

doi:10.3799/dqkx.2016.084

龙首山中段茛岭花岗岩体 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义

赵亚云¹, 张树明^{1,2*}, 汤琳¹, 尧宏福², 杨春四¹

1. 东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西南昌 330013

2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330013

摘要: 龙首山中段茛岭早古生代花岗岩体与碱交代型铀矿化关系密切, 是龙首山花岗岩岩浆活动带重要组成部分, 但人们对茛岭岩体的成因、岩浆源区性质以及与铀成矿之间的关系还了解得不多。花岗岩体 Sr-Nd-Pb 同位素研究结果表明, 不同期次花岗岩(早古生代第一次灰白色二长花岗岩、第二次肉红色二长花岗岩、晚古生代肉红色细粒(钾长)花岗岩)的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值均介于大陆地壳范围内(0.706~0.718), 同时有 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 均值先升后降(0.70712→0.71000→0.70789)、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均值先降后增(-7.00→-8.09→-4.65)的特征。不同期次花岗岩体 t_{DM2} 均值分别为 1 735.50 Ma、1 814.66 Ma、1 737.50 Ma, 接近残留地壳年龄, 表明岩体的主要物质来源为古元古代龙首山群地层, 并有部分幔源组分或年轻地壳物质的加入。岩体的 Pb 同位素比值较高, 灰白色二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.328\sim 19.240$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.549\sim 15.619$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.390\sim 39.075$, $\mu=9.37\sim 9.43$ (平均为 9.40); 肉红色二长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=30.209\sim 43.529$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.097\sim 25.076$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.107\sim 39.420$, $\mu=18.47\sim 30.24$ (平均为 24.355); 肉红色细粒(钾长)花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.071\sim 19.767$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.577\sim 25.438$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.682\sim 42.593$, $\mu=9.36\sim 9.49$ (平均为 9.41), 显示为高放射性成因铅同位素特征, 表明岩体的铅为混合来源但以壳源为主。Sr-Nd-Pb 同位素对比研究表明, 钠交代岩(矿石)的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与早古生代第二次侵入的肉红色斑状二长花岗岩极为相似, 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解投影点也吻合, 表明研究区碱交代型铀成矿主要与早古生代第二次侵入有关。其他期次花岗岩体同样具有高铀背景值, 表明其可能也提供了一定的铀源。

关键词: 早古生代; 茛岭岩体; Sr-Nd-Pb 同位素; 岩浆源区; 铀成矿; 龙首山; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)06-1016-15

收稿日期: 2015-12-25

Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics and Its Geological Significance of the Jiling Granitic Pluton in the Middle Longshou Mountains

Zhao Yayun¹, Zhang Shuming^{1,2*}, Tang Lin¹, Yao Hongfu², Yang Chunsi¹

1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: The Early Paleozoic granitic pluton has a closely genetic relationship with the Alkali metasomatism type uranium mineralization in the middle Longshou Mountains area, which is an important activity zone of Longshoushan granitic magma. However, people do not know more about the cause of Jiling rock mass, properties of magma source area and the relationship between Jiling rock mass and uranium mineralization. The Sr-Nd-Pb isotopic composition characteristics of granitic pluton show that the initial Sr isotope ratios $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of granite in different periods (with first intrusion of gray monzonitic granites in the Early Paleozoic, the pink monzonitic granites of the second intrusion, and pink fine-grained (potassium) granites of the intrusion in Late Paleozoic) fall in the range of that of the continental crust (from 0.706 to 0.718); at the same time, the average initial Sr isotope ratios $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ has a trend of falling after rising (0.70712→0.71000→0.70789), and the average of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ shows the trend of rising after falling (-7.00→-8.09→-4.65). t_{DM2} average of granites in different periods is

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41172079)。

作者简介: 赵亚云(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学和矿床学方面的研究。E-mail: zyr2009163@126.com

* **通讯作者:** 张树明, E-mail: zsmfjxy@hotmail.com

引用格式: 赵亚云, 张树明, 汤琳, 等, 2016. 龙首山中段地区茛岭花岗岩体 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义. 地球科学, 41(6): 1016-1030.

1 735. 50 Ma, 1 814. 66 Ma and 1 737. 50 Ma respectively, which is very close to the age of residual crust, indicating that the main material source of the granitic pluton should be the group strata of paleoproterozoic Longshou mountains, with the addition of mantle or young crustal materials. Its Pb Isotope ratios are high; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 18. 328 to 19. 240, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 15. 549 to 15. 619, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 38. 390 to 39. 075, μ values range from 9. 37 to 9. 43, with an average of 9. 40, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 30. 209 to 43. 529, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 16. 097 to 25. 076, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 39. 107 to 39. 42, μ values range from 18. 47 to 30. 24, with an average of 9. 40; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 19. 071 to 19. 767, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 15. 577 to 25. 438, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 38. 682 to 42. 593, μ values range from 9. 36 to 9. 49, with an average of 9. 41. All samples show high radioactive Pb isotopic characteristics with a mixed source, but the crust is the main source. The comparison of Sr-Nd-Pb Isotope shows that the initial Sr isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ of sodium metasomatic rock (ore) are very similar to those of pink monzonitic granites of the second intrusion in the Early Paleozoic, and the subpoint of ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram is also consistent, which indicates that alkali metasomatism type uranium mineralization of the study area is mainly related to the second invasion in Early Paleozoic. The high uranium background values of granitic pluton in other periods show that it may also provide a source of uranium.

Key words: Early Paleozoic; Jiling pluton; Sr-Nd-Pb isotope; magma sources; Uranium metallogenitism; Longshou Mountains; geochemistry.

龙首山多金属成矿带是我国内陆极具特色的成矿带之一,其西段发育有我国乃至世界少有的伟晶状白岗岩型铀矿床(红石泉矿床),东段产有世界著名的与超基性岩有关的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(金川铜镍硫化物矿田),中段则产有典型的碱交代型铀矿床(芟岭、新水井矿床等)。龙首山中段碱交代型铀矿化主要与早古生代花岗岩关系密切(王木清等, 1982; 彭永石等, 1983; 戎嘉树等, 1984; 涂江汉, 1985; 张诚和金景福, 1987; 张宽谋, 1989; 孙圭和赵致和, 1995; 仇宝聚和胡绍康, 2010), 龙首山地区早古生代较大岩体主要有芟岭岩体、青山堡岩体等(孙圭和赵致和, 1995)。关于早古生代花岗岩,前人研究较多集中在龙首山地区花岗岩侵入期次的划分和岩相学特征归纳总结(柴宝民等, 1986; 李占游, 1987; 甘肃省地矿局, 1989; 孙圭和赵致和, 1995)以及河西堡地区青山堡岩体地球化学特征上(秦海鹏, 2012; 魏俏巧等, 2013),但在与碱交代型铀矿化密切关联的芟岭岩体的成因、岩浆源区性质、与铀成矿之间的关系等方面研究较为薄弱。Sr-Nd-Pb 同位素已被广泛用于探讨岩浆岩的成因、示踪岩浆物质来源、判断源区构造属性等(凌洪飞等, 1998, 2006; 刘成东等, 2003; 肖成东等, 2004; 张宏飞等, 2005; 陈能松等, 2007; 杨志明等, 2011; 商朋强等, 2012; 李磊等 2013; Wang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Kaygusuz *et al.*, 2014; Bosch *et al.*, 2014; 贾小辉等, 2014; 杨振等, 2014), 本文在前人工作基础上,对该区与碱交代型铀成矿关系密切的芟岭早古生代花岗岩开展了系统的 Sr-Nd-Pb 同位素研究,探讨其岩浆物质来源及构造属性,并在此基础上讨论了该岩体与碱交代型铀成矿之间的关系。

1 区域地质背景

龙首山中段早古生代花岗岩浆活动带的芟岭花岗岩体位于华北板块西南缘的阿拉善地块南缘,其南接河西走廊过渡带,以走廊边缘深断裂为界与祁连加里东地槽之走廊过渡带相邻,北邻潮水盆地(汤中立和白云来, 1999),与阿拉善台块潮水中新生代盆地相接(图 1a)。研究区出露最老的地层为下元古界龙首山岩群。区内侵入岩十分发育,种类较多,从超基性—基性—中性—酸性—碱性均有出露,其中分布最广并与铀矿化关系密切的主要为早古生代花岗岩类。

区域总体构造呈 NW 向,区内构造十分发育,主要可分 3 组: NW 向、近 EW 向和近 SN 向。其中 NW 向断裂和近 EW 向断裂活动、热液活动强烈,断裂构造控制着龙首山地区的地层、侵入岩及矿(床)化的空间分布,展布方向与区域构造方向基本一致。龙首山断裂构造—岩浆活动—成矿带内的铀多金属内生矿床均为古生代构造—岩浆活动的产物,矿床成矿年龄主要集中在加里东期—海西期,也有部分燕山期的矿化年龄(黄净白和黄世杰, 2005)。

2 岩体地质及岩相学特征

芟岭岩体长为 54 km、宽为 9~14 km,东宽西窄,呈楔形侵入于前寒武系龙首山群变质岩中,岩体地表出露呈马蹄形,由中细粒闪长岩、花岗闪长岩、中粗粒黑云母二长花岗岩、正长(斑)岩等主要岩性构成,面积约为 146. 6 km²,为一复式岩体。该岩体产典型的碱交代型铀矿床(芟岭和新水井)和硅质脉型铀矿床(革命沟)(图 1b)。笔者根据所获得赋矿围

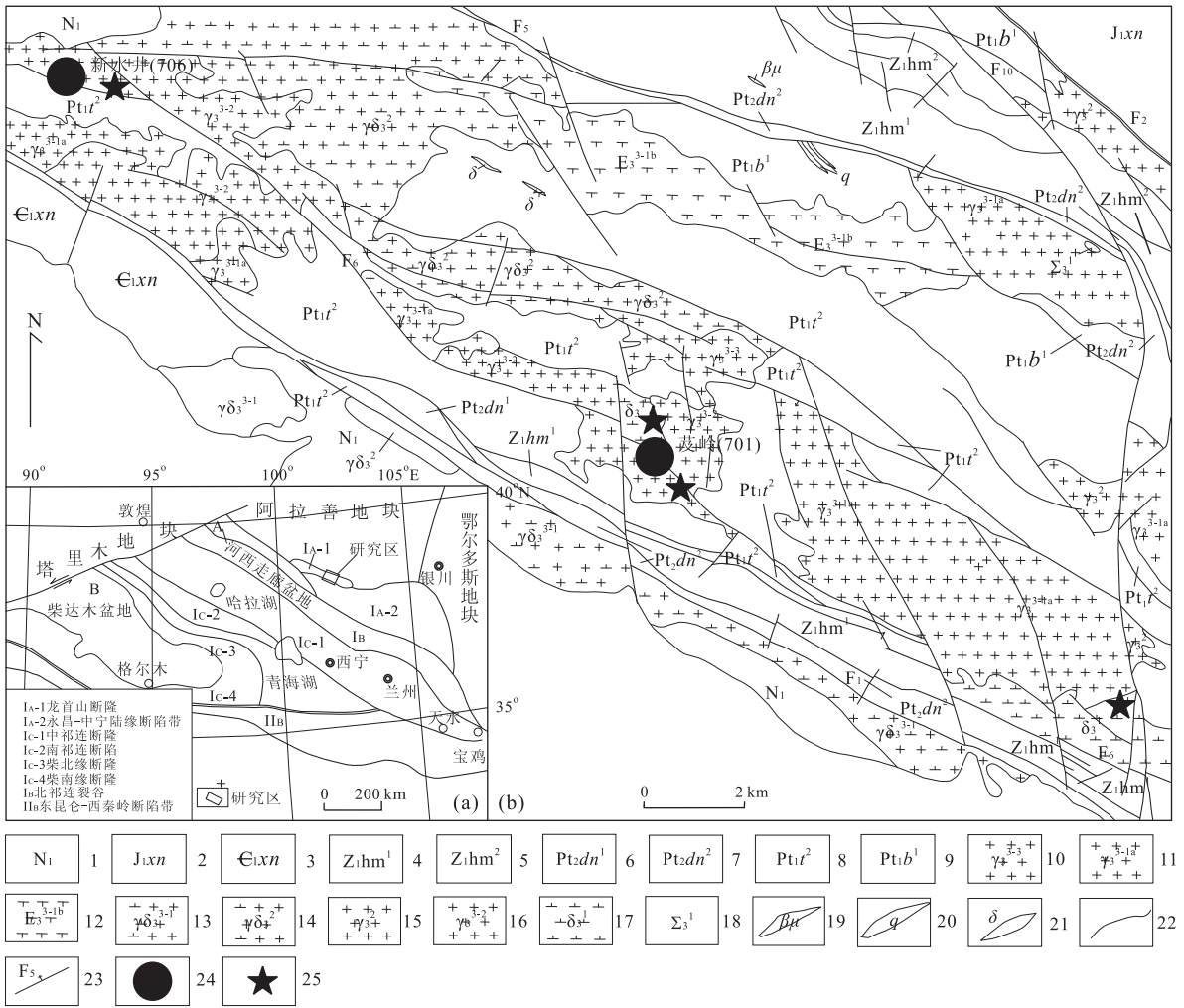


图 1 龙首山中段大地构造位置(a)及芟岭岩体地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic position (a) and schenmatic geological sketch (b) of Jiling pluton in the middle Longshou Moutains

1. 新近系; 2. 侏罗系; 3. 寒武系中统香山群; 4. 震旦系孩母山群上亚群; 5. 震旦系孩母山群下亚群; 6. 墩子沟群上亚群; 7. 墩子沟群下亚群; 8. 龙首山群踏马子沟组; 9. 龙首山群麟沟组; 10. 早古生代第三次细粒花岗岩; 11. 早古生代第一次中粗粒二长花岗岩; 12. 早古生代一次碱性杂岩; 13. 早古生代一次花岗闪长岩; 14. 早古生代花岗闪长岩; 15. 早古生代混合花岗岩; 16. 早古生代二次斑状花岗岩; 17. 早古生代闪长岩; 18. 早古生代基性-超基性岩; 19. 辉绿岩; 20. 酸性岩脉; 21. 中性岩脉; 22. 铀矿床; 23. 采样位置; 图 a 据傅成铭等(2012)

岩芟岭花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据(另文发表)及岩体地质特征(图 2), 将芟岭岩体的侵入划分为 3 个期次, 分别为早古生代第 1 次侵入(428.6~425.2 Ma), 岩石岩性主要为灰白色二长花岗岩(LSS12-02, 03); 早古生代第 2 次侵入(416.0~416.7 Ma), 岩石岩性主要为肉红色二长花岗岩(LSS12-04, 20)、少量灰白色花岗闪长岩(LSS12-01); 晚古生代侵入(401.3±5.0 Ma), 岩石组合为肉红色细粒花岗岩、肉红色细粒钾长花岗岩(LSS12-05)。

斑状黑云花岗闪长岩, 似斑状结构, 斑晶有石英(24%±2%, 粒径为 0.32~0.72 mm, 最大可达 1.25 mm)、斜长石(50%±3%, 粒径为 0.86~

2.24 mm, 最大≥3.00 mm)、钾长石(12%±1%, 粒径为 0.60~1.20 mm)以及黑云母组成(12%±1%); 基质具显晶质结构, 主要由长英质矿物和云母组成; 副矿物见锆石、金红石、榍石及不透明铁质黄铁矿(黄铁矿和斑铜矿)。斜长石, 呈板状, 发育细而密的聚片双晶, 个别颗粒发育微弱泥化, 另外见斑晶长石内包含有后期蠕虫状石英。

灰白色二长花岗岩, 岩石具似斑状结构, 主要矿物为石英(21%~28%, 粒径为 0.25~1.89 mm, 最大可达 2.87 mm)、斜长石(42%~48%, 粒径为 0.21~1.58 mm, 最大可达 3.00 mm)、碱性长石(11%~16%, 粒径为 0.32~0.98 mm, 最大可达 2.00 mm)。次要矿物为黑云母(10%, 粒径为

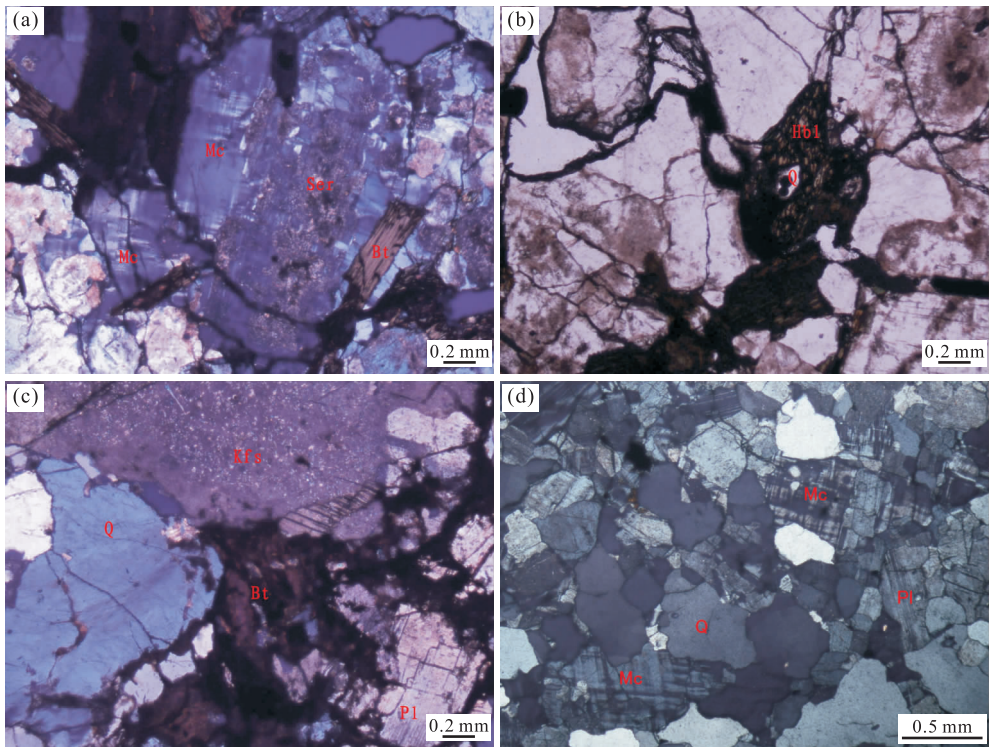


图2 龙首山中段芟岭花岗岩体手标本及镜下显微照片

Fig. 2 Photographs of the granitic pluton of Jiling in the middle Longshou Moutains

a. 微斜长石格子双晶及微弱绢云母化; b. 角闪石内部包含乳滴状石英; c. 似斑状结构; d. 细粒花岗结构及微斜长石格子双晶; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Q. 石英; Mc. 微斜长石; Ser. 绢云母化; Hbl. 角闪石

0.25~0.72 mm, 最大可达 1.27 mm)、角闪石(2%, 0.21~0.82 mm)。副矿物为黄铁矿和磷灰石; 碱性长石(钾长石和微斜长石), 半自形板状, 局部表面泥化; 微斜长石隐约可见格子双晶(图 2a)。角闪石, 与黑云母伴生在一起, 内部包含乳滴状石英(图 2b)。黄铁矿多呈正方形及不规则形状, 含量 $\leq 2\%$ 。磷灰石细长条状, 多分布在长石表面, 含量为 1%。

肉红色二长花岗岩, 岩石整体受泥化强烈, 具似斑状结构(图 2c), 斑晶为钾长石(26%~40%, 粒径为 1.00~1.86 mm, 个别达 3.00 mm)、石英(22%~25%, 粒径为 0.32~0.92 mm, 最大可达 2.00 mm)、条纹长石(12%~25%, ≥ 2.00 mm)及个别斜长石(20%~28%, 粒径为 0.45~1.65 mm, 最大可达 2.00 mm); 基质具细粒花岗结构, 主要由长英质矿物及黑云母组成, 副矿物为不透明的铁质矿物。黑云母(3%, 粒径为 0.35~1.12 mm), 多与钾长石伴生, 且内部包含小颗粒石英, 副矿物为不透明铁质矿物, 含量 $\leq 1\%$ 。

肉红色细粒(钾长)花岗岩: 具似斑状结构、细粒结构(图 2d)。主要矿物为石英(26%~28%, 粒径为 0.15~0.95 mm, 个别达 1.40 mm)、碱性长石(38%~

46%, 粒径为 0.10~1.00 mm, 个别颗粒可达 2.30 mm)以及斜长石(22%~33%, 粒径为 0.60~1.30 mm, 少数为 2.00~2.20 mm); 次要矿物为黑云母(1%~2%, 粒径为 0.55~0.89 mm); 副矿物见磷灰石、黄铁矿。碱性长石(钾长石和微斜长石), 半自形至自形板状, 微斜长石可见格子双晶(图 2d)。

3 样品采集及分析测试

3.1 样品采集

本次研究的相关样品采集于芟岭岩体不同露头和钻孔岩心(表 1、图 1)。选取 1 件花岗闪长岩(LSS12-01)、2 件灰白色二长花岗岩(LSS12-02、03)、3 件肉红色二长花岗岩(LSS12-04、12、20)、5 件肉红色细粒(钾长)花岗岩(LSS12-05、LSS13-26、33、36、41)以及 4 件钠交代岩共计 15 件样品进行全岩 Sr、Nd、Pb 同位素测试。

3.2 分析测试

本文所有样品经过样品整理、表面去污、人工破碎、清洗烘干、机械细碎、球磨、入袋等处理, 最终获得粒径为 200 目的岩石粉末样品。

表 1 Nd-Sr-Pb 同位素测试样品采集位置与岩性

Table 1 Position and lithology for Nd-Sr-Pb isotope test samples

序号	样品号	北纬	东经	岩(矿)石名称
1	LSS12-01	38°33'16.37"	101°47'10.53"	斑状黑云母花岗岩闪长岩
2	LSS12-02	38°33'56.33"	101°48'0.87"	灰白色中细粒二长花岗岩
3	LSS12-03	38°33'57.15"	101°47'59.40"	灰白色中粗粒二长花岗岩
4	LSS12-04	38°33'59.19"	101°47'56.78"	肉红色中粗粒似斑状二长花岗岩
5	LSS12-05	38°33'2.12"	101°47'56.84"	肉红色细粒花岗岩
6	LSS12-12	38°33'59.87"	101°47'53.29"	肉红色中粗粒似斑状二长花岗岩
7	LSS12-15	38°33'59.87"	101°47'53.29"	钠交代岩(矿石)
8	LSS12-16	38°33'59.87"	101°47'53.29"	钠交代岩(矿石)
9	LSS12-18	38°38'6.5"	101°39'47.3"	钠交代岩(矿石)
10	LSS12-19	38°38'6.5"	101°39'47.3"	钠交代岩(矿石)
11	LSS12-20	38°31'28.45"	101°54'9.43"	肉红色中粒二长花岗岩
12	LSS13-26	38°34'0.84"	101°47'53.88"	肉红色细粒钾长花岗岩
13	LSS13-33	38°34'0.48"	101°47'56.4"	肉红色细粒花岗岩
14	LSS13-36	38°34'0.84"	101°47'58.92"	肉红色细粒钾长花岗岩
15	LSS13-41	38°34'0.89"	101°47'58.30"	肉红色细粒钾长花岗岩

Nd-Sr-Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试方法为同位素稀释法,测试仪器为 ISOPROBE-T 及参照依据为 GB/T16272-1999《岩石中铈、钕、铅同位素测定方法》,实验过程中相对湿度为 50%,温度为 20 °C,同位素比值误差以 2σ 计。

Sr 同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,单带, M+, 可调多法拉第接收器接收. 质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 校正,标准测量结果: NBS987 为 0.710250 ± 0.000007 实验室流程本底: $\text{Rb}=2 \times 10^{-10} \text{ g}$, $\text{Sr}=2 \times 10^{-10} \text{ g}$. Nd 同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,三带, M+, 可调多法拉第接收器接收. 质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,标准测量结果: JMC 为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512109 \pm 0.000003$. 全流程本底 Sm-Nd 小于 $50 \times 10^{-9} \text{ g}$. 分析结果见表 2.

Pb 同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,用磷酸硅胶将样品点在铼带上,用静态接受方式测量铅同位素比值. NBS981 校正结果: $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1681 \pm 0.00008$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.91464 \pm 0.00033$, $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.059042 \pm 0.000037$, 全流程本底 $\text{Pb} < 100 \times 10^{-9} \text{ g}$. 分析结果见表 3.

4 结果分析

在讨论壳-幔地球化学和深部地质作用过程时, Sr、Nd、Pb 等同位素在时间和源区示踪方面有突出的优点,但放射性成因子体同位素的积累程度

与岩石的年龄有关(肖庆辉等, 2002; 周振华等, 2011). 所以笔者首先要对已测出的 Sr、Nd、Pb 同位素进行初始值计算, 相关参数计算采用不同岩浆期次不同岩石结晶年龄(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 所测年龄值, 另文发表)及成矿年龄(398 Ma; 李占游, 1987), 测试结果及相关计算结果见表 2 和表 3.

4.1 Sr-Nd 同位素特征

早古生代第 1 次侵入的灰白色二长花岗岩(LSS12-02、03): (1) $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.19363 \sim 0.70138$ (均值为 0.44750), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70640 \sim 0.70783$ (均值为 0.70712), 介于大陆地壳范围(0.706~0.718)(肖成东等, 2004; 周振华等, 2011; 郭志军等, 2014), $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化较小(34.164~54.435, 均值为 44.2994); (2) $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.08075 \sim 0.10991$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.51154 \sim 0.51192$ (均值为 0.51173), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-3.4 \sim -10.6$, 变化范围较大, 均值为 -7, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}=-0.44 \sim -0.59$, 说明岩浆源区的 Sm、Nd 分馏不明显, 故给出模式年龄是有效的, 可以参与有关讨论(吴福元等, 1997; Jahn *et al.*, 2000), 花岗岩源区对应的亏损地幔 Nd 的模式年龄 $t_{\text{DM2}}=2030 \sim 1441 \text{ Ma}$ (均值为 1735.5 Ma), 表明其来自于古-中元古代残留地壳源区, 残留古老地壳年龄二阶段模式年龄偏低的原因可能是地幔物质的混入.

早古生代第 2 次侵入的肉红色二长花岗岩(LSS12-04、12、20)及花岗闪长岩(LSS12-01): (1) $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 0.07588~0.17389 (均值为 0.11665) 和 0.16378, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 分别为 0.70807~0.71287 (均值为 0.71000) 和 0.70627 (均介于大陆

表 2 龙首山中段茂岭花岗岩类 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr, Nd isotopic compositions of granitoid of Jiling pluton in the middle Longshou Mountains

Table with 13 columns: 样品号 (Sample No.), 年龄 (Ma) (Age), Rb (10^-6), Sr (10^-6), 87Rb/86Sr (2σ), 87Sr/86Sr (2σ), Sm (10^-6), Nd (10^-6), 147Sm/144Nd (2σ), 143Nd/144Nd (2σ), εNd(t), fSm/Nd, tDM2 (Ma), and u(%). Rows include LSS12-02, LSS12-03, LSS12-01, LSS12-04, LSS12-12, LSS12-20, LSS12-05, LSS12-06, LSS12-33, LSS12-36, LSS12-41, LSS12-15, LSS12-16, LSS12-18, and LSS12-19.

注:计算所需的参数:λ(Sr)=1.39×10^-11年^-1, λ(Nd)=6.54×10^-12年^-1, 87Sr/86Sr和143Nd/144Nd所示的2σ误差为少数点后的最后位数;为减少147Sm/144Nd变化对Nd模式年龄计算产生的影响,表中所有tDM2年龄统一采用二阶段模式计算,计算公式如下:tDM2=(1/λSm)ln(1+A), A={143Nd/144Nd}m-[147Sm/144Nd]m-[(147Sm/144Nd)c](e^λt-1)/[(147Sm/144Nd)c]-[(143Nd/144Nd)c] (e^λt-1)/[(147Sm/144Nd)c]-[(143Nd/144Nd)c] (e^λt-1)/[(147Sm/144Nd)c] (e^λt-1); t: 侵入岩结晶年龄或成矿年龄。

表 3 龙首山中段茂岭花岗岩类 Pb 同位素组成

Table 3 Pb isotopic compositions of granitoid of Jiling pluton in the middle Longshou Mountains

Table with 13 columns: 样品号 (Sample No.), 年龄 (Ma) (Age), Th (10^-6), U (10^-6), Pb (10^-6), 208Pb/204Pb (2σ), 207Pb/204Pb (2σ), 206Pb/204Pb (2σ), (206Pb/204Pb)1, (207Pb/204Pb)1, (206Pb/204Pb)2, (207Pb/204Pb)2, μ, ω, and Th/U. Rows include LSS12-02, LSS12-03, LSS12-01, LSS12-04, LSS12-12, LSS12-20, LSS12-05, LSS12-06, LSS12-33, LSS12-36, LSS12-41, LSS12-15, LSS12-16, LSS12-18, and LSS12-19.

注:计算所需的参数:λ(238U)=1.55125×10^-10年^-1, λ(235U)=9.8485×10^-10年^-1, λ(232Th)=4.9475×10^-11年^-1, μ为现代测定的N(238U)/N(206Pb);ω为现代测定的N(235U)/N(206Pb)实测-μ(e^λt-1); t: 侵入岩结晶年龄或成矿年龄。

地壳范围 0.706~0.718), $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 前者变化较大 (57.671~125.863, 均值为 86.367) 而后者为 32.113; (2) $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 0.092 62~0.124 39 和 0.118 50, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 分别为 0.511 66~0.511 72 (均值为 0.511 69) 和 0.511 89, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 -7.5~-8.6 (均值为 -8.09) 和 -4.2, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 分别为 -0.37~-0.56 (均值为 -0.49) 和 -0.4 (均值为 -0.6~-0.2), 说明岩浆源区的 Sm、Nd 分馏不明显, 其对应的亏损地幔 Nd 的模式年龄 t_{DM2} 分别为 1 861~1 768 Ma (均值为 1 814.66 Ma) 和 1 498 Ma, 表明花岗岩源区来自于古-中元古代残留地壳源区。

晚古生代侵入的红色细粒 (钾长) 花岗岩 (LSS12-05, LSS13-26、33、36、41): (1) 后 4 个样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.062 15\sim 2.271 40$ (均值为 0.890 565), 而 LSS12-05 的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值达 18.319 59, 后 4 个样品 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.706 60\sim 0.709 52$ (均值为 0.707 89), 介于大陆地壳范围 (0.706~0.718), 而 LSS12-05 的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 (0.700 68) 小于地幔值 (0.704), 暗示岩石形成后, 斜长石可能受到后期地质作用, 热液蚀变导致 Sr 含量降低造成该比值出现异常 (凌洪飞等, 2006; 秦海鹏, 2012), LSS13-41 的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.705 44, 介于地壳 (0.706~0.718) 与地幔 (0.704) 之间, 暗示岩石形成时发生壳幔混合或者岩石形成后受蚀变热液的影响, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化较大 (20.1~78.0, 均值为 46.15), 其中 LSS12-05 的值为 -47.51 (应为后期蚀变作用所致); (2) $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.058 65\sim 0.123 38$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.511 64\sim 0.512 13$ (均值为 0.511 93), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-0.5\sim -9.5$, 变化范围较大, 均值为 -4.65, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}=-0.37\sim -0.70$ (均值为 -0.56), 说明岩浆源区的 Sm、Nd 分馏不明显, 其对应的亏损地幔 Nd 的模式年龄 t_{DM2} 分布在 1 914~1 561 Ma (均值为 1 737.5 Ma) 和 1 400~1 129 Ma (均值为 1 249.7 Ma) 两个阶段, 表明花岗岩源区来自于古元古代 (2 500~1 800 Ma) 和中元古代 (1 800~1 000 Ma) 残留地壳。

4.2 Pb 同位素特征

早古生代第 1 次侵入的灰白色二长花岗岩中现今同位素比值如下: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.328\sim 19.240$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.549\sim 15.619$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.390\sim 39.075$; 根据全岩 U、Th、Pb 含量和 Pb 同位素比值及岩石结晶年龄校正的初始 Pb 同位素比值如下: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.520\sim 17.716$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.515\sim 15.524$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=$

37.206~37.586, Pb 同位素比值经校正后与实验测试值偏差较大, 说明岩石具有较高的 U ($3.49\times 10^{-6}\sim 7.80\times 10^{-6}$, 均值为 5.65×10^{-6})、Th (21.50×10^{-6}), Th/U 比值为 2.76~6.16, 显示高放射性成因 Pb 同位素特征. 普通 Pb 同位素组成更多的是用来进行物源成因和示踪研究, μ 值越高, Pb 同位素增长越快, 地球上大量的岩石和矿石是从 $\mu=7\sim 10$ 的体系中演化而来的, 原始地球 (或地幔) 的平均 μ 值约 7.8 (陈道公等, 2009). 样品的 μ 值为 9.37~9.43 (均值为 9.40), 高于地幔值, 表明其岩石来源于壳源。

早古生代第 2 次侵入的肉红色二长花岗岩中现今同位素比值如下: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=30.209\sim 43.529$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.097\sim 25.076$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=39.107\sim 39.420$; 根据全岩 U、Th、Pb 含量和 Pb 同位素比值及结晶年龄校正的初始 Pb 同位素比值如下: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=25.824\sim 37.300$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.856\sim 16.634$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.736\sim 37.780$, Pb 同位素比值经校正后与现今值偏差很大, 样品都具有异常高的比值, 说明岩石具有很高的 U ($37.80\times 10^{-6}\sim 44.30\times 10^{-6}$, 均值为 41.05×10^{-6})、Th ($36.40\times 10^{-6}\sim 47.90\times 10^{-6}$, 均值为 42.15×10^{-6}), Th/U 比值为 0.96~1.08, μ 值为 18.47~30.24 (均值为 24.36). 其中 LSS12-20 中 U 含量达到 975×10^{-6} , Th 的含量达到 59.10×10^{-6} , 已达到矿化, Th/U 比值为 0.06, μ 值为 161.24, 显示超强高放射性成因 Pb 同位素特征. 花岗闪长岩现今同位素比值如下: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.359$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.571$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.400$; 根据全岩 U、Th、Pb 含量和 Pb 同位素比值及结晶年龄校正的初始 Pb 同位素比值: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.739$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.537$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.853$, Pb 同位素比值经校正后与现今值偏差基本一致, Th/U 比值为 2.81, μ 值为 9.41。

晚古生代侵入的 (钾长) 花岗岩中现今同位素比值如下: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.071\sim 19.767$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.577\sim 25.438$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.682\sim 42.593$; 根据全岩 U、Th、Pb 含量和 Pb 同位素比值及所测锆石 U-Pb 年龄结果校正的初始 Pb 同位素比值如下: $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.800\sim 18.080$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.505\sim 15.556$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=37.593\sim 37.846$, 其中 LSS13-33 具有异常的高值 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 25.438; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 201.335), Pb 同位素比值经校正后与现今值偏差很大, 样品都

具有异常高的比值,说明岩石具有较高的 U($9.47 \times 10^{-6} \sim 27.60 \times 10^{-6}$, 均值为 17.04×10^{-6})、Th ($27.70 \times 10^{-6} \sim 52.30 \times 10^{-6}$, 均值为 41.53×10^{-6})等放射性元素,Th/U 比值 1.58~2.93, μ 值为 9.36~9.49(均值为 9.41),其中 LSS13-33 中 U 含量达到 70.30×10^{-6} ,Th 的含量达到 68.00×10^{-6} ,Th/U 比值为 0.97, μ 值为 169.66.

5 讨论

5.1 物质来源与构造属性

花岗岩岩浆源区研究一直是备受学术界关注的问题之一,因为源区提供了花岗岩成因的绝大部分物质(郭志军等,2014)和矿质元素.花岗岩成因最被大家普遍接受的是地壳物质的部分熔融和壳幔相互作用(Barbarin, 1999;肖庆辉等,2002;罗红玲等,2010;敬海鑫等,2015).同位素体系研究可以揭示花岗岩成岩过程.由于地壳、地幔两大地球化学储库的 Sr、Nd、Pb(O、Hf)同位素比值之间存在显著差异,从而可以提供了应用不同同位素体系辨识其物质来源,示踪壳幔物质混合、循环和相互作用的可能性(肖庆辉等,2002).

古元古代龙首山群和中元古代敦子沟群分别为华北板块西南缘阿拉善地块结晶基底和盖层的重要组成部分(汤中立等,2002;夏明哲等,2011),并且柴宝民等(1986)认为该区的早古生代花岗岩是陆壳重熔、岩浆侵入结晶交代形成.而龙首山群为结晶基底,人们获得的龙首山群同位素年龄大多集中于 1 800~2 000 Ma,同位素年龄代表古老残留地壳的年龄,如变质侵入岩年龄中,斜长花岗岩的 Rb-Sr 年龄为 2 147 Ma,混合岩的 Rb-Sr 年龄为 2 065 Ma(甘肃地矿局,1989),伟晶花岗岩、条带状混合花岗岩和中细粒混合花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 1 812 Ma、1 858 Ma 和 1 873 Ma(王强,2014);变质表壳岩(盖层岩)中,黑云斜长片麻岩的 Rb-Sr 年龄为 1 949 Ma(甘肃地矿局,1989),花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 $1 890 \pm 40$ Ma(甘肃地矿局,1989),片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 914 Ma(甘肃地矿局,1989),斜长角闪岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 884 Ma(王强,2014).花岗岩的 Nd 模式年龄可以帮助判断其物质来源和岩石成因(凌洪飞等,2006).芟岭岩体的亏损地幔二阶段 Nd 模式年龄计算结果见表 2;早古生代第 1、2 次侵入的灰白色二长花岗岩(2 030~1 441 Ma,均值为 1 735.5 Ma)、灰白色二

长花岗岩、肉红色二长花岗岩(1 861~1 768 Ma,均值为 1 814.7 Ma)及肉红色(钾长)花岗岩(1 914~1 561 Ma,均值为 1 737.5 Ma;1 400~1 129 Ma,均值为 1 249.7 Ma)具有古老的 Nd 二阶段模式年龄,非常接近或略小于残留地壳年龄,表明岩体的主要物质源区应该来自古元古代龙首山群的贡献,年龄略小暗示岩体的形成过程中有幔源组分或年轻地壳物质的加入.中元古代墩子沟群的形成年代为 1 261 Ma(Rb-Sr 法,李文渊,1991),其时代与晚古生代侵入的大部分肉红色钾长花岗岩(1 249.7 Ma)的 Nd 二阶段模式年龄相近,说明晚古生代花岗岩的物质源区主要来自中元古代墩子沟群的贡献.在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 3)中,样品投点分布在远离地幔趋势演化线右上侧,但也有个别样品落入地幔演化趋势边缘,暗示岩体岩浆中有少量地幔物质的混入(李磊等,2013).

通常情况下, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值以 0 为界,正值代表岩浆来源于亏损地幔,负值代表源区来自于地壳或富集地幔(邵济安等,2010).古老地壳重熔岩石的铈同位素初始值一般均高于地幔演化线(陈道公等,2009).芟岭岩体在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图解中(图 4)投点位于古一中元古代地壳上方,且随着时间的推移,地幔组分在岩体形成过程中逐渐增大,在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 3)和($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- t 图解(图 5)也显现同样规律.总之,上述特征暗示出,这些花岗岩岩浆起源于古老基底地壳物质的重熔,但也有部分地幔物质的贡献.

李占游(1987)对芟岭花岗岩体的氧同位素研究发现,全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 0.91%~1.05%,

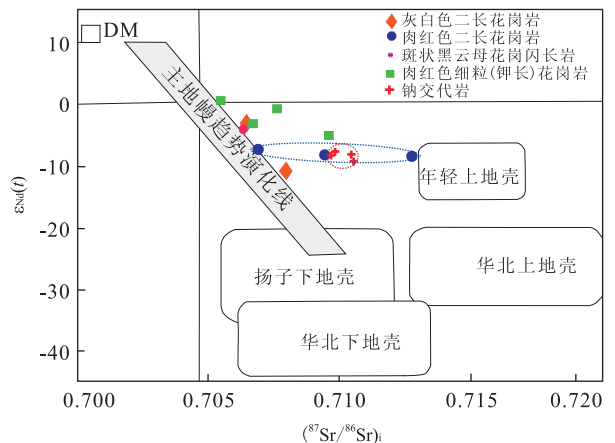


图 3 龙首山中段芟岭花岗岩体($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系
Fig. 3 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ relations of Jiling granitic pluton in the middle Longshou Moutains
DM. 亏损地幔,据郭志军(2014)

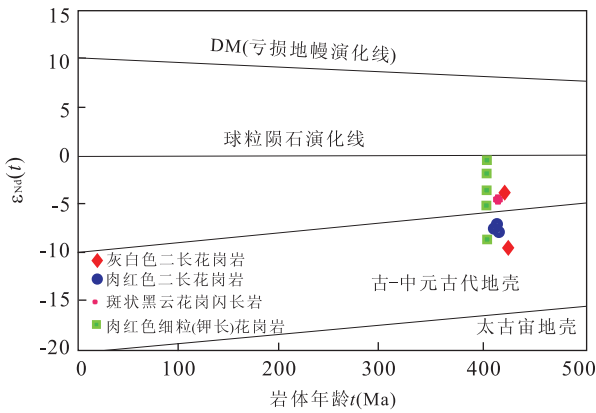


图 4 龙首山中段茭岭花岗岩体 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 关系

Fig. 4 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ relations of Jiling granitic pluton in the middle Longshou Moutains

古-中元古代地壳和大古宙地壳的界线引自隋振民和徐学纯(2010);底图据郭志军等(2014)

推测其花岗岩源岩是以碎屑岩-碳酸盐沉积建造为主体的龙首山群. 笔者对花岗岩长石 Pb 同位素研究发现,按花岗岩形成年龄为 400 Ma,代入二次等时线公式计算,所得铅的来源年龄 $t=2\ 008$ Ma,反映花岗岩来源的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比值的 μ 值为 9.3,从而笔者推断花岗岩的源岩是来自 2 008 Ma 前的壳源岩石. 而龙首山群碎屑岩-碳酸盐沉积建造正是这一时代的产物,重熔一套碎屑岩-碳酸盐岩石将导致花岗岩富 ^{18}O 且初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低,因为龙首山群片岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.723\ 2\sim 0.767\ 7$. 笔者所测样品中个别样品的初始 Sr 同位

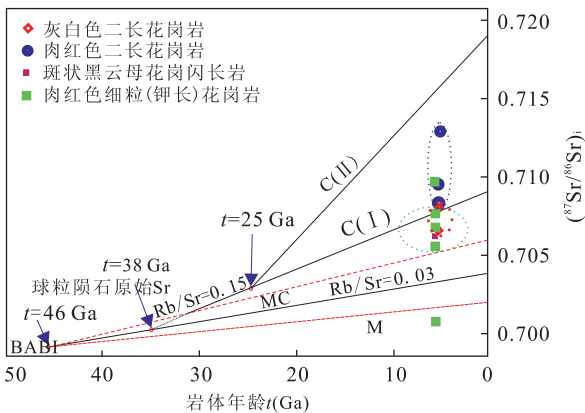


图 5 龙首山中段茭岭花岗岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-t$ 关系

Fig. 5 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i-t$ relations of Jiling granitic pluton in the middle Longshou Moutains

M. 幔源型花岗岩类源区; MC. 幔壳混源型或同熔型花岗岩类源区; C. 壳源型或改造型花岗岩类源区; (I). 下部大陆壳; (II). 上部大陆壳; 红色虚线为玄武岩源区数值范围(0.702~0.706);底图据吴利仁(1985)

素偏低(LSS12-01 为 0.706 27, LSS13-26 为 0.706 6),略高于上地幔最大初始锶比值,有可能有下地壳或上地幔物质的混入. 笔者通过混源型花岗岩壳幔源成分比 u 的估算,由 Sr 混合参数方程 $u = (I_c - I_i) / (I_c - I_m) \times 100\%$ 计算获得(邢凤鸣,1987),其中花岗岩形成时地壳的锶初始比值 $I_c = 0.709\ 2 - 0.000\ 002\ 47 \times t$, I_i 为花岗岩样品的锶初始值,花岗岩形成时上地幔的锶初始值 $I_m = 0.704 - 0.000\ 001\ 1 \times I_i \times t$,其中 t 的单位为 Ma. 个别样品的花岗岩中有幔源组分的加入(LSS12-02 中幔源成分占 12.78%;LSS12-01 中幔源成分占 20.62%),但是所占总样品中的比例不超过 4%. 说明地幔物质的贡献还是很少的,主要还是地壳物质的贡献.

在 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 相关图解上(图 6),除早古生代第 2 次侵入的肉红色二长花岗岩未投图之外,因为具有很高的 Pb 同位素组成(具有超高放射性成因 Pb 组成,暗示来自成熟地壳源区),其余 3 类不同期次的花岗岩样品都位于地幔演化及延长线附近,说明存在有幔源岩浆与地壳物质之间的相互作用(张承帅等,2012);同时样品投影点较为分散,且沿 NHRL 线(northern hemisphere reference line)及岩石形成先后顺序(由早到晚)呈明显的线性分布趋势,而这种沿 NHRL 线性趋势通常被解释为铅具有混合来源(Canals and Cardellach,1997;蒋少涌等,2006). 在 Zarnnan and Doe(1981)的 Pb 同位素构造模式图解上(图 7),样品投点多数落在造山带与上地壳,并靠近大陆上地壳演化线,说明源岩物质与地壳关系密切;也有个别样品落在造山带与地幔演化线之间(LSS12-01、LSS12-03),说明有少量地幔物质参与了茭岭岩体的形成. 而前人对华南 40 多个花岗岩体中长石 Pb 同位素组成统计(沈渭洲,1997;肖庆辉等,2002),壳源型和壳幔型花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值区别明显,壳源型花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值通常大于 15.600,在 Pb 同位素构造模式图上位于造山带演化线以上的区域内;壳幔混源型花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值通常小于 15.600,在 Pb 同位素构造模式图上位于造山带演化线以下的区域内. 这是由于 ^{235}U 的半衰期(7.038×10^8 a)比 ^{238}U 的半衰期(44.0×10^8 a)短的多, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值的增长主要出现在地球形成早期. 因此,壳源型花岗岩具有高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,说明它们主要由较古老的地壳岩石形成. 壳幔混源型花岗岩具有低的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,主要与地幔或年轻地壳物质的加入有关. 茭岭岩体

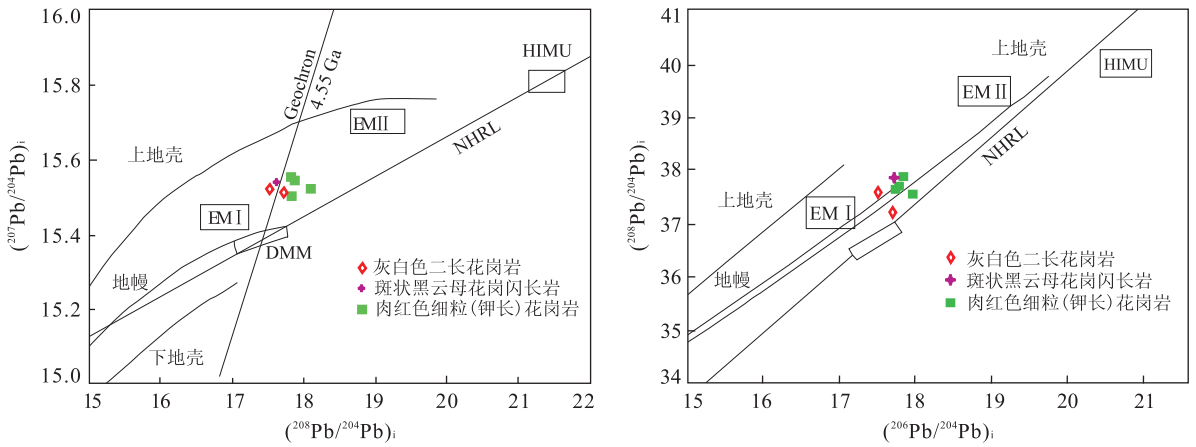


图 6 龙首山中段茈岭花岗岩体 Pb 同位素组成

Fig. 6 Pb isotopic diagrams of Jiling granitic pluton in the middle Longshou Moutains

DMM. 亏损地幔端元;EM(I、II). 富集地幔端元,据 Zindler and Hart(1986); Geochron. 零等时线;NHRL. 北半球参考线据 Hart(1984);中国大陆地幔、下地壳和上地壳数据据李龙等(2001);底图据张承帅等(2012)

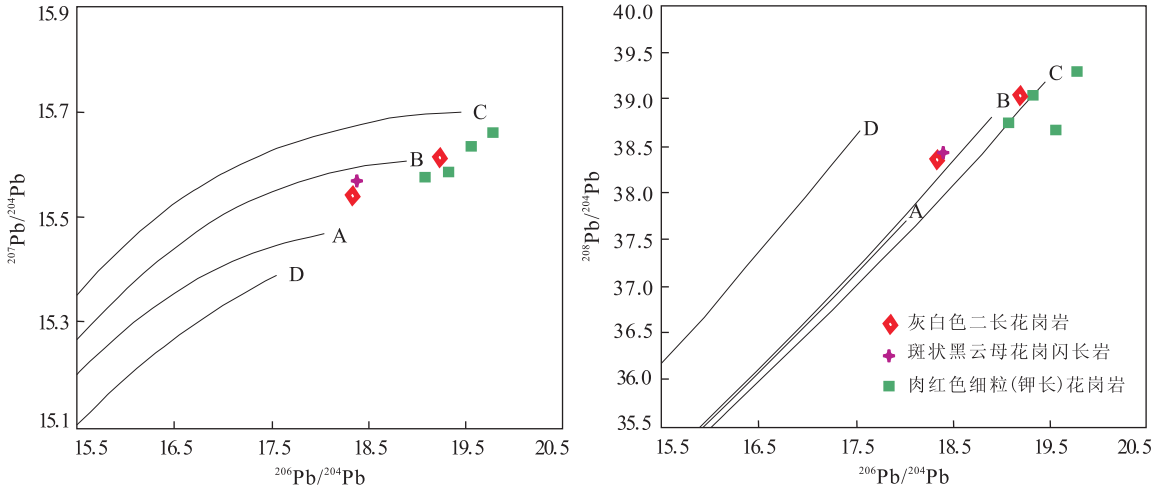


图 7 龙首山中段茈岭花岗岩体 Pb 同位素构造模式

Fig. 7 Pb isotopic tectonic model diagrams of Jiling granitic pluton in the middle Longshou Moutains

A. 地幔;B. 造山带;C. 上地壳;D. 下地壳;底图据 Zarnnan and Doe(1981)

中灰白色二长花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 均值为 15.594, 小于 15.6, 说明二长花岗岩的形成可能受幔源物质的影响;肉红色二长花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 均值为 19.383, 大于 15.6, 毫无疑问其形成于古老地壳物质的熔融;肉红色细粒(钾长)花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 均值为 15.616, 略大于 15.6, 暗示岩石的形成可能受到地幔物质的混入, 这跟 Sr、Nd 同位素判断的结果一致。

因此, 不同期次岩石组成岩体的 Sr-Nd-Pb 同位素数据及图解结果表明, 茈岭花岗岩岩浆源区是以古元古代龙首山群组成的残留地壳物质为主, 其次是中元古代地壳物质, 同时也有少量幔源物质的混入。

5.2 岩体与铀成矿关系

龙首山地区花岗岩浆带的产生与龙首山全区的地质背景不可割裂, 加里东旋回中, 由于南部祁连裂谷向北部推挤, 使龙首山地区发生了比较广泛的岩浆活动, 由于茈岭地区构造应力集中, 影响深度更大, 在深部硅碱质及热水气液影响下, 地壳较深部位的古老地壳较基性火山质原岩重熔上侵(柴宝民等, 1986), 同时有少量幔源物质参与到花岗岩的成岩过程中, 最后在相对拉张环境中固结成岩, 这能够更加全面地解释茈岭富铀岩体的岩石成因. 软流圈地幔物质的上涌和新生幔源岩浆的底侵作用是壳幔相互作用的主要形式, 它们能够为花岗岩源区提供一定的物质来源和大量源区熔融所需的热量(周新民,

2003;毛景文等,2004;李良林等,2011;张承帅等,2012;李巍等,2015;朱越等,2015),而导致这一深部地质过程的动力学机制与龙首山地区古生代特殊的大地构造活动密切相关.因此,岩体在形成过程中幔源组分的贡献和岩浆充分的分异演化对与花岗岩相关的碱交代型铀矿的形成起着极其重要的作用,花岗岩的侵位是铀矿形成的重要控矿因素之一.

碱交代型铀矿化均赋存于菱岭古生代花岗岩体中(图 1b),岩体成岩年龄(402~416 Ma)和铀成矿年龄(400~370 Ma)时差小,表明菱岭古生代花岗岩体与铀矿化关系密切.

笔者通过 11 件正常花岗岩和 4 件钠交代岩(矿石) Sr-Nd-Pb 同位素对比研究发现,钠交代岩的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i(0.709 61~0.710 44,均值为0.710 04)、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-7.66~-9.61,均值为-8.50)与古生代第二次侵入的肉红色斑状二长花岗岩极为相似,在 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 3)上两者投影点也是吻合,且均具有放射性成因铅特征,表明研究区碱交代型铀成矿主要与古生代第二次侵入有关.其他期次花岗岩体高铀背景值表明,可能也提供了一定的铀源.

6 结论

(1)从早到晚,花岗岩的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值介于大陆地壳范围内, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 均值具有先升后降、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均值先降后增的特征,其 t_{DM2} 均值分别为 1 735.50 Ma、1 814.66 Ma、1 737.50 Ma,接近残留地壳年龄;不同阶段岩体的 Pb 同位素比值均较高, $\mu=9.36\sim 9.49$ (平均为 9.41),显示为高放射性成因铅同位素特征.

(2)研究表明花岗岩的岩浆源区物质以古元古代龙首山群组成的残留地壳为主,其次是中元古代墩子沟群组成的地壳物质,同时也有少量幔源物质的混入.

(3)研究区碱交代型铀成矿主要与早古生代晚期第二次侵入密切相关,是铀成矿主要物质来源,同时也是铀矿找矿重要识别标志.

致谢:野外工作得到了核工业 203 研究所赵如意、陈云杰等地质同行前辈们的大力支持和帮助;Sr-Nd-Pb 同位素测试过程中得到了核工业北京地质研究院刘牧老师的帮助;在论文修改过程中,张树明教授提出了宝贵的意见和建议,论文评审阶段审稿专家和编委提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢!

References

- Barbarin, B., 1999. Genesis of the Two Main Types of Peralkaline Granitoids. *Geology*, 24 (4): 295. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0295:gottmt>2.3.co;2
- Bosch, D., Maury, R. C., Azzouzi, M. E., et al., 2014. Lithospheric Origin for Neogene-Quaternary Middle Atlas Lavas (Morocco): Clues from Trace Elements and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Lithos*, 205: 247 - 265. doi: 10.1016/j.lithos.2014.07.009
- 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
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province, 1989. Regional Geological Book of Gansu Province, Geological Publishing Press, Beijing (in Chinese).
- Canals, A., Cardellach, E., 1997. Ore Lead and Sulphur Isotope Pattern from the Low-Temperature Veins of the Catalonian Coastal Ranges (NE Spain). *Mineralium Deposita*, 32 (3): 243 - 249. doi: 10.1007/s001260050089
- Chai, B. M., Tian, Z. Y., Yang, R. M., et al., 1986. The Granitic Rock Characteristics and Its Relationship with Uranium Mineralization in the Longshou Mountain (inside Information). No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang (in Chinese).
- Chen, D. G., Zhi, X. C., Yang, H. T., 2009. Geochemistry, Press of University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese).
- Chen, N. S., Wang, X. Y., Zhang, H. F., et al., 2007. Geochemistry and Nd-Sr-Pb Isotopic Compositions of Granitoids from Qaidam and Oulongbuluke Micro-Blocks, NW China: Constrinis on Basement Nature and Tectonic Affinity. *Earth Science*, 32(1): 7 - 22 (in Chinese with English abstract).
- Fu, C. M., Chen, Y. J., Xu, G. Z., et al., 2012. The Analysis of Uranium Resources Potential Evaluation in the Malianjing-Yushigou of the Longshou Moutain, Gansu Province. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang (in Chinese).
- Guo, Z. J., Li, J. W., Huang, G. J., et al., 2014. Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Characteristics of Ore-Bearing Granites in the Honghuaerji Scheelite Deposit, Inner Mongolia. *Geology in China*, 41(4): 1226 - 1241 (in Chinese with English abstract).
- Hart, S. R., 1984. A Large-Scale Isotope Anomaly in the

- Southern Hemisphere Mantle. *Nature*, 309 (5971): 753—757. doi:10. 1038/309753a0
- Huang, J. B. , Huang, S. J. , 2005. Regional Metallogenic Characteristics of China's Uranium Resources. *Uranium Geology*, 21(3):129—138 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M. , Condie, K. C. , 1995. Evolution of the Kaapvaal Craton as Viewed from Geochemical and Sm-Nd Isotopic Analyses of Intracratonic Pelites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (11): 2239—2258. doi: 10. 1016/0016—7037(95)00103—7
- Jahn, B. M. , Wu, F. Y. , Hong, D. W. , 2000. Important Crustal Growth in the Phanerozoic; Isotopic Evidence of Granitoids from East-Central Asia. *Journal of Earth System Science*, 109 (1): 5 — 20. doi: 10. 1007/bf02719146
- Jia, X. H. , Wang, X. D. , Yang, W. Q. , et al. , 2014. The Early Jurassic A-Type Granites in Northern Guangxi, China; Petrogenesis and Implications. *Earth Science*, 39 (1): 21—36 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y. , Yang, T. , Li, L. , et al. , 2006. Lead and Sulfur Isotopic Compositions of Sulfides from the TAG Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2597—2602 (in Chinese with English abstract).
- Jing, H. X. , Sun, D. Y. , Gou, J. , et al. , 2015. Chronology, Geochemistry and Hf Isotope of Granite from Southern Xingkai Block. *Earth Science*, 40(6): 982—994 (in Chinese with English abstract).
- Kaygusuz, A. , Arslan, M. , Siebel, W. , et al. , 2014. LA-ICP MS Zircon Dating, Whole-Rock and Sr-Nd-Pb-O Isotope Geochemistry of the Camiboğazlı Pluton, Eastern Pontides, NE Turkey; Implications for Lithospheric Mantle and Lower Crustal Sources in Arc-Related I-Type Magmatism. *Lithos*, 192—195; 271—290. doi: 10. 1016/j. lithos. 2014. 02. 014
- Li, L. , Sun, W. Z. , Meng, X. F. , et al. , 2013. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics of the Granitoids of Xiaoshan Mountain Area in the Southern Margin of North China Block and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (8) : 2635—2652 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. , Zheng, Y. F. , Zhou, J. B. , 2001. Dynamis Model for Pb Isotope Evolution in the Continental Crust of China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 61—68 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. L. , Zhou, H. W. , Chen, Z. H. , et al. , 2011. Geochemical Characteristics of Granites in Taimushan Area, Fujian Province and their Geological Significance. *Acta petrologica et Mineralogical*, 30(4): 593—609 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. , Bi, S. J. , Yang, Z. , et al. , 2015. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Characterization of Sheshan Granodiorite in Southern Edge of Dayaoshan, Guidong; Constraints on Caledonian Diagenesis and Mineralization. *Earth Science*, 40(1): 17—33 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y. , 1991. The Sinian in the Longshou Mountains Areas. *Northwest Geology*, 12(2): 1—5 (in Chinese).
- Li, Z. Y. , 1987. Geochemistry of Jiling Granite and Uranium Mineralization. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 4: 1—3 (in Chinese).
- Ling, H. F. , Shen, W. Z. , Sun, T. , et al. , 2006. Genesis and Source Characteristics of 22 Yanshanian Granites in Guangdong Province; Study of Element and Nd-Sr Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2687—2703 (in Chinese with English abstract).
- Ling, H. F. , Xu, S. J. , Shen, W. Z. , et al. , 1998. Nd, Sr, Pb and O Isotopic Compositions of Late Proterozoic Gezong- and Donggu-Granites in the West Margin of Yangtze Plate and Comparison with Other Coeval Granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 269—278 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. D. , Mo, X. X. , Luo, Z. H. , et al. , 2003. Pb-Sr-Nd-O Isotope Characteristics of Granitoids in East Kunlun Orogenic Belt. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(6): 584—588 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. , Qiu, J. S. , Yang, Z. L. , 2013. Petrogenesis of the Maoliling Pluton in Linhai County, Zhejiang Province; Constraints from Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (12) : 4069—4086 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. , Hu, R. Z. , Feng, C. X. , et al. , 2013. U-Pb Zircon Age, Geochemical, and Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints on the Age and Origin of Mafic Dykes from Eastern Shandong Province, Eastern China. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, 87 (4) : 1045—1057. doi: 10. 1111/1755—6724. 12109
- Luo, H. L. , Wu, T. R. , Zhao, L. , 2010. Geochemistry and Tectonic Implications of the Permian I-Type Granitoids from Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(5): 805—820 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W. , Xie, G. Q. , Li, X. F. , et al. , 2004. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 45—55 (in Chinese with English abstract).

- Miller, R. G., O'Nions, R. K., 1985. Source of Precambrian Chemical and Clastic Sediments. *Nature*, 314 (6009): 325—330. doi:10.1038/314325a0
- Peng, Y. S., Sun, Y. M., Tian, Z. Y., et al., 1983. The Study of Uranium Metallogenic Belt in Longshou Mountains, Gansu Province. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang (in Chinese).
- Qin, H. P., 2012. Petrology of Early Paleozoic Granites and Their Relation to Tectonic Evolution of Orogen in the North Qinlian Orogenic Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 93—111 (in Chinese with English abstract).
- Rong, J. S., Han, Z. H., Xia, Y. L., 1984. Granitic Pluton Type of Mineralization Characteristics of Uranium Deposits and Mineralization in China. *Radioactive Geology*, 1:1—11 (in Chinese).
- Shang, P. Q., Hu, R. Z., Bi, X. W., et al., 2012. Sr, Nd and Pb Isotopic Geochemistry of Gangue Minerals in the Xiazhuang Uranium Orefield, Northern Guangdong Province. *China in Geology*, 39(6): 1847—1857 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Mu, B. L., Zhu, H. Z., et al., 2010. Material Source and Tectonic Settings of the Mesozoic Mineralization of the DaHinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649—656 (in Chinese with English abstract).
- Shen, W. Z., 1997. Stable Isotope Geology Tutorial. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- Sui, Z. M., Xu, X. C., 2010. Sr-Nd Isotopic Characteristics of Jurassic Granites in Northeastern Da Hinggan Mountains and Their Geological Implications. *Geology in China*, 37(1): 48—56 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G., Zhao, Z. H., 1995. Uranium Geology in Northwest China (Volume 1-II). Bureau of Nuclear Geology of Shaanxi Province, Xi'an (in Chinese).
- Tang, Z. L., Bai, Y. L., 1999. Geotectonic Framework and Metallogenic System in the Southwest Margin of North China Palecontinent. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 271—284 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. L., Bai, Y. L., Xu, Z. H., et al., 2002. Metallogenic System and Metallogenic Tectonic Dynamics in Southwest Margin of North China Continental (Longshou-Qilian Mountain). Geological Publishing Press, Beijing, 168—178 (in Chinese).
- Tu, J. H., 1985. More Discussion About Some Problems on the Genesis of the Hongshiquan Uranium Deposit. *Uranium Geology*, 1(6): 53—58 (in Chinese).
- Wang, A. D., Liu, Y. C., Santosh, M., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes from the Metamorphic Basement in the Wuhe Complex; Implications for Neoproterozoic Active Continental Margin along the Southeastern North China Craton and Constraints on the Petrogenesis of Mesozoic Granitoids. *Geoscience Frontiers*, 4(1): 57—71. doi:10.1016/j.gsf.2012.05.001
- Wang, M. Q., Tu, H. J., Wu, S. M., et al., 1982. The Host Rock and Mineralization Characteristics in Hongshiquan Uranium Deposits. *Uranium Geology*, (5): 390—396 (in Chinese).
- Wang, Q., 2014. Study on Metamorphism of Longshoushan Baijiazuzi Group (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. Q., Hao, L. B., Lu, J. L., et al., 2013. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Hexipu Granite and Its Geological Implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(6): 729—735 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Jiang, B. M., Lin, Q., 1997. Post-Tectonic Granitic Isotope Characteristics and Crustal Growth's Significance of Northern China Orogenic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 42(20): 2188—2192 (in Chinese).
- Wu, L. R., 1985. Mesozoic Granitoids in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Xia, M. Z., Xia, Z. D., Lu, R. H., et al., 2011. Attribution of Longshoushan Terrane; Evidence from the Crustal Structures and Mesoproterozoic-Neoproterozoic Strata. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(2): 132—137 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, C. D., Zhang, Z. L., Zhao, L. Q., 2004. Nd, Sr and Pb Isotope Geochemistry of Yanshanian Granitoids in Eastern Inner Mongolia and their Origins. *Geology in China*, 31(1): 57—64 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. Granite Research Thinking and Methods. Geological Publishing Press, Beijing (in Chinese).
- Xing, F. M., 1987. On the Application of Initial Strontium Isotope Ratios in Division of Granitic Types. *Acta Petrologica Sinica*, 2(5): 75—80 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Liu, R., Wang, X. Y., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China; Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Earth Science*, 39(9): 1258—1276 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., Hou, Z. Q., Jiang, Y. F., et al., 2011. Sr-Nd-Pb

- and Zircon Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Late Jurassic Granitic Porphyry at Qulong, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2003—2010 (in Chinese with English abstract).
- Zarnman, R. E., Doe, B. R., 1981. Plumbotectonics—the Model. *Tectonophysics*, 75: 135—162.
- Zhang, B. J., Hu, S. K., 2010. Evaluation of Uranium Deposit in China. *China Nuclear Geology*, Beijing, 179—225 (in Chinese).
- Zhang, C., Jin, J. F., 1987. The Form of Uranium Migration and the Depositional Mechanism of Uranium of the Hongshiquan Deposit. *Northwest Geoscience*, (5): 65—74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. S., Su, H. M., Yu, M., et al., 2012. Zircon U-Pb Age and Nd-Sr-Pb Isotopic Characteristics of Dayang-Juzhou Granite in Longyan, Fujian Province and its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 225—242 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Jin, L. L., Zhang, L., et al., 2005. Limitations for Properties and Tectonic Properties of Basement in with Granitoids Geochemistry and Pb-Sr-Nd Isotopic Composition. *Science in China (Series D)*, 35(10): 914—926 (in Chinese).
- Zhang, K. M., 1989. Discussions on the Uraniferous Possibility of Different Granite Rock Body in Longshoushan Area. *Journal of East China Geological Institute*, 12(2): 63—67 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., et al., 2003. My Thinking about Granite Genesis of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556—565 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. H., Lü, L. S., Wang, A. S., et al., 2011. Deep Source Characteristics and Tectonic-Magmatic Evolution of Granites in the Huanggang Sn-Fe Deposit, Inner Mongolia: Constraint from Sr-Nd-Pb-Hf Multiple Isotopes. *Geological Science and Technology Information*, 30(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y., Zhou, H. W., Li, S. L., et al., 2015. Late Paleoproterozoic Crustal Anatexis and Its Tectonic Significance Evidence from Petrology and Zircon U-Pb Ages of Migmatite from Xiaoqinling Area, West Henan. *Earth Science*, 40(5): 824—839 (in Chinese with English abstract).
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493—571. doi:10.1146/annurev. ea. 14. 050186. 002425
- 89—138.
- 柴宝民, 田志永, 杨瑞木, 等, 1986. 龙首山地区花岗岩类特征及其与铀矿化的关系. 咸阳: 核工业 203 研究所.
- 陈道公, 支霞臣, 杨海涛, 2009. 地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 陈能松, 王新宇, 张宏飞, 等, 2007. 柴—欧微地块花岗岩地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素组成: 基底性质和构造属性启示. *地球科学*, 32(1): 7—22.
- 傅成铭, 陈云杰, 徐高中, 等, 2012. 《甘肃省龙首山马莲井—玉石沟地区铀资源潜力评价》设计书. 咸阳: 核工业 203 所.
- 郭志军, 李进文, 黄光杰, 等, 2014. 内蒙古红花尔基白钨矿矿床赋矿花岗岩 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征. *中国地质*, 41(4): 1226—1241.
- 黄净白, 黄世杰, 2005. 中国铀资源区域成矿特征. *铀矿地质*, 21(3): 129—138.
- 贾小辉, 王晓地, 杨文强, 等, 2014. 桂北圆石山早侏罗世 A 型花岗岩的岩石成因及意义. *地球科学*, 39(1): 21—36.
- 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 等, 2006. 大西洋洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究. *岩石学报*, 22(10): 2597—2602.
- 敬海鑫, 孙德有, 苟军, 等, 2015. 兴凯地块南部花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. *地球科学*, 40(6): 982—994.
- 李磊, 孙卫志, 孟宪锋, 等, 2013. 华北陆块南缘蜻山地区燕山期花岗岩类地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 29(8): 2635—2652.
- 李龙, 郑永飞, 周建波, 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型. *岩石学报*, 17(1): 61—68.
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 等, 2011. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 593—609.
- 李巍, 毕诗健, 杨振, 等, 2015. 桂东大瑶山南缘社山花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 对区内加里东期成岩成矿作用的制约. *地球科学*, 40(1): 17—33.
- 李文渊, 1991. 龙首山地区的震旦系. *西北地质*, 12(2): 1—5.
- 李占游, 1987. 芟岭花岗岩及铀矿化的地球化学研究. *矿物岩石地球化学通讯*, 4: 1—3.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等, 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究. *岩石学报*, 22(12): 2687—2703.
- 凌洪飞, 徐士进, 沈渭洲, 等, 1998. 格宗、东谷岩体 Nd、Sr、Pb、O 同位素特征及其与扬子板块边缘其它晋宁期花岗岩对比. *岩石学报*, 14(3): 269—278.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等, 2003. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征. *地球学报*, 24(6): 584—588.

附中文参考文献

甘肃省地矿局, 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社,

- 刘亮,邱检生、杨泽黎,等,2013.浙江临海猫狸岭岩体的成因:年代学、地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约.岩石学报,29(12): 4069—4086.
- 罗红玲,吴泰然,赵磊,2010.乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义.北京大学学报(自然科学版),46(5): 805—820.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1): 45—55.
- 彭永石,孙英民,田志永,等,1983.甘肃省龙首山铀成矿带调研报告.咸阳:核工业 203 所.
- 秦海鹏,2012.北祁连造山带早古生代花岗岩岩石学特征及其地质意义(博士学位论文).北京:中国地质科学院,93—111.
- 戎嘉树,韩泽宏,夏毓亮,1984.我国一岩体型铀矿床的矿化特征及成矿作用.放射性地质,1: 1—11.
- 商朋强,胡瑞忠,毕献武,等,2012.粤北下庄铀矿田脉石矿物 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究.中国地质,39(6): 1847—1857.
- 邵济安,牟保磊,朱慧忠,等,2010.大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景.岩石学报,26(3): 649—656.
- 沈渭洲,1997.稳定同位素地质学教程.北京:原子能出版社.
- 隋振民,徐学纯,2010.大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类 Sr-Nd 同位素特征及其地质意义.中国地质,37(1): 48—56.
- 孙圭,赵致和,1995.中国西北部铀矿地质(上卷 II).西安:核工业西北地质局.
- 汤中立,白云来,1999.华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统.地学前缘,6(2): 271—284.
- 汤中立,白云来,徐章华,等,2002.华北古陆西南缘(龙首山—祁连山)成矿系统及成矿构造动力学.北京:地质出版社,168—178.
- 涂汉江,1985.再谈红石泉铀矿床成因的若干问题.铀矿地质,1(6): 53—58.
- 王木清,涂汉江,伍舒梅,等,1982.红石泉含矿主岩及矿化特征.铀矿地质,(5): 390—396.
- 王强,2014.龙首山群白家嘴子组变质作用研究(硕士学位论文).西安:长安大学.
- 魏俏巧,郝立波,陆继龙,等,2013.甘肃河西堡花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.矿物岩石地球化学通报,32(6): 729—735.
- 吴福元,江博明,林强,1997.中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义.科学通报,42(20): 2188—2192.
- 吴利仁,1985.中国东部中生代花岗岩类.岩石学报,1(1): 1—10.
- 夏明哲,夏昭德,卢荣辉,等,2011.龙首山地块的归属问题:来自地壳结构和中—新元古代地层的证据.地球科学与环境学报,33(2): 132—137.
- 肖成东,张忠良,赵利青,2004.东蒙地区燕山期花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素及岩石成因.中国地质,31(1): 57—64.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨,等,2002.花岗岩研究思维与研究方法.北京:地质出版社.
- 邢凤鸣,1987.锶同位素初始比值在划分花岗岩成因类型上的应用探讨.岩石学报,2(5): 75—80.
- 杨振,刘锐,王新宇,等,2014.云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义:锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据.地球科学,39(9): 1258—1276.
- 杨志明,侯增谦,江迎飞,等,2011.西藏驱龙矿区早侏罗世斑岩的 Sr-Nd-Pb 及锆石 Hf 同位素研究.岩石学报,27(7): 2003—2010.
- 仇宝聚,胡绍康,2010.中国铀矿床研究评价第五卷.北京:中国核工业地质局,179—225.
- 张诚,金景福,1987.红石泉铀矿床铀的迁移形式及沉淀机制.西北地质科学,(5): 65—74.
- 张承帅,苏慧敏,于森,等,2012.福建龙岩大洋一莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义.岩石学报,28(1): 225—242.
- 张宏飞,靳兰兰,张利,等,2005.西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成限制基底性质及其构造属性.中国科学(D辑),35(10): 914—926.
- 张宽谋,1989.对龙首山地区不同花岗岩体含铀性的探讨.华东地质学院学报,12(2): 63—67.
- 周新民,2003.对华南花岗岩研究的若干思考.高校地质学报,9(4): 556—565.
- 周振华,吕林素,王挨顺,2011.内蒙古黄岗锡铁矿床花岗岩深部源区特征与构造岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf 多元同位素制约.地质科技情报,30(1): 1—14.
- 朱越,周汉文,李少林,等,2015.豫西小秦岭地区晚古元古代地壳深熔作用及构造意义:岩石学和锆石 U-Pb 年代学证据.地球科学,40(5): 824—839.