式年龄  $t_{DM2}$  为 1.24 Ga 和 1.15 Ga.

根据洛布勒花岗岩结晶年龄  $t=111.3$  Ma 扣除放射性成因铅后, 得到花岗闪长岩  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 18.281,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 15.616,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 38.369,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  为 0.706 5514;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 309, 计算得到  $\epsilon_{Nd}(t)$  为 -3.62, 二阶段 Nd 模式年龄  $t_{DM2}$  为 1.20 Ga.

根据范淑芳等(2015)测得尼雄花岗闪长岩年龄为 112.1 Ma 以及全岩 Pb 同位素数据, 扣除放射性成因铅后得到,  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 18.666~18.734,  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 15.693~15.718,  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_t$  比值为 38.940~39.079. 尼雄铁矿侵入岩全岩  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值为 0.709 54~0.716 96,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  为 0.706 6~0.714 5,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 14~0.512 32,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 03~0.512 16, 斜长石  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  为 0.707 047 3;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t$  为 0.512 339, 计算得到  $\epsilon_{Nd}(t)$  为 -8.7~ -5.2, 二阶段 Nd 模式年龄  $t_{DM2}$  为 1.21~1.64 Ga.

## 4 讨论

### 4.1 成岩时代

前文已述,措勤—隆格尔地区位于中北部拉萨

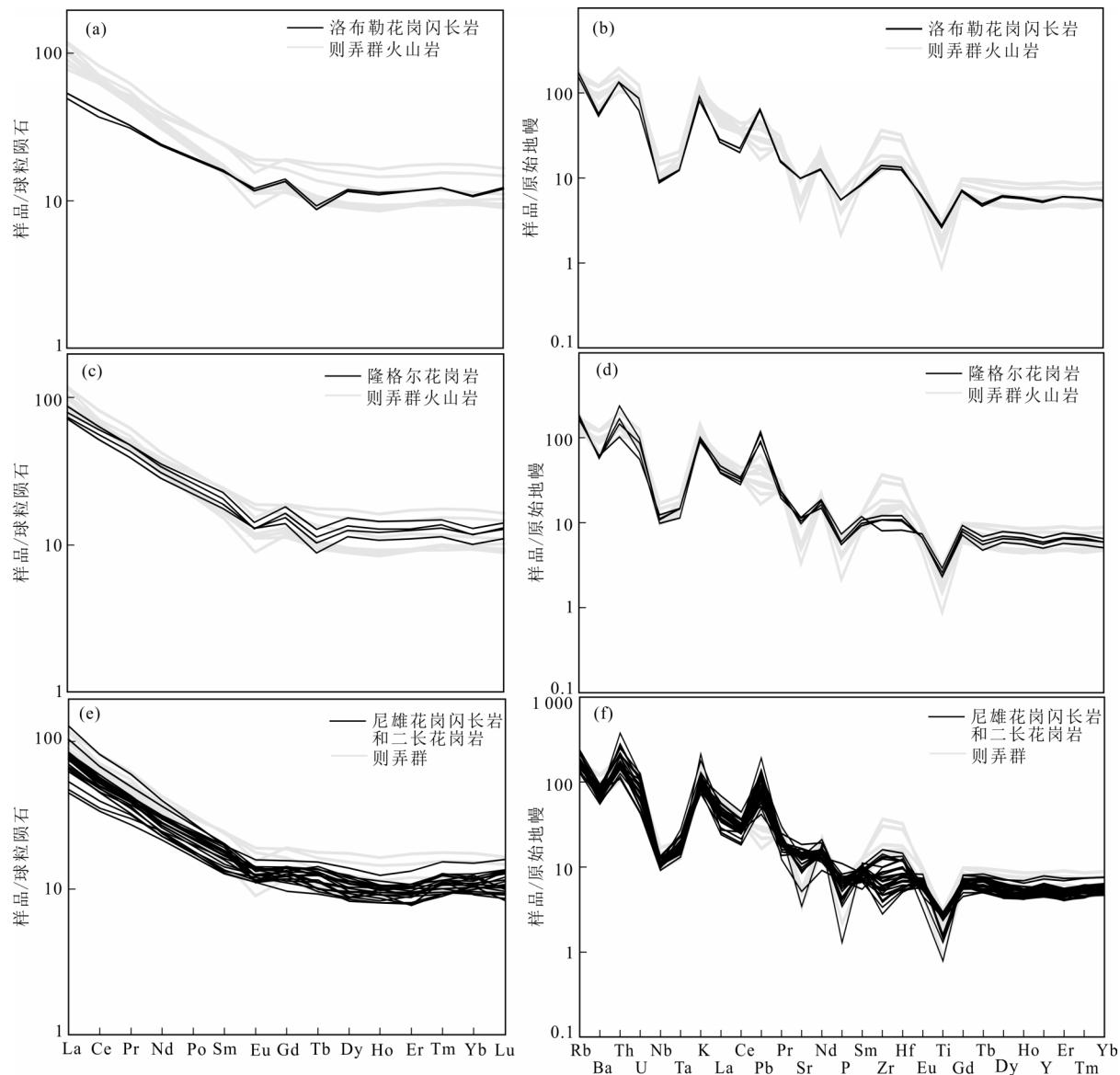


图5 洛布勒、隆格尔、尼雄铁矿侵入岩稀土元素配分曲线和微量元素蜘蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and Primitive mantle normalized trace element spectrum of intrusive rocks of Luobule, Longgeer and Nixiong iron deposits

尼雄侵入岩据张晓倩等,(2010);于玉帅等(2011);范淑芳等(2015);则弄群火山岩据刘伟等(2010a)

地块,与岩浆热液有关的铁铜成矿作用是区内最具特色的成矿作用,成矿作用与早白垩世岩浆活动密切相关。德能铜多金属矿床成矿石英闪长玢岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 126.6±2.2~127.5±2.2 Ma(于玉帅等,2018);尼雄矿田滚纠铁矿成矿花岗闪长岩和二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 113.6±1.2 Ma 和 112.6±1.6 Ma(于玉帅等,2011),与磁铁矿密切伴生金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄为 112.6 Ma(于玉帅等,2012);费凡等(2015)得到隆格尔铁矿成矿二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 115.5±2.1 Ma;此外,本次研究获得洛布勒铁矿成

矿花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分为 119.8±1.4 Ma (MSWD=0.58, n=15) 和 111.3±1.6 Ma (MSWD=0.61, n=9) 两群,前者与则弄群玄武安山岩(117.1±1.3 Ma; 苟正彬等,2018)和英安岩(117.7±0.9 Ma; 周华等,2016)年龄相当,后者与则弄群流纹岩(111.7±1.0 Ma; 周华等,2016)和凝灰岩(108.6±1.6~112.7±1.0 Ma; 刘伟等,2010b)年龄一致。结合上述前人报道的措勤—隆格尔成矿花岗岩和成矿年龄数据,认为区内铁成矿作用主要受控于早白垩世晚期约 110 Ma 岩浆活动。

表 1 隆格尔和洛布勒铁矿侵入岩铅锶钕同位素组成

Table 1 Pb, Rb and Sr isotope compositions of intrusive rocks from Longgeer and Luobule iron deposits

| 样号                                    | LGR08-13-1(全岩) | LGR004-4(斜长石) | LBL08-1-3-1(全岩) |
|---------------------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 38.975         | 39.145        | 38.768          |
| $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 15.663         | 15.723        | 15.623          |
| $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$     | 18.597         | 18.626        | 18.425          |
| $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ | 38.584         | 38.964        | 38.369          |
| $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ | 15.657         | 15.718        | 15.616          |
| $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ | 18.472         | 18.550        | 18.281          |
| $\text{Rb}(10^{-6})$                  | 118            | 15.26         | 112             |
| $\text{Sr}(10^{-6})$                  | 221            | 334.5         | 209             |
| $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$       | 1.542 22       | 0.132 00      | 1.545 53        |
| $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$       | 0.707 243      | 0.707 260     | 0.708 996       |
| $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$   | 0.704 758      | 0.707 047     | 0.706 551       |
| $\text{Sm}(10^{-6})$                  | 4.35           | 0.623 0       | 3.63            |
| $\text{Nd}(10^{-6})$                  | 22.1           | 5.059         | 16.8            |
| $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$     | 0.119 257      | 0.074 490     | 0.130 454       |
| $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$     | 0.512 369      | 0.512 394     | 0.512 404       |
| $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$ | 0.512 281      | 0.512 339     | 0.512 309       |
| $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$             | -4.13          | -2.99         | -3.62           |
| $t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$           | 1.24           | 1.15          | 1.20            |

注 :  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \times (e^{3t} - 1)$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{Sample}}(t)/^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}(t) - 1) \times 10^4$ ;  
 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}(t) = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{4t} - 1)$ .

## 4.2 岩石类型

措勤—隆格尔地区成矿侵入岩为中—高钾钙碱性花岗岩, A/CNK 小于 1.1, 含有典型矿物角闪石, 未见过铝性矿物白云母、堇青石等, 可排除 S 型花岗岩可能。此外, 岩石中不含碱性暗色矿物,  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  为  $109 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$ , 较 A 型花岗岩下限值低, 锆饱和温度亦小于典型的 A 型花岗岩, 故不可能为 A 型花岗岩。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  小于 0.710,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量呈负相关(图 6a), 与磷在偏铝质或弱过铝质熔体中随分异程度增加含量降低的地球化学性质相似, 指示 I 型花岗岩特征。在  $\text{Th}-\text{Rb}$  关系图中(图 6b), Th 含量与 Rb 含量呈正相关关系, 呈现出 I 型花岗岩演化趋势, 上述证据均指示措勤—隆格尔成矿侵入岩是典型的 I 型花岗岩。

## 4.3 岩浆源区及成因

措勤—隆格尔地区与铁成矿有关的侵入岩具有负的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值( $-8.7 \sim -3.0$ )和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-7.1 \sim -2.1$ , 变化范围较大的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  说明岩浆演化可能不是在封闭的体系中进行的, 可能伴随着岩浆混合或围岩同化混染。区内侵入岩存在泛非期继承锆石和/或新元古代继承锆石(于玉帅等, 2011), 且  $\text{Nb}/\text{La}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  与  $\text{SiO}_2$  含量呈负相关(图 6c, 6d),  $\text{Rb}/\text{Yb}$

$\text{Nb}/\text{Y}$  关系图表明地壳物质的混染在岩浆演化过程中也发生了重要作用(图 6e)。此外, 区内侵入岩普遍存在闪长质包体(图 2a、2c 和 2e), 且闪长质包体形成时代与寄主花岗岩一致, 同样具有变化的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值( $-6.8 \sim -0.2$ )(Zhu et al., 2009), 这通常被认为是岩浆混合作用的有力证据,  $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}$  图解显示区内成矿侵入岩呈岩浆混合演化趋势(图 6f)。因此, 岩浆混合和围岩混染作用可能是区内成矿侵入岩岩浆演化的重要机制。

措勤—隆格尔成矿侵入岩与则弄群火山岩具有相似的地球化学性质, 稀土元素总量相对较低, 具有弱的负 Eu 异常, 富集 Rb、Th、U、K、Pb、Zr 和 Hf 等大离子亲石元素, 亏损 Ba 和 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等高场强元素(图 5), 显示出岛弧火山岩特征。在火山岩  $\text{Ce}/\text{Pb}-\text{Ce}$  和  $\text{Nb}/\text{Th}-\text{Nb}$  判别图解上(图 7a, 7b), 样品都位于岛弧火山岩及其附近区域。结合区域所处的大地构造环境, 认为成矿侵入岩与同期的与则弄群火山岩为典型的岛弧岩浆活动的产物。

岛弧岩浆活动与板片俯冲消减关系密切, 但样品贫 Ba(含量为  $372 \times 10^{-6} \sim 613 \times 10^{-6}$ )、贫 Sr(含量为  $73 \times 10^{-6} \sim 388 \times 10^{-6}$ ), 富 Pb(含量为  $9.6 \times 10^{-6} \sim 35.5 \times 10^{-6}$ )、Y 含量较高( $20 \times 10^{-6} \sim 33 \times 10^{-6}$ ), 明

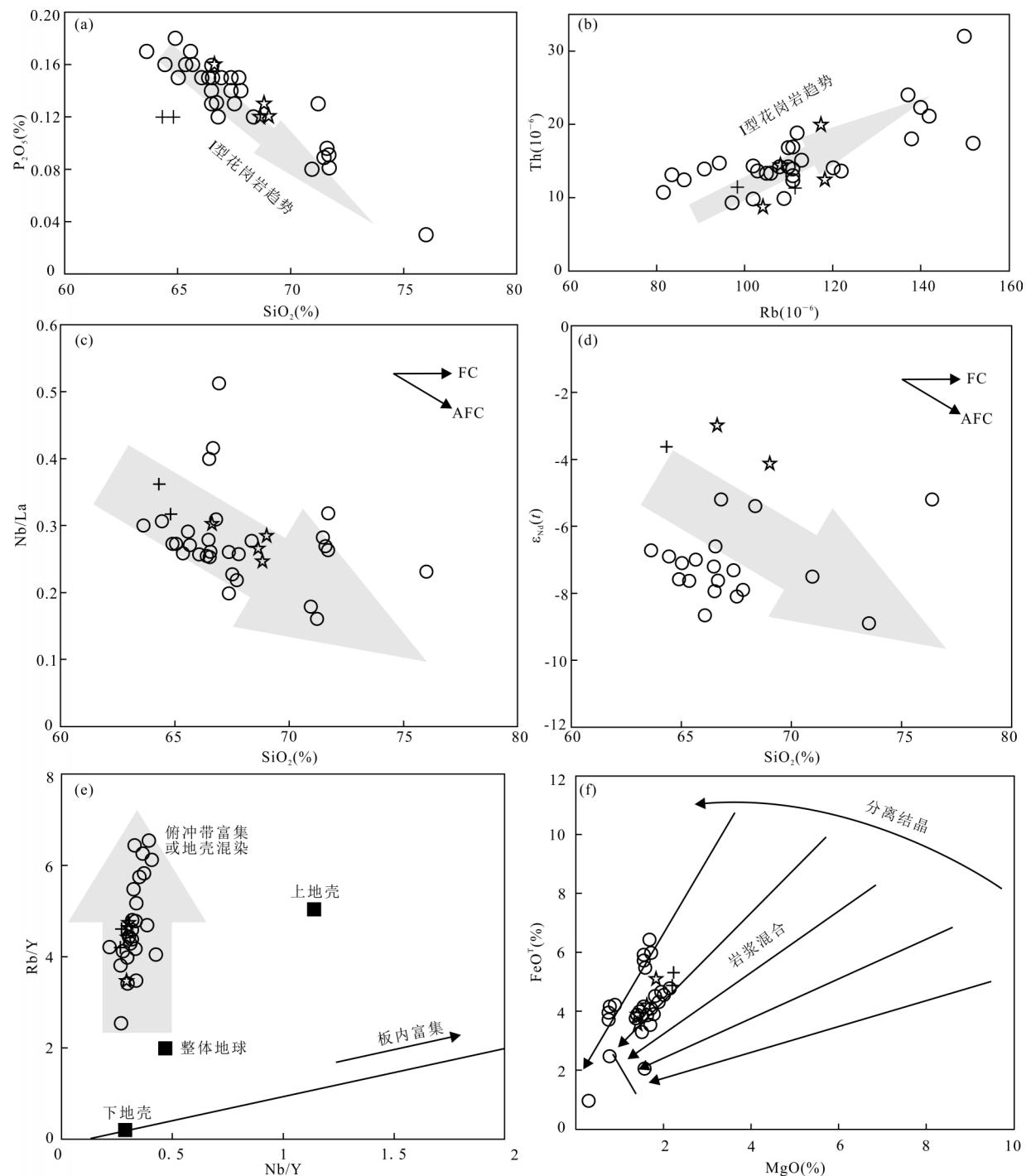


图6 洛布勒、隆格尔、尼雄铁矿侵入岩  $P_2O_5$ - $SiO_2$  (a)、 $Th$ - $Rb$  (b)、 $Nb$ / $La$ - $SiO_2$  (c)、 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $SiO_2$  (d)、 $Rb$ / $Yb$ - $Nb$ / $Y$  (e) 和  $FeO^T$ - $MgO$  (f) 图解

Fig.6  $P_2O_5$ - $SiO_2$  (a),  $Th$ - $Rb$  (b),  $Nb$ / $La$ - $SiO_2$  (c),  $\epsilon_{Nd}(t)$ - $SiO_2$  (d),  $Rb$ / $Yb$ - $Nb$ / $Y$  (e) and  $FeO^T$ - $MgO$  (f) diagrams of intrusive rocks of Luobule, Longger and Nixiong iron deposits

尼雄侵入岩据张晓倩等(2010);于玉帅等(2011);范淑芳等(2015);图例与图4相同

显不同于俯冲板片部分熔融形成高  $Sr$  ( $>400 \times 10^{-6}$ )、低  $Y$  ( $<18 \times 10^{-6}$ ) 和富  $Ba$ 、贫  $Pb$  的熔体, 说明岩浆活动与俯冲板片熔融无关或者关系不密切, 而与沉积物熔体相似(Edwards *et al.*, 1994)。在图 7c

和图 7d 中岩石样品主要分布在 II 型富集地幔(EM II) 岩浆源区及附近区域, 一般认为 EM II 的岩浆源区与俯冲和再循环的地壳物质有关。样品  $Nb/U$  比值为 3.4~8.1(平均为 5.4),  $Ce/Pb$  比值为 1.7~6.4(平

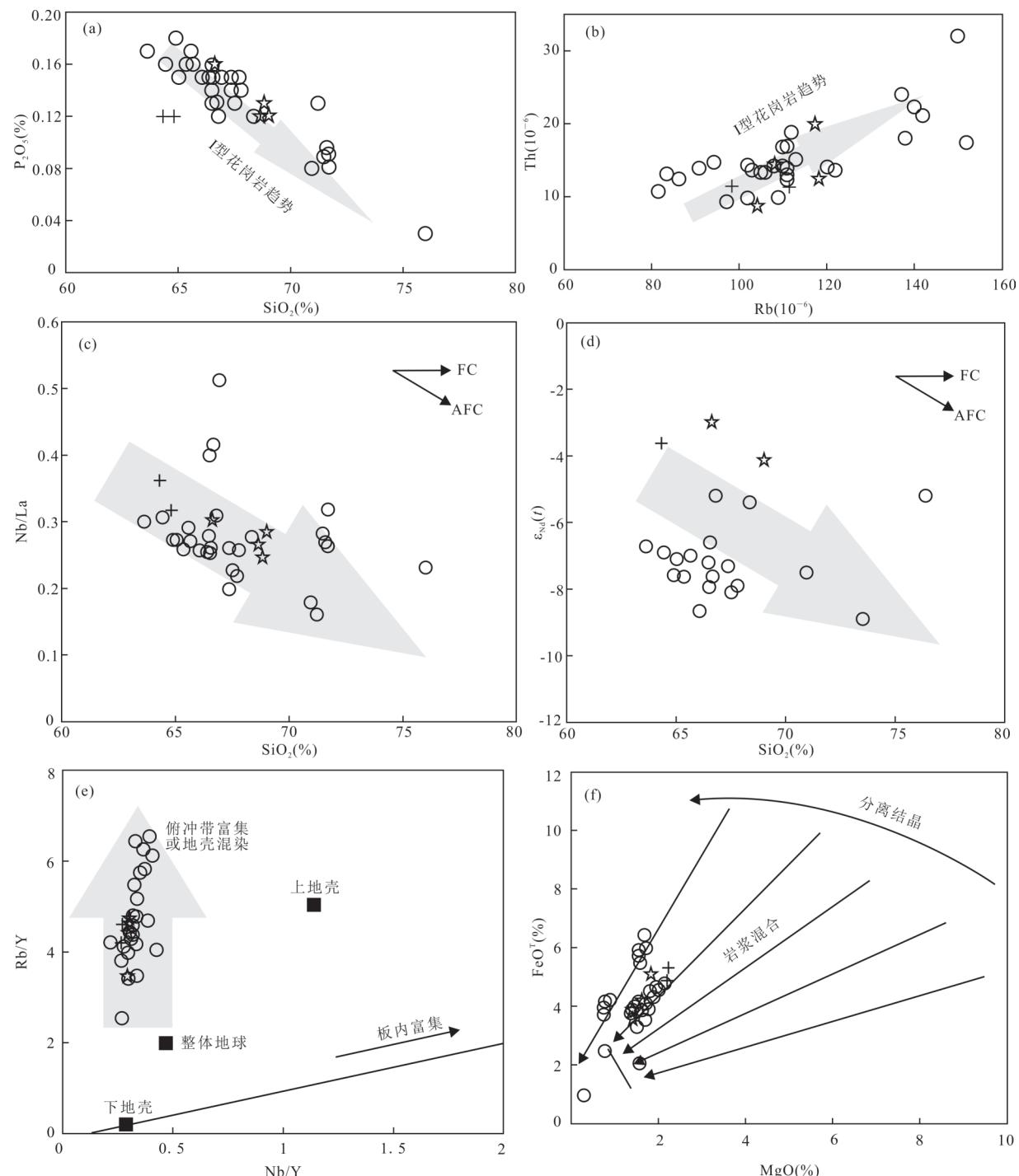


图 7 洛布勒、隆格尔、尼雄铁矿侵入岩 Ce/Pb-Ce (a)、Nb/Th-Nb (b)、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (c) 和  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (d) 同位素图解

Fig.7 Ce/Pb-Ce (a), Nb/Th-Nb (b),  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (c) and  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (d) diagrams of intrusive rocks of Luobule, Longgeer, Nixiong iron deposits

尼雄侵入岩据张晓倩等(2010);于玉帅等(2011);范淑芳等(2015);图例与图 4 相同

均为 3.5), 明显小于 MORB 和 OIB 的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值(47 和 27), 但与全球平均俯冲沉积物的 Nb/U≈5.3 和 Ce/Pb≈2.9 吻合。图 8a 也清晰的揭示了岩浆与俯冲带沉积物循环密切相关, Rb/Y 与 Nb/Y

呈正相关, 与流体相关的富集趋势一致, 揭示岩浆活动可能受控于俯冲板片沉积物释放的流体(图 8b)。此外, 沉积物熔体在岩浆形成过程中也发挥了一定作用, 5%~15% 的俯冲板片沉积物熔体参与

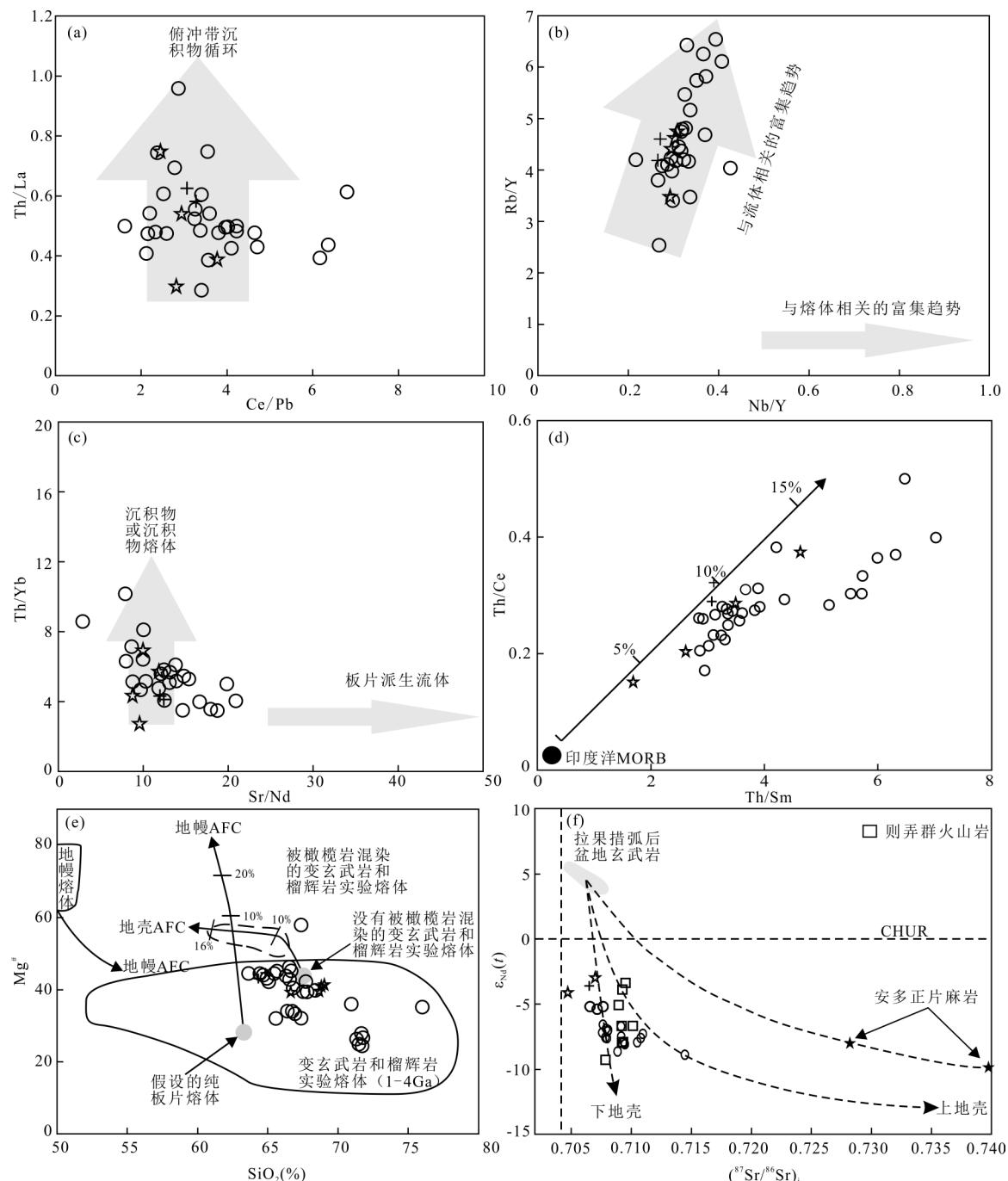


图8 洛布勒、隆格尔、尼雄铁矿侵入岩 Th/La-Ce/Pb(a)、Rb/Y-Nb/Ya(b)、Th/Yb-Sr/Nd(c)、Th/Ce-Th/Sm(d)、Mg<sup>#</sup>-SiO<sub>2</sub>(e)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ (f)图解

Fig.8 Th/La-Ce/Pb (a), Rb/Y-Nb/Y (b), Th/Yb-Sr/Nd (c), Th/Ce-Th/Sm (d), Mg<sup>#</sup>-SiO<sub>2</sub> (e) and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$  (f) diagrams of intrusive rock of Luobule, Longgeer, Nixiong iron deposits

尼雄侵入岩据张晓倩等(2010);范淑芳等(2015);则弄群火山岩据刘伟等(2010a);图例与图4相同

了岩浆形成(图8c,8d).

措勤—隆格尔地区与铁成矿有关的侵入岩(113 Ma±)  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-8.7~-3.0,二阶段Nd模式年龄  $t_{\text{DM2}}$ 为1.2~1.5 Ga(Zhu *et al.*, 2009; 张晓倩等, 2010; 范淑芳等, 2015; 本文),尼雄侵入岩锆石

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-7.1~-2.1,二阶段Hf模式年龄  $t_{\text{DM2}}$ 为1.3~1.6 Ga(Zhu *et al.*, 2009),与同期则弄群火山岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-9.3~-3.4)和二阶段Nd模式年龄  $t_{\text{DM2}}$ 为1.1~1.9 Ga一致(刘伟等, 2010a),这说明区内早白垩世晚期岩浆活动应该来源于中元古代地壳物

质的重熔. 从微量元素上看, 措勤—隆格尔地区成矿侵入岩 Sm/Nd 比值为 0.16~0.22, 均一且小于 0.3, Rb/Sr 比值平均为 0.51, 略大于地壳平均值 0.35, Nb/Ta 为 8.6~15.0, 与地壳平均值 12.5~13.5 吻合, Co 和 Ni 的含量相对较低(平均为  $11.9 \times 10^{-6}$  和  $5.2 \times 10^{-6}$ ), 较低的 Nb/La 比值(平均 0.28)和 Nb/U 比值(5.25)都指示岩浆可能为地壳来源. 由地幔物质部分熔融形成的岩浆 MgO 含量较高( $Mg^{\#} > 60$ ), 而本区成矿花岗岩 MgO 含量 0.29~2.23,  $Mg^{\#}$  为 20~46, 绝大多数小于 40, 这也排除了岩浆直接由地幔物质熔融形成的可能, 更可能是下地壳物质部分熔融形成( $Mg^{\#}$  小于 40; Atherton and Petford, 1993); 在图 8e 中, 绝大部分样品都位于变玄武岩和榴辉岩实验熔体范围内, 指示岩浆可能来源于下地壳部分熔融. 此外, 在  $\epsilon_{Nd}(t)$ -( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 图解上(图 8f), 样品与同时期则弄群火山岩一样, 都位于第四象限, 不同的是则弄群火山岩主要分布在上地壳与地幔演化线附近, 而侵入岩则主要位于下地壳与地幔演化线附近; 但是岩石样品 La/Ta 值普遍较高(19~74), 绝大部分大于 25, 相对均一的 La/Sm 比值(5~11), 说明岩浆源区可能有地幔源物质的加入. 图 7a 和 7b 显示花岗岩与岛弧火山岩源区相似, 同样指示了岩浆源区可能与地幔物质部分熔融有关(曲晓明等, 2012). 根据最新的 Hf 同位素填图结果, 措勤地区早白垩世晚期普遍发生了地幔物质的增加(Hou *et al.*, 2013). 因此, 区内成矿侵入岩源区物质主要来源于地壳, 地幔物质也发挥了重要作用贡献.

#### 4.4 地球动力学背景探讨

新生代印度—亚洲大陆强烈碰撞, 引起冈底斯构造岩浆带发生大规模的地壳缩短, 朱弟成等(2009)认为新生代以前, 雅鲁藏布江缝合带与冈底斯中北部地区空间距离达到或超过 380 km, 早白垩世晚期开始缓角度俯冲的新特提斯洋壳前缘是不可能俯冲到措勤一带. 即使是白垩纪时期已经俯冲到拉萨地块的北部, 由于平板俯冲或是形成隔热层, 不产生岩浆作用, 或是产生埃达克质岩浆活动(Gutscher *et al.*, 2000), 现在的客观事实是拉萨地块中北部地区发育强烈的白垩纪岩浆活动, 这些岩浆岩多具岛弧岩浆活动特征而非埃达克质特征. 此外, 平板俯冲的缝合带附近软流圈地幔楔会消失(Gutscher *et al.*, 2000), 因此拉萨地块南部应不存在早白垩世岩浆岩, 与拉萨地块南部频繁出露的早

白垩世的岩浆岩相悖(Ji *et al.*, 2009). 拉萨地块北部主要发育中钾钙碱性多尼组火山岩组合, 而中部则以则弄群高钾钙碱性火山岩为主(王力圆等, 2016), 这同样指示拉萨地块中北早白垩世岩浆活动并非受控于新特提斯洋壳向北俯冲.

随着高精度年龄、地球化学、岩石学的相继报道, 中北部拉萨地块发育约  $113 \pm 3$  Ma 爆发复杂岩浆活动(中酸性、中基性火山岩等)且存在幔源物质显著增加(Zhu *et al.*, 2009, 2016). 由前述可知, 中北部拉萨地块早白垩世岩浆活动与新特提斯洋壳向北俯冲无关, 更多研究者主张班公湖—怒江洋壳向南俯冲(Allégre *et al.*, 1984; 朱弟成等, 2009; Zhu *et al.*, 2009, 2016)可以更好的解释中北部拉萨地块的这些岩浆活动. 但需要注意的是, 最早关于班公湖—怒江洋壳向南俯冲的假设主要是依据南部羌塘地块发育有限的早白垩世岩浆活动(Allégre, *et al.*, 1984). 随着地质调查研究的深入, 在南部羌塘地块识别出大规模的侏罗纪—白垩纪弧火山活动, 包括中侏罗世(如玛贡—材玛中侏罗世岩浆岩年龄为  $158 \sim 169$  Ma,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-1.4 \sim +1.9$ ; Li *et al.*, 2014)、早白垩世晚期(如多不杂花岗闪长斑岩闪长玢岩年龄为  $119.1 \sim 121.6$  Ma, 闪长玢岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $+3.3 \sim +7.9$ ,  $t_{\text{DM2}}$  为  $0.67 \sim 0.94$  Ga(祝向平等, 2015; 余宏全等, 2009); 色那石英闪长玢岩年龄为  $118 \pm 1.4$  Ma,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $+0.28 \sim +11.77$ ,  $t_{\text{DM2}}$  为  $0.42 \sim 1.16$  Ga(韦少港等, 2016); 美日切措组双峰火山岩年龄为  $108 \sim 113$  Ma, 流纹岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $+11.6 \sim +15.5$ ,  $t_{\text{DM2}}$  为  $0.18 \sim 0.43$  Ga, 安山岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $+3.4 \sim +13.0$ ,  $t_{\text{DM2}}$  为  $0.35 \sim 0.95$  Ga(Wei *et al.*, 2017), 晚白垩世早期(如阿布山组粗面安山岩、英安岩、流纹岩喷出时代为  $102.6 \sim 96.1$  Ma(Li *et al.*, 2015)), 并存在  $118 \pm 6$  Ma 岩浆爆发事件(Hao *et al.*, 2016)和幔源物质的增加. 由此可见, 班公湖—怒江洋壳的南北双向俯冲在中北部拉萨地块和南部羌塘地块都产生早白垩世岩浆响应, 且分别存在  $113$  Ma 岩浆爆发事件和幔源物质增加.

中北部拉萨地块  $113$  Ma 岩浆爆发事件以巨量的 Fe 成矿为主(于玉帅等, 2011, 2012; 黄瀚霄等, 2012; 费凡等, 2015), Cu-Au 成矿为辅(赵元艺等, 2009); 而南部羌塘地块则以  $120$  Ma 岩浆爆发事件和 Cu-Au 堆积为主(余宏全等, 2009; 祝向平等, 2013, 2015; 方向等, 2015; 刘洪等, 2016; 韦少港等, 2016; 侯淋等, 2017), Fe 沉淀为辅(张璋等, 2015). 长江中下游和智利与岩浆热液有

关的铁(铜)成矿作用研究表明,大规模的壳幔岩浆混合是大规模铁成矿的重要因素。前人对拉萨地块Hf同位素研究表明,拉萨地块不同的地壳属性控制了矿床的展布,起源于地幔和新生地壳可以提供丰富的大量的S、Cl、H<sub>2</sub>O和Cu-Au等成矿元素;与Cu-Au成矿不同时的是,与Fe(-Cu)成矿作用有关的岩浆一般起源于古老的地壳物质,并发生了壳源和幔源岩浆大致等比例的混合,幔源物质较前者少(Hou *et al.*, 2015)。

中北部拉萨地块和南部羌塘地块都发育早白垩世晚—晚白垩世早期双峰式火山活动,北部拉萨地块申扎—班戈一带110~116 Ma(曲晓明等,2012)和尼玛吉瓦地区120~127 Ma A2型酸性岩浆活动的相继报道(王力圆等,2016),证实了北部拉萨地块早白垩世处于伸展环境下。但措勤—申扎早白垩世(>4 500 m)的火山岩—沉积岩厚度明显大于南部羌塘地体(约1 600 m),说明中北部拉萨地块伸展强度较南部羌塘地体大(李奋其等,2014)。据此推测拉萨地块和羌塘地块在127 Ma以前已经发生碰撞。早期可能并非为强烈陆—陆硬碰撞,而更可能是岛弧间的软碰撞(Zhu *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2017),此时拉萨地块和羌塘地块虽然已经连接在一起,但动力学机制并未统一,即班公湖—怒江洋壳仍在进行南北双向俯冲。在15~10 Ma之后的约113 Ma向南俯冲的班公湖—怒江洋壳发生了断离(van Hunen and Allen, 2011),软流圈物质大量的、快速的上涌,使受先期俯冲板片流体交代的岩石圈地幔发生部分熔融,形成玄武质岩浆,热的玄武质岩浆大规模底侵,引起上覆下地壳甚至是上地壳物质发生部分熔融,形成壳源岩浆,两种类型的岩浆或独立上升侵位,或形成壳幔混合岩浆上升侵位,导致了包括措勤—隆格尔在内的冈底斯中北部早白垩世晚期复杂岩浆活动的爆发、幔源物质增加及巨量Fe质堆积。

## 5 结论

(1) 洛布勒铁矿成矿花岗闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为111.3±1.6 Ma(MSWD=0.61, *n*=9),与尼雄矿田滚纠铁矿成矿花岗闪长岩(113.6±1.2 Ma)、二长花岗岩(112.6±1.6 Ma)和隆格尔铁矿成矿二长花岗岩(115.5±2.1 Ma)均为早白垩世晚期岩浆活动产物;

(2) 措勤—隆格尔成矿侵入岩为中—高钾钙碱

性花岗岩,A/CNK小于1.1,(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>较小(<0.710),SiO<sub>2</sub>与P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量负相关,为I型花岗岩。弱的负Eu异常,富集Rb、Th、U、K等大离子亲石元素,亏损Ba和Nb、Ta、Ti等高场强元素,指示其为岛弧岩浆岩。

(3) 措勤—隆格尔与铁矿有关的花岗岩主要来源于地壳物质部分熔融,受控于俯冲板片沉积物释放的流体,地幔物质也发挥了重要作用贡献。岩浆演化过程经历了岩浆混合和围岩混染作用。

(4) 拉萨地块和羌塘地块在127 Ma以前发生软碰撞,向南俯冲的班公湖—怒江洋壳在15~10 Ma之后的113±3 Ma发生断离,导致软流圈物质大量快速上涌,引发受俯冲板片流体交代的岩石圈地幔发生部分熔融并形成玄武质岩浆,玄武质岩浆携带的巨大热量诱发下地壳甚至是上地壳物质发生部分熔融,侵位结晶形成措勤—隆格尔成矿侵入岩及其他中北部拉萨地块早白垩世晚期岩浆活动。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

## References

- Allégre, C. J., Courtillot, V., Tapponnier, P., et al., 1984. Structure and Evolution of the Himalaya-Tibet Orogenic Belt. *Nature*, 307: 17—22. <https://doi.org/10.1038/307017a0>
- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362:144—146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Ding, L., Kapp, P., Zhong, D. L., et al., 2003. Cenozoic Volcanism in Tibet: Evidence for a Transition from Oceanic to Continental Subduction. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833—1865. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg061>
- Edwards, C. M. H., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., et al., 1994. The Transition to Potassic Alkaline Volcanism in Island Arcs: The Ringgit-Beser Complex, East Java, Indonesia. *Journal of Petrology*, 35(6):1557—1595. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.6.1557>
- Fan, S. F., Qu, X. M., Song, Y., et al., 2015. Petrogenesis of the Ore-Forming Granodiorite in the Nixiong Iron Deposit and Its Implications for the Metallogenic Tectonic Background. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39(2): 286—299 (in Chinese with English abstract).
- Fang, X., Tang, J. X., Song, Y., et al., 2015. Formation Epoch of the South Tiegelong Superlarge Epithermal Cu (Au-Ag) Deposit in Tibet and Its Geological Implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2):168—176 (in Chinese with English abstract).

- Fei, F., Yang, Z.S., Liu, Y.C., et al., 2015. Petrogenetic Epoch of the Rock Mass in the Lunggar Iron Deposit of Coqen County, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 568—580 (in Chinese with English abstract).
- Gou, Z.B., Liu, H., Li, J., et al., 2018. The Petrogenesis and Tectonic Significance of the Early Cretaceous Volcanic Rocks in Nixiong Area from the Central and Northern Lhasa Terrane. *Earth Science*, 43(8):2780—2794 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.153>
- Gutscher, M.A., Maury, R., Eissen, J.P., et al., 2000. Can Slab Melting be Caused by Flat Subduction? *Geology*, 28(6): 535—538.
- Hao, L.L., Wang, Q., Wyman, D.A., et al., 2016. Underplating of Basaltic Magmas and Crustal Growth in a Continental Arc: Evidence from Late Mesozoic Intermediate-Felsic Intrusive Rocks in Southern Qiangtang, Central Tibet. *Lithos*, 245: 223—242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.09.015>
- Hou, L., Tang, J.X., Lin, B., et al., 2017. Element Migration during Alteration and  $^{40}\text{Ar}$ — $^{39}\text{Ar}$  Dating of Sericite from the Dongwodong Deposit, Tibet and Its Geological Significance. *Rock and Mineral Analysis*, 36(4): 440—449 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Duan, L.F., Lu, Y.J., et al., 2015. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen. *Economic Geology*, 110(6): 1541—1575. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.6.1541>
- Hou, Z.Q., Zheng, Y.C., Yang, Z.M., et al., 2013. Contribution of Mantle Components within Juvenile Lower-Crust to Collisional Zone Porphyry Cu Systems in Tibet. *Mineralium Deposita*, 48(2): 173—192. <https://doi.org/10.1007/s00126-012-0415-6>
- Huang, H.X., Li, G.M., Liu, B., et al., 2012. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Tiangongnile Skarn-Type Cu-Au Deposit in Zhongba County, Tibet: Their Genetic and Tectonic Setting Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 424—434 (in Chinese with English abstract).
- Ji, W.Q., Wu, F.Y., Chung, S.L., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3—4): 229—245. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.020>
- Kang, Z.Q., Xu, J.F., Dong, Y.H., et al., 2008. Cretaceous Volcanic Rocks of Zenong Group in North-Middle Lhasa Block: Products of Southward Subducting of the Slainajap Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303—314 (in Chinese with English abstract).
- Li, F.Q., Liu, W., Zhang, S.Z., et al., 2014. The Evidence of Earth Dynamic Background Conversion in the North-Central Gangdese and Its Adjacent Regions during Middle Jurassic-Early Cretaceous. *Geological Review*, 60(6): 1297—1308 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.M., Zhu, D.C., Wang, Q., et al., 2014. Northward Subduction of Bangong-Nujiang Tethys: Insight from Late Jurassic Intrusive Rocks from Bangong Tso in Western Tibet. *Lithos*, 205: 284—297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.010>
- Li, Y.L., He, J., Wang, C.S., et al., 2015. Cretaceous Volcanic Rocks in South Qiangtang Terrane: Products of Northward Subduction of the Bangong-Nujiang Ocean? *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 69—83. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.09.033>
- Liu, H., Zhang, H., Li, G.M., et al., 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan Strongly Peraluminous S-Type Granitic Pluton, Southern Qiangtang, Northern Tibet: Constraints from Whole-Rock Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52(5): 848—860 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Li, F.Q., Yuan, S.H., et al., 2010a. Volcanic Rock Provenance of Zenong Group in Coqen Area of Tibet: Geochemistry and Sr-Nd Isotopic Constraint. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(4): 367—376 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Li, F.Q., Yuan, S.H., et al., 2010b. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age of Ignimbrite from Zenong Group in Coqen Area of the Central Gangdese Belt, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1009—1016 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X.X., Dong, G.C., Zhao, Z.D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281—290 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X.M., Xin, H.B., Du, D.D., et al., 2012. Ages of Post-Collisional A-Type Granite and Constraints on the Closure of the Oceanic Basin in the Middle Segment of the Bangongnu-Nujiang Suture, the Tibetan Plateau. *Geochimica*, 41(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- She, H.Q., Li, J.W., Ma, D.F., et al., 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Duobuza Porphyry Copper Deposit in Tibet and Its Geological Impli-

- cations. *Mineral Deposits*, 28(6): 737—746 (in Chinese with English abstract).
- van Hunen, J., Allen, M. B., 2011. Continental Collision and Slab Break-Off: A Comparison of 3-D Numerical Models with Observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1—2): 27—37. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.035>
- Wang, L.Y., Zheng, Y.Y., Gao, S.B., et al., 2016. The Discovery of the Early Cretaceous Zenong Group Volcanic Rocks and Geological Significance in Jiwa Area in South of the Central Lhasa Subterrane. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5):1543—1555 (in Chinese with English abstract).
- Wei, S.G., Song, Y., Tang, J.X., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Quartz Diorite Porphyrite from the Sena Copper (Gold) Deposit, Tibet. *Geology in China*, 43(6):1894—1912 (in Chinese with English abstract).
- Wei, S.G., Tang, J.X., Song, Y., et al., 2017. Early Cretaceous Bimodal Volcanism in the Duolong Cu Mining District, Western Tibet: Record of Slab Breakoff That Triggered ca. 108—113 Ma Magmatism in the Western Qiangtang Terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138:588—607. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.12.010>
- Yu, Y.S., Gao, Y., Yang, Z.S., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geochemistry of Intrusive Rocks from Gunjiu Iron Deposit in the Nixiong Ore Field, Coqen, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1949—1960 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.S., Gao, Y., Yang, Z.S., et al., 2018. Geochronology and Genesis of Quartz Diorite-Porphyrites of the Deneng Copper Polymetallic Deposit, Coqen, Tibet, China: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 92(7):1458—1473 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.S., Yang, Z.S., Liu, Y.C., et al., 2012. Mineralogical Characteristics and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Dating of Phlogopite from the Gunjiu Iron Deposit in the Nixiong Ore Field, Coqen, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 681—690 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2010. Petrogenesis of the Nixiong Pluton in Coqen, Tibet and Its Potential Significance for the Nixiong Fe-Rich Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1793—1804 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Geng, Q.R., Peng, Z.M., et al., 2015. Petrogenesis of Fuye Pluton in Rutog, Tibet: Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Constraints. *Geological Bulletin of China*, 34(2):262—273 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.Y., Song, L., Fan, X.T., et al., 2009. Re-Os Dating of Molybdenite from the Shesuo Copper Polymetallic Ore in Shenzha County, Tibet and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(8):1150—1158 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Qiu, J.S., Yu, S.B., et al., 2016. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks from Coqen District of Tibet and Their Implications for Petrogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 90(11):3173—3191 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Li, S.M., Cawood, P.A., et al., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by Divergent Double Subduction. *Lithos*, 245:7—17. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.023>
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Niu, Y.L., et al., 2009. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks along an East-West Traverse throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3—4): 298—312. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.008>
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2009. Permian and Early Cretaceous Tectonomagmatism in Southern Tibet and Tethyan Evolution: New Perspective. *Earth Science Frontiers*, 16(2):1—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.P., Chen, H.A., Liu, H.F., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages, Geochemistry of the Porphyries from the Duobuza Porphyry Cu-Au Deposit, Tibet and Their Metallogenetic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 534—548 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.P., Chen, H.A., Ma, D.F., et al., 2013.  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  Dating of Hydrothermal K-Feldspar and Hydrothermal Sericite from Bolong Porphyry Cu-Au Deposit in Tibet. *Mineral Deposits*, 32(5): 954—962 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 范淑芳,曲晓明,宋扬,等,2015.西藏尼雄铁矿成矿花岗岩成因及其对成矿构造背景的启示.大地构造与成矿学,39(2):286—299.
- 方向,唐菊兴,宋扬,等,2015.西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义.地球学报,36(2):168—176.
- 费凡,杨竹森,刘英超,等,2015.西藏措勤隆格尔铁矿岩体成岩时代及其地质意义.岩石矿物学杂志,34(4):568—580.
- 苟正彬,刘函,李俊,等,2018.拉萨地块中北部尼雄地区早白垩世火山岩的成因及构造意义.地球科学,43(8):2780—2794. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.153>
- 侯淋,唐菊兴,林彬,等,2017.西藏东窝东矿床矿化蚀变过程

- 元素迁移及绢云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学及其地质意义. 岩矿测试, 36(4):440—449.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘波, 等, 2012. 西藏仲巴县天宫尼勒矽卡岩型铜金矿床锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学特征: 对成因及其成矿构造背景的指示. 地球学报, 33(4): 424—434.
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 等, 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 24(2):303—314.
- 李奋其, 刘伟, 张士贞, 等, 2014. 冈底斯中北部及邻区中侏罗世—早白垩世地球动力背景转换的证据. 地质论评, 60(6):1297—1308.
- 刘洪, 张晖, 李光明, 等, 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束. 北京大学学报(自然科学版), 52(5): 848—860.
- 刘伟, 李奋其, 袁四化, 等, 2010a. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区: 地球化学及 Sr-Nd 同位素制约. 岩石矿物学杂志, 29(4):367—376.
- 刘伟, 李奋其, 袁四化, 等, 2010b. 西藏中冈底斯带措勤地区则弄群熔结凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄. 地质通报, 29(7):1009—1016.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3):281—290.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等, 2012. 西藏班公湖—怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束. 地球化学, 41(1):1—14.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 等, 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义. 矿床地质, 28(6):737—746.
- 王力圆, 郑有业, 高顺宝, 等, 2016. 中部拉萨地体南侧吉瓦地区早白垩世则弄群火山岩的发现及意义. 岩石学报, 32(5):1543—1555.
- 韦少港, 宋扬, 唐菊兴, 等, 2016. 西藏色那铜(金)矿床石英闪光玢岩年代学、地球化学与岩石成因. 中国地质, 43(6): 1894—1912.
- 于玉帅, 高原, 杨竹森, 等, 2011. 西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征. 岩石学报, 27(7):1949—1960.
- 于玉帅, 高原, 杨竹森, 等, 2018. 西藏措勤县德能铜多金属矿床石英闪光玢岩时代与成因: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 地质学报, 92(7):1458—1473.
- 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 等, 2012. 西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿金云母矿物学特征及  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学. 岩石矿物学杂志, 31(5):681—690.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等, 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义. 岩石学报, 26(6):1793—1804.
- 张璋, 耿全如, 彭智敏, 等, 2015. 西藏日土地区弗野岩体的成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素约束. 地质通报, 34(2): 262—273.
- 赵元艺, 宋亮, 樊兴涛, 等, 2009. 西藏申扎县舍索铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义. 地质学报, 83(8): 1150—1158.
- 周华, 邱检生, 喻思斌, 等, 2016. 西藏措勤地区火山岩的年代学与地球化学及其对岩石成因的制约. 地质学报, 90(11):3173—3191.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等, 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点. 地学前缘, 16(2):1—20.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等, 2015. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义. 地质学报, 89(3):534—548.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 等, 2013. 西藏波龙斑岩铜金矿床钾长石和绢云母  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义. 矿床地质, 32(5):954—962.