

大兴安岭北端洛古河东花岗岩的地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和岩石成因*

武广¹ 陈衍景^{1,2**} 赵振华¹ 赵太平¹ 李之彤³ 张哲³

WU Guang¹, CHEN YanJing^{1,2**}, ZHAO ZhenHua¹, ZHAO TaiPing¹, LI ZhiTong³ and ZHANG Zhe³

1. 中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室, 广州 510640

2. 北京大学造山带与地壳演化实验室, 北京 100871

3. 中国地质调查局沈阳地质矿产研究所, 沈阳 110032

1. Key Laboratory of Mineralization Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

3. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Shenyang 110032, China

2008-08-31 收稿, 2008-11-20 改回.

Wu G, Chen YJ, Zhao ZH, Zhao TP, Li ZT and Zhang Z. 2009. Geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb age and petrogenesis of the East Luoguhe granites at the northern end of the Great Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (2): 233 - 247

Abstract The East Luoguhe intrusion in Mohe County, Heilongjiang Province, located in the northern end of the Great Hinggan Range, is mainly composed of monzogranite-porphyry, syenogranite-porphyry and quartz monzonite-porphyry, with minor dioritic microgranular enclave. The intrusion belongs to I-type granite, with affinity to high-K calc-alkaline series. The SHRIMP zircon U-Pb age of the granite-porphyry is 129.8 ± 2.2 Ma, indicating that the intrusion formed in Early Cretaceous. Its SiO_2 and Al_2O_3 contents range 68.03% ~ 74.32% and 13.06% ~ 14.55%, respectively. The $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios range 0.45 ~ 0.86, ASI values from 0.94 to 1.11 (mostly < 1.1), and the $\text{Mg}^\#$ index from 18 to 42 (mostly < 30). The REE content is between 160.00×10^{-6} and 235.15×10^{-6} , with δEu of 0.31 ~ 0.52 (average 0.41) and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratios of 8.99 ~ 17.87 (average 13.82). The East Luoguhe intrusion is characterized by low-Sr (118×10^{-6} ~ 268×10^{-6}), high-Y (16.9×10^{-6} ~ 26.1×10^{-6} , generally $> 18 \times 10^{-6}$), and low Sr/Y ratios (5.62 ~ 13.81). The intrusion is enriched in Rb, Th, U, K, Zr, Hf and LREE (e.g. La, Ce, Nd and Sm), but strongly depleted in Ba, Sr, P and Ti, with notable depletion of Nb and Ta. The geochemical signatures above are similar to those of post-collisional granitoids, suggesting that the East Luoguhe intrusion can be classified into the group of post-collisional granites. The intrusion has low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio (0.702486 ~ 0.707269, average 0.705434), clear negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value (-3.45 ~ -2.64, average -3.01), young Nd-model age (969 ~ 1131 Ma, average 1018 Ma), and extremely low $\delta^{18}\text{O}$ ratio (-8.1‰ to 4.1‰ for K-feldspar). And the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (18.5939 ~ 18.6721, average 18.6426), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.6019 ~ 15.6058, average 15.6035) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (38.4058 ~ 38.5249, average 38.4613) ratios for K-feldspar are relatively high. The Nd-Sr-Pb-O isotope systematics shows that the intrusion originated from partial melting of a source with remarkable mantle-derived components. The source is likely the juvenile crust formed during the convergence of Rodinia supercontinent at the transition from Mesoproterozoic to Neoproterozoic. Given that the Paleo-Asian Ocean was finally closed at the end of Late Paleozoic, followed by closing of the Mongol-Okhotsk Ocean during Permian-Middle Jurassic, the East Luoguhe intrusion of Early Cretaceous age must be formed in the collision regime between the Siberia and Mongol-Sinokorea continents, especially in a tectonic transition setting from compression to extension.

Key words East Luoguhe Early Cretaceous granite; Zircon SHRIMP U-Pb age; Element geochemistry; Isotope geochemistry; Great Hinggan Range

* 本文得到国家973计划(2006CB403508)、国家自然科学基金项目(40772055)和国家科技支撑计划项目(2007BAB25B03)的资助。

第一作者简介: 武广, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 矿床学和地球化学专业, E-mail: wuguang@gig.ac.cn

** 通讯作者: 陈衍景, 男, 1962年生, 博士, 教授, 矿床学专业, E-mail: yjchen@pku.edu.cn

摘要 大兴安岭北端漠河县洛古河东岩体主要岩石类型为二长花岗岩、正长花岗岩和石英二长岩,内部可见闪长质微粒包体,属高钾钙碱性I型花岗岩。花岗岩的元素地球化学和锆石 SHRIMP 铀-铅年代学研究结果表明,洛古河东岩体形成于早白垩世,其花岗岩体的锆石 SHRIMP 铀-铅年龄为 129.8 ± 2.2 Ma。花岗岩的 SiO_2 含量介于 68.03% ~ 74.32% 之间, Al_2O_3 含量介于 13.06% ~ 14.55% 之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 0.45 ~ 0.86 之间,铝饱和指数为 0.94 ~ 1.11, $\text{Mg}^\#$ 指数介于 18 ~ 42 之间且多小于 30。稀土元素总量为 $160.00 \times 10^{-6} \sim 235.15 \times 10^{-6}$, δEu 介于 0.31 ~ 0.52, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 8.99 ~ 17.87,为轻稀土富集型。岩体 Sr 含量低,介于 $118 \times 10^{-6} \sim 268 \times 10^{-6}$ 之间,而 Y 含量高,介于 $16.9 \times 10^{-6} \sim 26.1 \times 10^{-6}$ 之间, Sr/Y 比值低,介于 5.62 ~ 13.81 之间,属低铈高钇型岩石。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中, Rb、Th、U、K、Zr、Hf 和轻稀土元素(如 La、Ce、Nd 和 Sm 等)富集, Ba、Sr、P 和 Ti 等元素强烈亏损, Nb 和 Ta 具有中等-弱亏损。主量、稀土和微量元素特征表明,岩石具后碰撞花岗岩类的地球化学特征,属后碰撞花岗岩。岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 -3.45 ~ -2.64, 平均 -3.01; 亏损地幔 Nd 模式年龄介于 969 ~ 1131 Ma 之间, 平均 1018 Ma; 铈初始比值 (I_{Sr}) 介于 0.702486 ~ 0.707269 之间, 平均 0.705434; 钾长石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.5939 ~ 18.6721、15.6019 ~ 15.6058 和 38.4058 ~ 38.5249, 平均值分别为 18.6426、15.6035 和 38.4613; 岩体中的钾长石氧同位素组成很低, $\delta^{18}\text{O}$ (‰) 值介于 -8.1 ~ -4.1 之间, 多为负值, 表明洛古河东岩体为低 ^{18}O 花岗岩。Nd、Sr、Pb 和 O 同位素组成显示洛古河东岩体形成于含有较多幔源成分的源区物质的部分熔融作用, 推测源区主要为 Rodinia 超大陆会聚过程中(中元古代—新元古代之交)形成的初生地壳。由于古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋分别于中生代末期和二叠纪—中侏罗世闭合, 因此大兴安岭北端早白垩世花岗岩应该形成于中朝-蒙古大陆与西伯利亚大陆碰撞造山过程的后碰撞阶段。

关键词 洛古河东早白垩世花岗岩; 锆石 SHRIMP 铀-铅年龄; 元素地球化学; 同位素地球化学; 大兴安岭

中图法分类号 P588.121; P597.3

大兴安岭是我国东北重要的银、铅、锌、铜、钼多金属成矿带(徐贵忠等, 1998; 李长珠, 1999; 祁进平等, 2005), 亦是我国 16 个重点矿产勘查区之一, 但北端找矿进展缓慢, 而邻国却大矿聚集, 原因是我国境内基础地质研究薄弱, 很多重要地质问题认识分歧, 制约了找矿部署。研究区大地构造位置特殊、地质作用复杂, 既是古亚洲洋造山带的一部分(任纪舜等, 1990; 马醒华等, 1993; 赵越等, 1994), 又毗邻蒙古-鄂霍茨克造山带(Zhao *et al.*, 1990; Zonenshain *et al.*, 1990; 李锦轶, 1998; 李锦轶等, 2004a), 还被作为滨太平洋成矿域; 中生代期间又先后经受蒙古-鄂霍茨克造山带造山过程和大兴安岭构造-岩浆活动的影响(李锦轶等, 2004a; 武广等, 2005, 2006, 2007, 2008a)。那么, 究竟研究区是什么背景、性质的成矿带? 应以何种模式指导地质调查和找矿? 我们认为, 解决上述问题的关键是要查明大兴安岭中生代岩浆岩成因及其形成的构造背景。目前主要有 2 种认识: 其一, 认为大兴安岭中生代岩浆岩与东侧太平洋板块俯冲有关(蒋国源和权恒, 1988; 赵国龙等, 1989; 马家骏和方大赫, 1991; 邓晋福等, 1996; 朱勤文等, 1997; 吴福元等, 2000); 第二种观点认为与北部蒙古-鄂霍茨克海向后的俯冲有关(Wang *et al.*, 2002), 或与兴-蒙造山带的造山后演化有关(吴福元等, 1999; Fan *et al.*, 2003; 林强等, 2004)。洛古河东岩体位于大兴安岭北端, 紧邻蒙古-鄂霍茨克造山带, 又是大兴安岭中生代岩浆岩的组成部分。因此, 洛古河东花岗岩的研究可能是解决这一问题的突破口。

本文通过黑龙江省漠河地区洛古河东岩体的岩石地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和 Sr、Nd、Pb、O 同位素研究, 确定以洛古河东岩体为代表的早白垩世花岗岩属后碰撞花岗岩, 主要是中元古代末期—新元古代初期形成的年轻地

壳物质与古陆壳物质一起部分熔融的产物, 同时有少量地幔物质的加入, 形成于中朝-蒙古大陆与西伯利亚大陆碰撞造山过程的挤压向伸展转变期, 即后碰撞阶段。进而确定研究区主要属于蒙古-鄂霍茨克造山-成矿带的一部分。

1 区域地质背景

漠河地区位于大兴安岭的最北端, 大地构造位置属于额尔古纳地块上黑龙江前陆盆地(和政军等, 2003; 李锦轶等, 2004b)。盆地西南侧为额尔古纳隆起区, 由古元古界兴华渡口群、新元古界佳疙瘩组、下寒武统额尔古纳组中-浅变质岩及晋宁期、兴凯-萨拉伊尔期、晚华力西期和印支期侵入岩组成(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 黑龙江省地质矿产局, 1993; 武广等, 2005, 2008a)。中生代期间, 上黑龙江前陆盆地沉积一套陆相碎屑岩建造, 自下而上被划分为下-中侏罗统绣峰组、中侏罗统二十二站组和漠河组(黑龙江省地质矿产局, 1993)。伴随着蒙古-鄂霍茨克洋闭合和蒙古-华北大陆与西伯利亚大陆的碰撞, 上黑龙江前陆盆地的陆缘碎屑岩地层变形、变质, 形成漠河逆冲-推覆构造和韧性剪切带, 并造成泥盆系结晶灰岩、泥灰岩早飞来峰形式覆盖在中生代碎屑岩之上(Li *et al.*, 1982; 李锦轶, 1998; Ren *et al.*, 1999; 李锦轶等, 2004a; 武广等, 2006, 2008b)。燕山期侵入岩多呈小岩株、岩枝状产出, 主要分布于洛古河东、857.2 高地和北极村西南一带(图 1)。可划分出花岗闪长(斑)岩系列和花岗(斑)岩系列。花岗闪长岩系列以北极村西南岩体为代表, 形成于晚侏罗世(武广等, 2008a); 花岗岩系列以洛古河东岩体为代表, 形成于早白垩世。

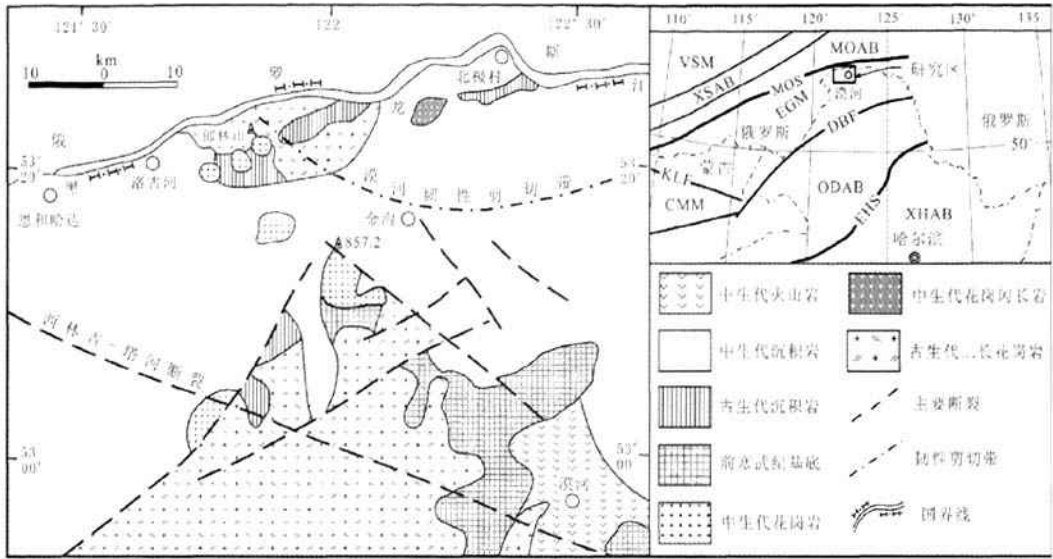


图1 漠河地区地质简图(据黑龙江省地质矿产局,1993 改编)

Fig.1 Geological sketch map of Mohe area in the northern Great Hinggan Range (modified from the Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province, 1993)

2 岩相学特征

洛古河东岩体位于漠河县西北 80km 处的郎林山一带, 由 3 个岩枝组成, 侵入于下寒武统额尔古纳河组和中侏罗统漠河组, 出露面积约 1.5km²。主要岩石类型为二长花岗斑岩、正长花岗斑岩和石英二长斑岩。

二长花岗斑岩和正长花岗斑岩呈浅黄灰色, 中细粒斑状结构。岩石中有微粒包体, 呈浑圆状, 大小在 3~12cm, 主要成分为长石和黑云母, 矿物颗粒多在 0.5mm 以下, 包体与寄主岩石边界清晰, 可见很细的暗色冷凝边。镜下观察, 岩石呈斑状花岗岩结构, 文象结构。斑晶总量可达岩石的 40%, 成分有斜长石、钾长石、石英和黑云母。斜长石斑晶呈自形、半自形板状, 有连晶, 可见卡式双晶和聚片双晶, 但不发育, 有的受交代影响, 双晶纹变模糊, 大小在 0.5~2.5mm, 含量约 15%; 钾长石斑晶呈半自形板状, 具卡式双晶及微条纹, 有的为隐纹长石, 有交代斜长石和黑云母现象, 在晶体外侧或边缘常见文象状矿物交生体, 大小在 0.5~3.0mm, 含量约 12%; 石英圆粒状、不规则粒状, 有少许裂纹及微裂纹, 在其周边普遍发育文象状交生体, 大小在 0.3~1.4mm, 含量 8% 左右; 黑云母自形、半自形片状, 具棕褐-淡黄多色性, 部分有绿泥石化及绿帘石化, 更有少量晶体被榍石交代呈其假象, 大小在 0.3~1.2mm, 含量 5% 左右。基质占总量的 60%, 主要由斜长石、钾长石和石英微晶组成, 微晶大小在 0.02~0.3mm, 呈微花岗结构及文象结构。副矿物除榍石外, 尚见磷灰石。

石英二长斑岩, 岩石呈黄褐色, 新鲜面呈灰白色, 亦可见暗色微粒包体。斑状结构, 基质具微花岗结构。斑晶含量占 40%, 成分有斜长石、石英和黑云母。斜长石多半自形板状, 大小在 0.5~4mm, 一般为 1~2mm, 有的晶体见聚片双晶, 绝大多数晶体已不同程度绢云母化, 含量 26%~30%; 石英他形浑圆状, 有裂纹, 有的晶体周围有环边, 部分晶体内见黑云母包晶, 晶体大小多数在 1~4mm 之间, 含量 2%~4%; 黑云母自形-半自形片状, 大小在 0.5~3.5mm, 几乎完全蚀变分解为绿泥石和铁质, 含量 8%~10%。基质含量占总量的 60%, 由 0.1mm 以下的长石、石英和黑云母微晶组成。

3 样品和分析方法

在野外分别对洛古河东 3 个早白垩世岩体采集新鲜、无蚀变的岩石。将样品破碎至 200 目以下之后进行元素和同位素分析。

主量、稀土和微量元素由国土资源部廊坊地球物理地球化学勘查研究所测试。其中全岩主量元素采用 XRF 分析, 稀土和微量元素采用 ICP-MS 分析。主量元素分析精度优于 3%、稀土和微量元素分析精度优于 5%。

Pb、Sr 和 Nd 同位素由中国地质科学院地质研究所同位素开放实验室测试。Pb 同位素测试对象是相应样品中的钾长石。通过阴离子交换树脂提取 Pb, 质谱测试采用 Tl 作为内标进行质量分馏校正, 在英国 Nu Instrument 公司生产的高分辨多接收等离子质谱仪 (Nu Plasma HR) 上进行, 以 NBS981 标准校准仪器, 测定过程中随时测定 NBS981 来监控

仪器,每一组数据由 20 个扫描构成,Hg 干扰通过测定²⁰²Hg 扣除,所获得的 Pb 同位素比值分析误差小于 0.05%。Rb、Sr 和总稀土分离采用 AG50W × 8 阳离子交换树脂,Sm 和 Nd 的分离提纯采用 P507 萃淋树脂。采用 HDEHP 交换柱分离 Nd,收集含 Nd 部分的解析液进行质谱测定。同位素稀释质谱测定⁸⁷Rb、⁸⁶Sr、¹⁴⁷Sm 和¹⁴⁴Nd 含量。⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值用质谱仪直接测定。质谱分析在装有可调多接收器的 MAT261 质谱计上完成,⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和 Nd 同位素比值用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 作质量分馏校正。实验室对 Sr 标样 NBS987 测定结果为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.71025 ± 2,对 Nd 标样 GBW04419 测定结果为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512725 ± 10,对实验室内部标准样 JM (Na₂O₃) 的分析结果为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511125 ± 8。⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的测试精度优于 ±2% 和 ±0.5%。Rb-Sr 全流程空白本底约为 1 × 10⁻¹⁰ g,Sm-Nd 全流程空白本底为 5 × 10⁻¹¹ g。氧同位素由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室测试。数据通过 BrF₃ 分析方法获得,质谱仪型号为 MAT251EM,分析精度为 ±0.2‰。

花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年样品采自洛古河东岩体内的中细粒花岗岩。锆石由沈阳地质矿产研究所地质实验组按常规重力和磁选方法分选,为保证各粒级锆石颗粒的完整性,将重约 10kg 的岩石经过粗碎及中碎,将粉碎后的样品分粒级进行淘洗。在双目镜下对所选锆石观察发现,锆石呈淡黄色,金刚-玻璃光泽,无包体,多数为长柱状,柱体发育,多数锥体发育不好,长宽比可达 5 : 1,晶体大者 0.15 ×

0.07mm,一般 0.08 × 0.04mm。最后,将锆石与数粒 RSES 参考样 TEM 置于环氧树脂中,磨制约一半大小,使锆石内部暴露,用于阴极发光和 SHRIMP U-Pb 分析。锆石阴极发光研究在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针研究室完成,SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院地质研究所 SHRIMP II 上完成,样品分析流程及原理参见 Williams (1998) 和 Nelson(1999)。应用 RSES 参考锆石 TEM(417Ma) 进行元素间的分馏校正,应用 SL13(年龄为 572Ma,U 含量 238 × 10⁻⁶) 标定样品的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Ludwig SQUID1.0 及 ISOPLT 程序。应用实测²⁰⁴Pb 校正锆石中的普通铅。采用年龄为²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。

4 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

锆石阴极发光图像显示,中细粒花岗岩 ML-1 样品中大多数锆石晶体形态较好,呈单锥或双锥状,具清楚的生长韵律环带(图 2),表明锆石是岩浆成因。

锆石 SHRIMP 分析结果见表 1。可以看出,花岗岩的 U 和 Th 含量分别介于 321 × 10⁻⁶ ~ 3570 × 10⁻⁶ 和 216 × 10⁻⁶ ~ 7536 × 10⁻⁶ 之间。经计算,花岗岩的 Th/U 比值变化相对较大(介于 0.09 ~ 2.11 之间,平均 0.93),除 ML1-3.1 点外,Th/U 比值都大于 0.1。研究表明,岩浆型锆石的 Th/U 比值大于 0.1,而且各锆石的 Th 和 U 之间具有正相关关系(Claesson *et al.*, 2000)。据此认为研究区花岗岩类中的锆石为岩浆型锆石。

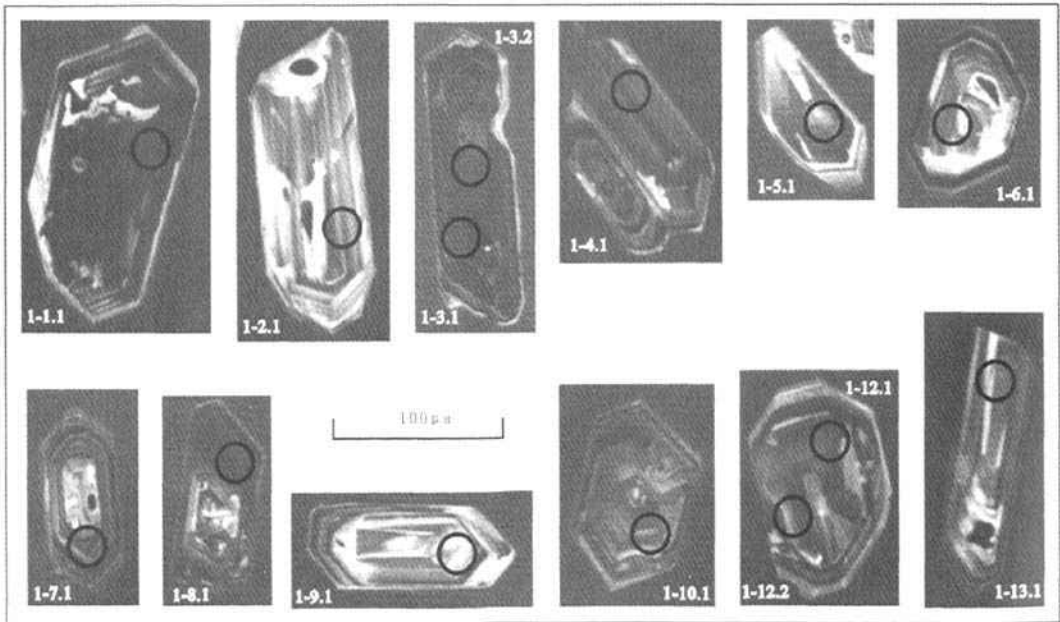


图 2 洛古河东岩体花岗岩中部分锆石的形态及分析点位图

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from granite-porphyry of the East Luoguhe intrusion. Circles in zircon crystals indicate positions of SHRIMP analytical sites. 1 - 2. 1: Number of analyzed spot

表 1 洛古河东岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 Zircon U-Pb SHRIMP data for the East Luoguhe intrusion from Mohe area

测试点	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ (%)
ML1-1.1	0.38	3570	7536	2.18	64.2	133.0 \pm 3.6	0.0500(2.3)	0.1437(3.6)	0.02084(2.7)
ML1-2.1	3.15	321	420	1.35	5.86	131.1 \pm 4.2	0.0840(18)	0.2370(19)	0.02055(3.2)
ML1-3.1	1.40	2525	216	0.09	45.3	131.5 \pm 3.6	0.0434(5.2)	0.1233(5.8)	0.02061(2.8)
ML1-3.2	0.44	1852	1177	0.66	32.2	128.5 \pm 3.5	0.0491(4.1)	0.1363(5.0)	0.02013(2.8)
ML1-4.1	1.28	1491	740	0.51	26.3	129.6 \pm 3.5	0.0446(5.7)	0.1248(6.3)	0.02030(2.8)
ML1-5.1	1.61	407	624	1.59	6.79	122.1 \pm 3.7	0.0574(11)	0.1510(12)	0.01912(3.0)
ML1-6.1	2.84	394	372	0.98	6.62	121.3 \pm 3.7	0.0471(13)	0.1230(14)	0.01900(3.1)
ML1-7.1	0.78	2255	897	0.41	41.2	134.6 \pm 3.6	0.0459(4.4)	0.1336(5.2)	0.02109(2.7)
ML1-8.1	0.32	3210	1289	0.41	56.7	130.9 \pm 3.5	0.0489(2.2)	0.1383(3.5)	0.02051(2.7)
ML1-9.1	0.89	814	817	1.04	14.0	126.9 \pm 3.5	0.0463(5.9)	0.1268(6.5)	0.01988(2.8)
ML1-10.1	1.38	750	558	0.77	12.9	126.2 \pm 3.7	0.0494(12)	0.1350(13)	0.01978(3.0)
ML1-11.1	0.25	1658	357	0.22	106	464 \pm 12	0.05570(1.4)	0.573(3.0)	0.0745(2.7)
ML1-12.1	0.26	1021	948	0.96	18.0	130.6 \pm 3.6	0.0546(4.4)	0.1540(5.2)	0.02046(2.8)
ML1-12.2	2.77	857	703	0.85	14.8	125.2 \pm 3.6	0.0460(11)	0.1240(12)	0.01960(2.9)
ML1-13.1	2.89	338	545	1.67	5.66	121.0 \pm 3.8	0.0470(21)	0.1230(22)	0.01895(3.2)

误差为 1σ ; Pb 和 Pb* 分别为普通和放射成因 Pb。标准的误差是 0.75%, 普通 Pb 用测量的 ^{204}Pb 校正

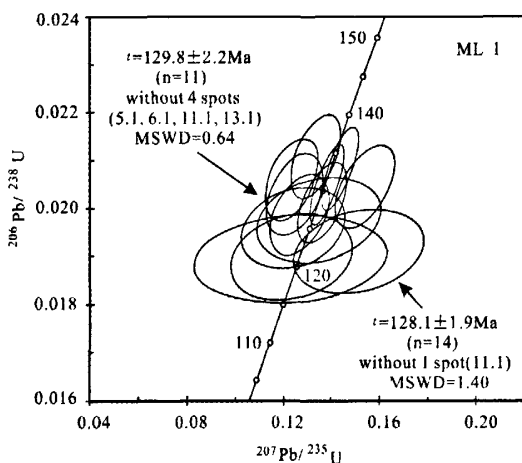


图 3 花岗斑岩 (ML1) 锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图
Fig. 3 Concordia diagram of the granite-porphry (ML1) from Mohe area

在一致曲线图 (图 3) 中, ML1 样品 14 个数据点集中分布, 14 个锆石点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $128.1 \pm 1.9\text{Ma}$, 11 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $129.8 \pm 2.2\text{Ma}$ 。上述年龄代表了花岗斑岩体的结晶年龄。

5 元素地球化学特征

5.1 主量元素特征

本次工作选取 14 件样品进行了主量、稀土及微量元素

分析, 结果见表 2。

洛古河东岩体 SiO_2 含量高 (介于 68.03% ~ 74.32% 之间), Al_2O_3 含量低 (介于 13.06% ~ 14.55% 之间), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 介于 0.45 ~ 0.86 之间, $\text{Mg}^\#$ 指数低 (介于 18 ~ 42 之间), 多数小于 30。与 Barbarin (1999) 花岗岩类分类标准对比, 相当于富钾钙碱性花岗岩类 (KCG)。

在花岗岩类实际矿物含量 QAP 分类图解 (图 4a) 中, 洛古河东岩体岩石类型为正长花岗岩、二长花岗岩和石英二长岩。

在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 4b) 中, 洛古河东岩体投影点全部位于高钾钙碱性系列。此类岩石主要形成于大陆弧和板块碰撞后两种大地构造背景 (Roberts and Clemens, 1993)。

本区花岗岩的主量元素特征、岩石类型及岩石系列与泛非 (Pan-African) 期 Tuareg 地盾后碰撞期间形成的 Ao 和 Ki 岩体 (Liegeois *et al.*, 1998) 相似。

5.2 稀土元素特征

由表 2 可知, 洛古河东岩体重稀土元素含量较高 (Yb 介于 2.0×10^{-6} ~ 2.7×10^{-6}); 具有中等-强烈的 Eu 负异常 (δEu 介于 0.31 ~ 0.52); 稀土元素分馏程度中等 ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 8.99 ~ 17.87), 但轻稀土分馏较明显, 重稀土元素分馏不明显, 稀土配分曲线为轻稀土富集型 (图 5a)。其稀土元素特征和配分曲线形态与典型岛弧、山弧环境下的中酸性火成岩相似, 但其重稀土元素含量, 如 Yb 等明显低于典型岛弧、山弧环境下的中酸性火成岩 (岛弧英安岩的平均 Yb 含量为 4.4×10^{-6} , Martin *et al.*, 2005), 稀土分馏程度亦偏高, 而与泛非期后碰撞花岗岩相似。

表2 漠河地区洛古河东岩体主量元素(wt%)、稀土元素及微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 The analyzed data of major (wt%), rare earth and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the East Luoguhe intrusion from Mohe region

样号	ML-1	ML-2	ML-3	ML-4	ML-5	ML-16	ML-17	ML-34	ML-35	ML-36	ML-37	ML-44	ML-58	ML-66	Tuareg 地盾后碰撞 Ao, Ki 岩体
SiO ₂	72.80	74.06	71.53	70.43	72.19	73.35	72.94	68.69	68.04	68.03	69.01	74.32	71.10	71.35	59.59 ~ 75.52
TiO ₂	0.28	0.22	0.30	0.31	0.26	0.22	0.24	0.48	0.47	0.46	0.45	0.18	0.28	0.28	
Al ₂ O ₃	13.57	13.06	13.85	13.99	13.84	13.39	13.73	14.53	14.15	14.12	14.55	13.37	13.59	13.44	12.00 ~ 16.89
Fe ₂ O ₃	0.86	0.87	1.26	0.84	0.96	0.76	0.02	1.19	1.58	1.17	1.63	0.11	0.32	0.65	
FeO	1.73	1.56	1.68	2.49	1.80	1.72	2.39	2.77	2.11	2.50	1.95	1.16	1.40	1.12	
MnO	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07	0.02	0.04	0.04	
MgO	0.39	0.29	0.44	0.80	0.33	0.36	0.35	0.85	0.77	0.84	0.74	0.29	0.69	0.40	0.13 ~ 3.59
CaO	1.26	0.93	1.28	1.65	1.09	1.04	0.97	1.06	1.47	1.31	0.82	1.04	1.50	1.14	
Na ₂ O	3.13	3.03	3.10	3.01	3.12	3.12	2.60	3.31	4.04	3.21	3.85	3.78	2.93	3.72	
K ₂ O	5.29	5.11	5.26	5.33	5.29	5.26	5.84	5.46	4.71	5.75	5.45	5.27	5.31	5.62	
P ₂ O ₅	0.08	0.06	0.09	0.12	0.08	0.06	0.06	0.16	0.16	0.16	0.15	0.04	0.07	0.06	
LOI	0.42	0.45	0.67	0.35	0.46	0.19	0.45	1.40	1.78	1.68	1.20	0.47	2.32	1.56	
Total	99.85	99.67	99.50	99.37	99.46	99.52	99.69	99.97	99.34	99.30	99.87	100.05	99.55	99.38	
Na ₂ O/K ₂ O	0.59	0.59	0.59	0.56	0.59	0.59	0.45	0.61	0.86	0.56	0.71	0.72	0.55	0.66	0.50 ~ 1.71
A/CNK	1.03	1.07	1.06	1.02	1.08	1.05	1.11	1.09	0.98	1.02	1.06	0.97	1.02	0.94	
Mg [#]	22	18	22	31	18	21	21	28	28	30	28	29	42	29	20 ~ 35
La	32	36	37	48	43	41	53	44	55	47	47	38	52	50	
Ce	73	79	87	103	87	86	103	91	98	90	100	67	95	92	
Pr	8.7	9.2	10.2	12.2	10.2	10.5	12.9	11.4	12.7	11.6	11.0	7.8	11.1	10.6	
Nd	30.7	31.5	35.2	43.9	35.6	37.3	42.9	40.4	44.2	41.2	38.8	27.8	39.8	37.8	
Sm	5.51	5.73	5.73	7.26	5.90	6.51	7.07	6.67	7.28	6.89	6.41	4.80	6.19	5.96	
Eu	0.66	0.58	0.69	0.84	0.55	0.60	0.71	0.96	1.09	1.08	0.94	0.77	0.75	0.75	
Gd	4.23	4.47	4.20	5.75	4.56	5.02	5.20	5.26	5.72	5.38	5.04	4.24	5.48	5.15	
Tb	0.68	0.75	0.64	0.85	0.70	0.76	0.75	0.79	0.83	0.76	0.75	0.70	0.85	0.82	
Dy	3.98	4.52	3.59	4.72	3.95	4.36	3.90	4.19	4.56	4.25	4.08	3.62	4.37	4.11	
Ho	0.74	0.84	0.67	0.83	0.70	0.78	0.68	0.73	0.78	0.77	0.72	0.66	0.81	0.75	
Er	2.12	2.59	2.12	2.34	2.00	2.31	1.99	2.09	2.26	2.22	2.01	1.94	2.31	2.16	
Tm	0.34	0.42	0.31	0.35	0.30	0.36	0.30	0.31	0.32	0.31	0.29	0.32	0.36	0.36	
Yb	2.2	2.7	2.1	2.2	2.1	2.5	2.0	2.1	2.1	2.1	2.0	2.05	2.29	2.27	0.59 ~ 5.6
Lu	0.34	0.40	0.30	0.31	0.31	0.38	0.29	0.29	0.31	0.32	0.30	0.30	0.35	0.35	
∑REE	165.20	178.70	189.75	232.55	196.87	198.38	234.69	210.19	235.15	213.88	219.34	160.00	221.66	213.08	
Eu/Eu*	0.40	0.34	0.41	0.38	0.31	0.31	0.34	0.48	0.50	0.52	0.49	0.51	0.39	0.40	0.22 ~ 0.93
(La/Yb) _N	9.81	8.99	11.88	14.71	13.80	11.06	17.87	14.13	17.66	15.09	15.84	12.50	15.31	14.85	
Sr	163	118	186	232	160	136	173	235	204	268	244	177	171	141	59 ~ 774
Rb	279	273	270	289	288	305	352	233	187	232	216	214	254	352	
Ba	481	323	567	603	553	505	608	724	610	725	697	503	630	702	
Th	38.8	43.6	38.8	40.0	45.8	41.6	37.4	24.7	26.9	24.2	25.2	23.4	29.5	28.2	
Nb	26.8	30.8	26.9	28.5	30.5	30.3	25.9	13.2	13.7	15.0	17.3	17.4	14.1	12.1	
Zr	201	169	219	216	212	196	127	243	240	238	246	126	199	199	
Cs	5.8	7.7	5.8	14.9	6.9	6.6	7.4	8.7	4.6	10.9	5.4	3.9	8.4	7.0	
Ga	18.7	19.4	18.4	21.2	20.6	20.7	19.6	18.2	19.4	18.2	19.7	17.9	19.8	18.9	
Hf	7.1	6.0	7.2	6.0	6.6	6.4	6.8	7.3	7.3	7.6	7.5	4.89	5.93	5.64	
Sc	4.4	4.3	4.6	6.6	4.7	4.2	3.3	4.6	4.6	5.3	5.2	—	—	—	
Cr	7.0	7.3	4.7	24.4	6.4	3.8	5.0	9.6	8.9	7.9	4.0	3.0	13.4	6.0	5
V	22.2	19.2	28.5	32.7	20.8	17.6	18.8	43.6	48.9	56.1	40.9	18.0	29.0	23.0	
Ni	5.6	4.8	8.5	13.9	6.7	4.4	5.5	14.8	16.5	19.9	11.4	3.1	12.0	2.0	8
U	8.9	10.7	7.4	6.6	7.4	10.4	7.6	5.5	6.3	6.5	3.0	19.3	13.1	4.4	
Y	26.1	21.0	16.9	19.0	17.5	18.7	17.9	18.8	21.9	19.4	22.6	19.2	21.6	21.5	12 ~ 41
Ta	2.74	3.12	2.55	2.77	3.18	3.19	2.56	1.68	1.61	1.86	2.15	1.90	1.33	1.08	
δSr	0.23	0.16	0.22	0.23	0.19	0.16	0.17	0.26	0.21	0.30	0.26	0.27	0.19	0.16	0.07 ~ 1.23
Sr/Y	6.25	5.62	11.01	12.21	9.14	7.27	9.66	12.50	9.32	13.81	10.80	9.22	7.92	6.56	1.44 ~ 48.38

注: Tuareg 地盾后碰撞 Ao, Ki 岩体资料引自 Liegeois *et al.* (1998), A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 分子数, Mg[#] = 100 × [Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)] 原子数

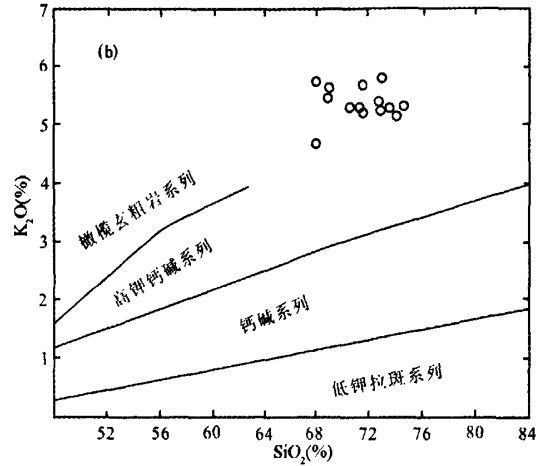
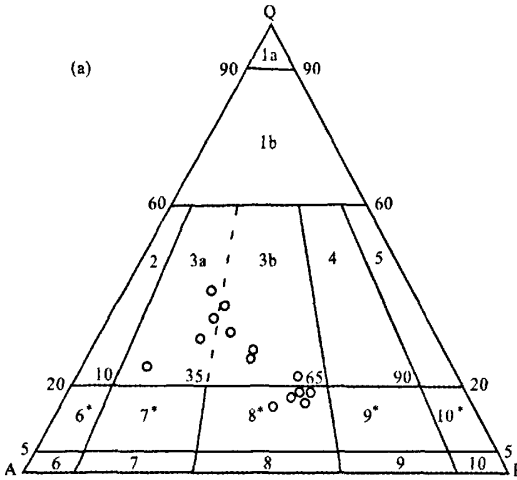


图4 花岗岩类实际矿物含量 QAP 分类图解 (a, 据 Streckeisen, 1976) 和 SiO_2 与 K_2O 关系图解 (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 4 Diagrams of QAP(a, after Streckeisen, 1976) and K_2O versus SiO_2 (b, after Peccerillo and Taylor, 1976)

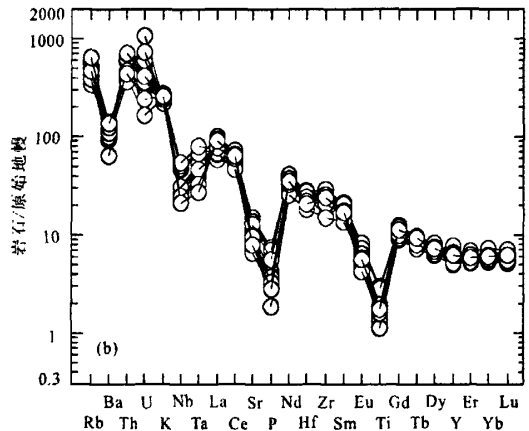
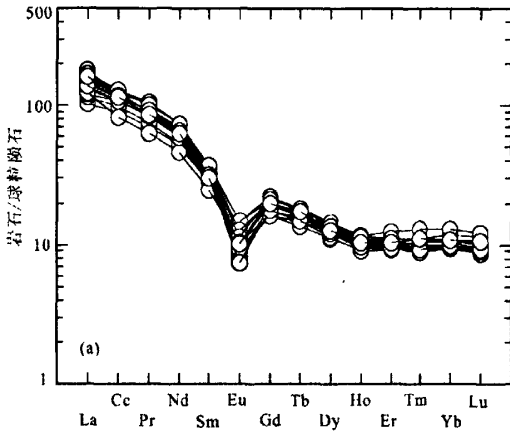


图5 洛古河东岩体稀土元素配分曲线 (a, 标准值据 Boynton, 1984) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b, 标准值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the East Luoguhe intrusion (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace elements web diagram (b, normalization values after Taylor and McLennan, 1985)

5.3 微量元素特征

根据表 2, 洛古河东岩体具有低的 Sr 含量 (介于 $118 \times 10^{-6} \sim 268 \times 10^{-6}$ 之间), 高的 Y 含量 (介于 $16.9 \times 10^{-6} \sim 26.1 \times 10^{-6}$ 之间, 多数 $> 18 \times 10^{-6}$), Sr/Y 低 (介于 5.62 ~ 13.81 之间), 属低铈高钇型岩石; 普遍具 Sr 的负异常 (δSr 介于 0.16 ~ 0.30 之间); Cr 和 Ni 的含量低 (分别介于 3.0 ~ 24.4 和 2.0 ~ 19.9 之间)。具后碰撞花岗岩微量元素特征。在微量元素蛛网图 (图 5b) 上, 富集 Rb、Th、U、K、Zr、Hf 和轻

稀土元素, 如 La、Ce、Nd 和 Sm 等, 强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti, 而 Nb 和 Ta 具有中等-弱亏损, 与海西期科西嘉造山花岗岩基的微量元素蛛网图 (Poli *et al.*, 1989) 相似。

6 同位素地球化学特征

本次工作选取 5 件样品进行了 Sr、Nd、Pb 和 O 同位素测试。其中样品 ML-1、ML-3 和 ML-16 为花岗斑岩; ML-34 和 ML-37 为石英二长斑岩。测试结果见表 3 和表 4。

表3 洛古河东岩体 Sr-Nd-O 同位素分析结果及主要参数

Table 3 The Sr-Nd-O isotopic determination data and some major parameters from the East Luoguhe intrusion

样号	岩性	Rb(×10 ⁻⁶)	Sr(×10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	<i>I_{Sr}</i>	$\epsilon_{Sr}(t)$	$\delta^{18}O(‰)$
ML-1	花岗斑岩	278.1	142.3	5.657	0.714673 ± 14	0.704237 ± 14	-1.52	3.0
ML-3	花岗斑岩	399.4	186.4	6.203	0.713930 ± 17	0.702486 ± 17	-26.37	4.1
ML-16	花岗斑岩	349.0	174.4	5.798	0.717965 ± 12	0.707269 ± 12	41.52	-1.4
ML-34	石英二长斑岩	210.7	231.4	2.636	0.711396 ± 15	0.706533 ± 15	31.08	-8.1
ML-37	石英二长斑岩	201.5	235.7	2.475	0.711212 ± 15	0.706646 ± 15	32.69	-2.2
样号	Sm(×10 ⁻⁶)	Nd(×10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	$\epsilon_{Nd}(t)$	<i>t_{DM}</i> (Ma)	<i>f_{Sm/Nd}</i>
ML-1	5.254	28.209	0.1127	0.512400 ± 10	0.512304 ± 10	-3.25	1131	-0.43
ML-3	6.340	37.524	0.1022	0.512400 ± 7	0.512313 ± 7	-3.08	1025	-0.48
ML-16	6.418	41.894	0.09267	0.512373 ± 6	0.512297 ± 6	-3.45	978	-0.53
ML-34	6.650	39.654	0.1014	0.512422 ± 10	0.512336 ± 10	-2.64	988	-0.48
ML-37	7.044	43.184	0.09867	0.512419 ± 5	0.512335 ± 5	-2.65	969	-0.50

表4 洛古河东岩体钾长石 Pb 同位素分析结果及主要参数

Table 4 The Pb isotopic determination data and some major parameters of K-feldspar from the East Luoguhe intrusion

样号	岩性	测试对象	时代(Ma)	铅同位素比值			μ	ω
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		
ML-1	花岗斑岩	钾长石	129.8 ± 2	18.5939 ± 10	15.6026 ± 8	38.4058 ± 19	9.24	36.30
ML-3	花岗斑岩			18.6369 ± 37	15.6058 ± 35	38.4556 ± 11	9.28	36.50
ML-16	花岗斑岩			18.6579 ± 37	15.6019 ± 35	38.5249 ± 10	9.30	36.75
ML-34	石英二长斑岩			18.6524 ± 41	15.6034 ± 43	38.4438 ± 13	9.30	36.45
ML-37	石英二长斑岩			18.6721 ± 32	15.6036 ± 42	38.4766 ± 13	9.32	36.56

6.1 锶同位素特征

由表3可以看出,洛古河东岩体的 $\epsilon_{Sr}(t)$ 变化范围较大,其值介于 -26.37 ~ 41.52 之间,平均为 15.48。锶初始比值 (I_{Sr}) 较低,介于 0.702486 ~ 0.707269 之间,平均为 0.705434,主体落在幔源火成岩的 I_{Sr} 值(0.7020 ~ 0.7060) 范围之内。

6.2 钕同位素特征

洛古河东岩体的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 初始比值较高(介于 0.512297 ~ 0.512336 之间),平均为 0.512317; $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -3.45 ~ -2.64 之间,均为绝对值很小的负值,该值远高于 Jahn *et al.* (1999) 归纳出的华北克拉通古老下地壳的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-44 ~ -32),与东北地区兴安造山带显生宙花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(普遍大于 0,平均值为 +2.0; 吴福元等,1999; 洪大卫等,2000,2003) 相比,洛古河东岩体明显偏低。亏损地幔模式年龄 t_{DM} 较为年轻,其值介于 969 ~ 1131 Ma 之间。研究区花岗岩的 $f_{Sm/Nd}$ 值均为负值,变化范围不大(介于 -0.53 ~ -0.43 之间),说明源区的稀土元素 Sm、Nd 分馏不明显。因此,运用上述测试数据计算的钕同位素模式年龄是可靠的。

6.3 氧同位素特征

洛古河东岩体钾长石 $\delta^{18}O(‰)$ 同位素值为 -8.1 ~

4.1,变化较大,平均为 -0.9。上述氧同位素值不但低于幔源岩浆的 $\delta^{18}O(‰)$ 值(介于 5.5 ~ 7.0),而且多数为负值,表明洛古河东岩体为低¹⁸O 花岗岩。目前花岗岩同位素亏损的可能机理主要包括:(1) 源区物质组成亏损(Taylor, 1978; 李培忠和于津生,1994; 陈辉,1996; 邵济安等,1999)、(2) 岩浆去气(Nabelek *et al.*, 1982; 李培忠等,1992; 陈辉,1995; 魏春生等,1999; 袁忠信等,2003) 和(3) 大气降水亚固态交换(Taylor, 1971; 魏春生等,1999,2001; 赵子福等,2001; 袁忠信等,2003)。洛古河东岩体位于大兴安岭北部,属高纬度地区,随着纬度的增加,大气降水的 $\delta^{18}O$ 值明显降低。因此,我们认为低 $\delta^{18}O$ 值的大气降水与次固相岩浆发生水-岩反应,是造成洛古河东花岗岩乃至大兴安岭地区岩浆岩具有低 $\delta^{18}O$ 值的主要原因。

6.4 铅同位素特征

花岗岩中钾长石的铅同位素能代表岩体的初始铅同位素(Zartman and Doe, 1981),因此,本次测试选择了花岗岩中的钾长石作为测试对象。表4显示,洛古河东岩体具有很高的放射成因铅组分和较低的非放射成因铅²⁰⁴Pb。²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值变化于 18.5939 ~ 18.6721 之间,平均 18.6426;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值介于 15.6019 ~ 15.6058 之间,平均 15.6035;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值变化于 38.4058 ~ 38.5249 之间,平均 38.4613。由钾长石的铅同位素比值计算出的 μ 值介于 9.24 ~ 9.32 之间,低于 $\mu = 9.74$ 的陆壳演化线。上述 Pb 同位素

组成与大兴安岭构造同位素地球化学省 Pb 同位素特征(张理刚等, 1995)相似。

总之, 洛古河东岩体具有较低的铯初始比值, 较高的钕初始比值, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值略低于 0, 钕同位素模式年龄较年轻, 岩石富集放射成因铅组分, 而非放射成因铅 ^{204}Pb 含量较低, 具有极低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

7 讨论

7.1 成岩物质来源和岩石成因

洛古河东花岗岩具有较低的铯初始比值和较高的钕初始比值, 显示源区物质有较多的地幔成分。在 $I_{Sr}-\epsilon_{Nd}(t)$ 图解(图 6a)中, 样品点均位于未分异地幔和 EM I 型富集地幔之间, 其钕同位素组成变化不大, 但铯同位素初始值变化较大, 在图解中呈近水平排列, 明显偏离地幔“主趋势线”。这种分布特点可能与该区岩石具有高的 Rb/Sr 比值有关, 洛古河东岩体 Rb/Sr 比值介于 0.62 ~ 2.50 之间, 平均 1.45, 明显

高于中国东部上地壳平均值(0.31; 高山等, 1999)和全球上地壳平均值(0.32; Taylor and McLennan, 1995)。研究(Han et al., 1997; Jahn et al., 2000a; Wu et al., 2002)表明, Rb/Sr 比值大的样品在测试过程中的微小误差将会引起 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的较大变化。洛古河东岩体位于兴蒙造山带东段, 其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -3.45 ~ -2.64, 低于内蒙古东部和东北地区的花岗岩类 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 后者变化于 -2.22 ~ +7.11(吴福元等, 1999; Wu et al., 2000, 2002; 洪大卫等, 2000), 也低于新疆北部的花岗岩类 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(变化于 -3.31 ~ +8.40; 周泰禧等, 1996; 赵振华等, 1996; Han et al., 1997; 韩宝福等, 1998; 熊小林等, 2001; 伍建机和陈斌, 2004; 张立飞等, 2004), 但明显高于世界典型壳源花岗岩(详见洪大卫等, 2000)。一般认为由地幔部分熔融直接形成中酸性岩浆的可能性极小(Green, 1980; Martin, 1999), 李锦轶和肖序常(1999)吴福元等(2007)认为 $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ 的花岗岩不一定是大陆地壳增生的标志, 也可能指示花岗岩浆源自年轻的初生地壳。针对中亚-兴蒙造山带显生宙花岗岩类普遍具有较高 $\epsilon_{Nd}(t)$

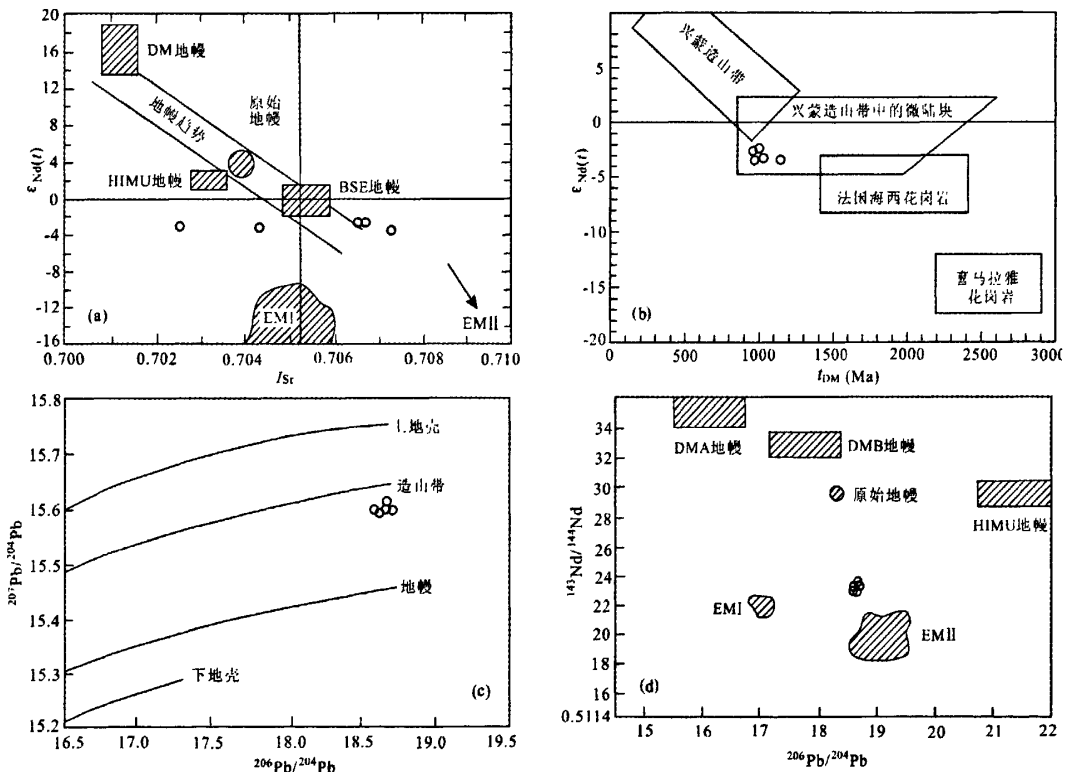


图 6 洛古河东岩体 Sr-Nd-Pb 同位素关系图解

DM、DMA、DMB、EM I、EM II、HIMU、BSE 和原始地幔为 Hart(1984) 与 Zindler and Hart(1986) 定义的地幔端元。(a) $I_{Sr}-\epsilon_{Nd}(t)$ 关系图; (b) $\epsilon_{Nd}(t)-t_{DM}$ 关系图; (c) 地球不同区域铅的结构模式图解(据 Zartman and Doe, 1981); (d) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图

Fig. 6 Sr-Nd-Pb correlation diagrams of the East Luoguhe intrusion from Mohe region

DM, DMA, DMB, EM I, EM II, HIMU, BSE and Primary mantle are mantle endmembers defined by Hart (1984), Zindler and Hart(1986).

(a) diagram of I_{Sr} versus $\epsilon_{Nd}(t)$; (b) diagram of $\epsilon_{Nd}(t)$ versus t_{DM} ; (c) diagram of Pb isotopic composition of K-feldspar (after Zartman and Doe, 1981); (d) diagram of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

值的特点,前人提出了一系列模型:诸如由新元古代初生地壳深熔形成(吴福元等,1997,1999);高度分异的幔源岩浆或新生的基性地壳与古老地壳物质混合(Jahn *et al.*, 2000b);幔源基性岩浆同化地壳物质并发生结晶分异(赵振华等,1996;周泰禧等,1996);幔源岩浆底侵作用和直接分异(韩宝福等,1999);大洋岩石圈及其派生物质(弧岩浆岩及弧前沉积物)与古陆壳混合物的重熔(李锦轶和肖序常,1999;李锦轶等,2007)等。因此,洛古河花岗岩的源区物质主要应该是富含地幔物质的年轻地壳;结合其具有相近且年轻的亏损地幔 Nd 模式年龄,推测这种年轻的地壳主要形成于中元古代—新元古代之交,可能由罗迪尼亚超大陆汇聚期间的俯冲洋壳或岛弧增生杂岩组成。

本区岩石 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为绝对值较小的负值,不同于兴蒙造山带显生宙花岗岩类普遍具有较高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的特点,暗示有古陆壳物质参与了岩浆的形成过程。在 $\epsilon_{Nd}(t)-t_{DM}$ 图解(图 6b)中,本区花岗岩样品落入兴蒙造山带微地块范围内,这与花岗岩侵入额尔古纳地块基底的地质背景吻合,亦与兴蒙造山带内产于新元古代微陆块上的花岗岩 Nd 同位素特征(洪大卫等,2000,2003)相一致。洛古河岩石体含有闪长质淬冷包体,表明岩浆形成过程中发生了岩浆混合作用。鉴于洛古河花岗岩具有较高的 SiO_2 含量(平均 71.27%),低的 $Mg^{\#}$ 指数(平均 26)及低的 Cr(平均 8.0×10^{-6})、Ni(平均 9.2×10^{-6})和 V(平均 30×10^{-6})含量,而且野外未见同时期的基性、超基性岩石,认为幔源岩浆的贡献甚微,洛古河花岗岩主要是地壳物质部分熔融形成。

在 Zartman and Doe (1981) 铅构造模式图解上(图 6c),洛古河岩石体投影点全部落入地幔与造山带演化线之间,并靠近造山带演化线,且其 μ 值低于 $\mu = 9.74$ 的陆壳演化线,显示岩浆来源于地幔与造山带物质的混合,或者是幔源岩浆同化混染了造山带物质。在 $^{143}Nd/^{144}Nd-^{206}Pb/^{208}Pb$ 关系图(图 6d)中,研究区岩石投影点落入原始地幔、EM I 型富集地幔和 EM II 型富集地幔之间,更靠近 EM II 型富集地幔区。洛古河岩石体为低 ^{18}O 花岗岩,可能是低 $\delta^{18}O$ 值的大气降水与次固相岩浆发生水-岩反应所致。

综上所述,洛古河岩石体的源区物质应该主要是相对年轻的地壳物质,可能是中元古代末—新元古代之交的大洋地壳残片或岛弧增生杂岩,它们与额尔古纳地块基底岩石一起发生部分熔融而形成花岗岩浆,岩浆上升、冷凝过程中与低 $\delta^{18}O$ 值的大气降水发生水-岩反应,最终形成了洛古河花岗岩。

7.2 成岩构造背景

陈衍景(1996)和 Pirajno(2008)通过分析碰撞造山带演化的 $P-T-t$ 轨迹和地质事件发生的系列(如岩浆岩演化)认为一个完整的陆陆碰撞造山过程应包括早期挤压(以逆掩、推覆为特征)、中期挤压向伸展转变(以走滑为特征)和晚期

伸展(以断陷盆地发育为标志)等 3 个阶段,基此提出了阐释陆陆碰撞体制成岩、成矿与流体作用的 3 阶段模式,即 CMF 模式。然而, Liegeois (1998) 却把尾随主海洋关闭的板块汇聚及其所致的陆内逆冲、扭动构造、地块横向挤压或逃逸、沿巨型剪切带大规模水平块体运动的陆内环境,统称为“后碰撞作用”(post-collision)。

洛古河岩石体主要岩石类型为二长花岗斑岩、正长花岗斑岩和石英二长斑岩,属高钾钙碱性岩系,野外和镜下均未见到白云母,与后碰撞阶段形成的富钾钙碱性花岗岩类(KCG)岩石组合(Liegeois *et al.*, 1998; Sylvester, 1998)相一致;微量元素汤氏蛛网图上富集 LILE, 贫化 HFSE, 明显亏损 Nb、Sr、P 和 Ti 等元素,显示后碰撞高钾钙碱性 I 型花岗岩微量元素特征(Kuster and Harms, 1998)。在主量元素 $SiO_2-Al_2O_3$ 和 $SiO_2-FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 两组判别图(图 7a 和 7b)中,研究区花岗岩类投影点基本上落入 POG 区域,判定它为后造山花岗岩类。在花岗岩类形成环境的微量元素 Rb-Y+Nb 判别图(图 7c)中,洛古河岩石体投影点全部落入 post-COLG 区,即后碰撞花岗岩区。在 Sr-Yb 判别图(图 7d)中,投影点全部落入低 Sr 高 Yb 型花岗岩区(IV 区),与我国东南沿海花岗岩特征一致,应形成于挤压向伸展转换阶段(张旗等,2008)。上述表明,洛古河岩石体形成于后碰撞阶段,属后碰撞花岗岩。

鉴于古亚洲洋在二叠纪已经闭合(Pruner, 1987; Zhao and Coe, 1989; 邵济安等,1997),研究区花岗岩类无法与古亚洲洋的俯冲、碰撞作用相联系。洛古河岩石体位于大兴安岭山脉的最北端,北邻蒙古-鄂霍茨克中生代造山带。晚古生代—早中生代期间,位于蒙古-中朝大陆和西伯利亚大陆之间的蒙古-鄂霍茨克洋盆自西向东剪刀式闭合,形成蒙古-鄂霍茨克造山带(Zhao *et al.*, 1990; Zonenshain *et al.*, 1990; Zorin, 1999; Parfenov *et al.*, 2001; 李锦轶等,2004a);中侏罗世末期—晚侏罗世早期在上黑龙江盆地形成漠河推覆构造和大量的倾向北的逆冲断层,使泥盆系灰岩推覆到下-中侏罗统陆相碎屑岩之上,造成上黑龙江前陆盆地沉积物褶皱,地壳缩短、增厚,并于晚侏罗世(146.8~155.2Ma)期间形成埃达克质岩石(武广等,2008a);早白垩世早期,研究区发生左行韧性走滑剪切作用,致使处于蒙古-鄂霍茨克缝合带南侧的额尔古纳-华北地块向东逃逸(Li *et al.*, 1999; Meng, 2003; 李锦轶等,2004a; 武广等,2008b),与 Liegeois (1998)划分的后碰撞环境特征一致,表明早白垩世期间研究区处于挤压向伸展转换阶段。研究表明(陈衍景,1996; Chen *et al.*, 2007; Pirajno, 2008),具有减压-增温特征的挤压向伸展转变阶段通常是造山带地壳物质大规模熔融而形成花岗岩类最佳时期。

总之,大兴安岭北端早白垩世洛古河花岗岩应由蒙古-鄂霍茨克造山带后碰撞期间的地壳物质部分熔融而形成,大兴安岭北端主要属于蒙古-鄂霍茨克造山带的一部分。

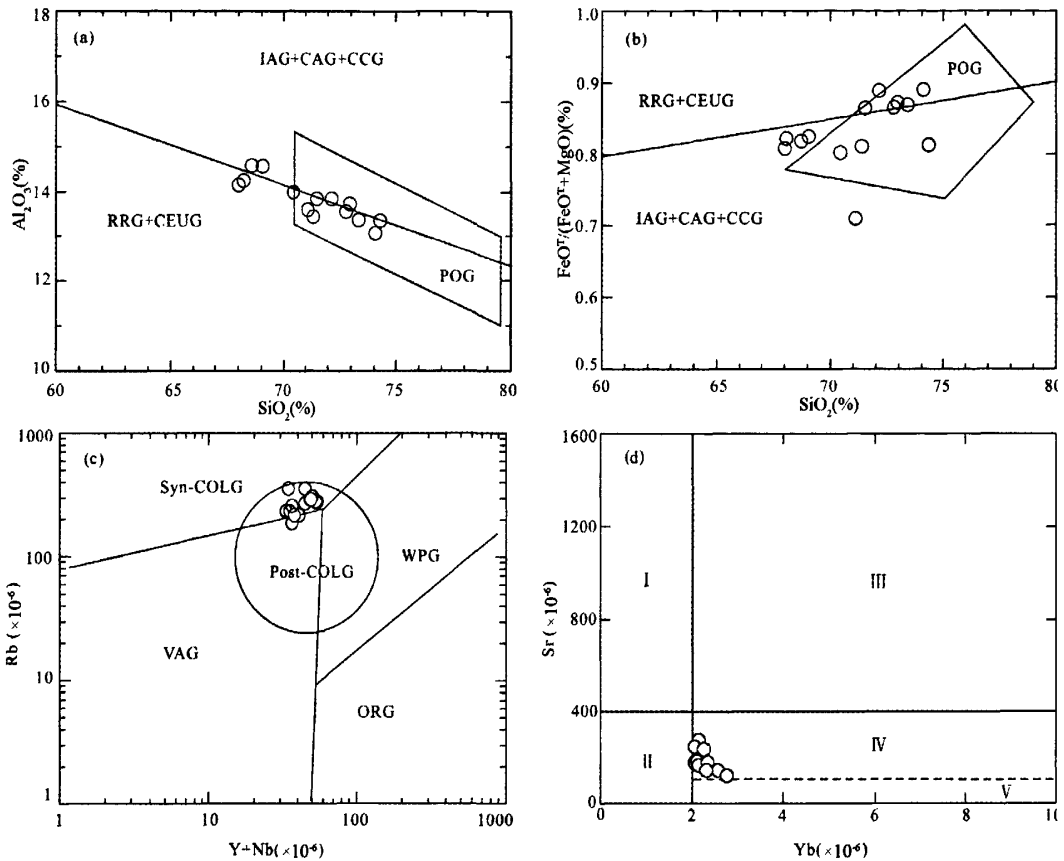


图7 洛古河东岩体形成的构造环境判别图

(a) SiO_2 与 Al_2O_3 判别图(底图据 Maniar and Piccoli, 1989); (b) SiO_2 与 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 判别图(底图据 Maniar and Piccoli, 1989); CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类; IAG-岛弧花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; (c) Rb-Y + Nb 判别图(底图据 Pearce, 1996); syn-COLG-同碰撞花岗岩; post-COLG-后碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; WPG-板内花岗岩; (d) Sr-Yb 判别图(底图据张旗等, 2008): I-高 Sr 低 Yb 型花岗岩(埃达克岩); II-低 Sr 低 Yb 型花岗岩(喜马拉雅型花岗岩); III-高 Sr 高 Yb 型花岗岩; IV-低 Sr 高 Yb 型花岗岩(闽浙型花岗岩); V-非常低 Sr 高 Yb 型花岗岩(南岭型花岗岩)

Fig. 7 Discrimination diagrams of tectonic setting for the East Luoguhe granites from Mohe area

(a) diagram of SiO_2 versus Al_2O_3 (after Maniar and Piccoli, 1989); (b) diagram of SiO_2 versus $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ (after Maniar and Piccoli, 1989); CAG-continental arc granitoids; CCC-continental collision granitoids; CEUG-continental epeirogenic uplift granitoids; IAG-island arc granitoids; POG-post-orogenic granitoids; RRG-rift-related granitoids; (c) diagram of Rb versus Y + Nb (after Pearce, 1996); syn-COLG-syn-collisional granites; post-COLG-post-collisional granites; VAG-volcanic arc granites; ORG-oceanic ridge granites; WPG-within-plate granites; (d) diagram of Sr versus Yb (after Zhang *et al.*, 2008); I-high-Sr and low-Yb granites (adakite); II-low-Sr and low-Yb granites (Himalayan-type granites); III-high-Sr and high-Yb granites; IV-low-Sr and high-Yb granites (Minzhe-type granites); V-very low-Sr and high-Yb granites (Nanling-type granites)

8 结论

(1) 以洛古河东岩体为代表的大兴安岭北端早白垩世花岗岩属高钾钙碱性岩系, 岩石类型为正长花岗岩、二长花岗岩和石英二长岩。

(2) 岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $129.8 \pm 2.2\text{Ma}$, 代表了洛古河东岩体的结晶年龄。

(3) 大兴安岭北端早白垩世花岗岩主要是中元古末期—新元古代初期罗迪尼亚超大陆汇聚期间形成的地壳物质发生部分熔融所形成。

(4) 洛古河东岩体属后碰撞花岗岩, 形成于中朝-蒙古大陆与西伯利亚大陆碰撞造山过程的挤压向伸展转变期, 大兴安岭北端主要属于蒙古-鄂霍茨克造山-成矿带的一部分。

致谢 参加项目野外工作的还有沈阳地质矿产研究所的庞庆帮研究员, 李广远副研究员, 王宏博工程师。SHRIMP 锆

石 U-Pb 定年得到了中国地质科学院地质研究所离子探针中心石玉若博士和沈阳地质矿产研究所赵爱琳教授级高级工程师的帮助。评审人李锦轶研究员和徐夕生教授指出了文中的错误,并提出了很好的修改意见和建议,对作者修改本文有很大帮助。在此一并致以诚挚的感谢。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 – 626
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. *Geochem.*, 2: 63 – 114
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1991. Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 7 – 498 (in Chinese with English abstract)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province. Beijing: Geological Publishing House, 5 – 438 (in Chinese with English abstract)
- Chen H. 1995. A comment on hydrogen isotopic composition and related problems of alkaline granites. *Geochimica*, 24(2): 193 – 195 (in Chinese with English abstract)
- Chen H. 1996. Hydrogen isotope fractionation in the evolution of the earth. *Scientia Geologica Sinica*, 31(3): 238 – 249 (in Chinese)
- Chen YJ. 1996. Fluidization model for intracontinental collision and its metallogenic significance: Theoretical inference and evidences from gold deposits in eastern Qinling Mountains. *Earth Science Frontiers*, 3(3–4): 282 – 289 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ, 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Review*, 31: 139 – 169
- Claessens S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia; A record of geological evolution from the Archaean to the palaeozoic. *Lithos*, 51(1–2): 95 – 108
- Deng JF, Zhao HL, Mo XX, Wu ZX and Luo ZH. 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Fan WM, Guo F, Wang YJ and Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115 – 135
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hartmutkern. 1999. Structure and composition of the continental crust in East China. *Science in China (Series D)*, 42(2): 129 – 140
- Green TH. 1980. Island arc and continent-building magmatism: A review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63: 367 – 385
- Han BF, Wang SC, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135 – 159
- Han BF, Wang SC and Hong DW. 1998. Metaaluminous-aluminous granite with positive $\epsilon_{Nd}(t)$: Yebushan pluton of Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 43(12): 1323 – 1328 (in Chinese)
- Han BF, He CQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 42(2): 113 – 119
- Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753 – 757
- He ZJ, Li JY, Mo SG and Sorokin AA. 2005. Geochemical discriminations of sandstones from the Mohe Foreland Basin, northeastern China: Tectonic sitting and provenance. *Science in China (Series D)*, 48(5): 613 – 621
- Hong DW, Wang SC, Xie XL and Zhang JS. 2000. Genesis of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mountains-Mongolia orogenic belt and growth of continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441 – 456 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Wang SC, Xie XL, Zhang JS and Wang T. 2003. Correlation between continental growth and the supercontinental cycle: Evidence from the granites with positive ϵ_{Nd} in the Central Asian orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203 – 209 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119 – 146
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000a. Granitoids of central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 181 – 193
- Jahn BM, Griffin WL and Windley R. 2000b. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: VII – X
- Jiang CY and Quan H. 1988. Mesozoic volcanic rock of Genhe and Hailaer basins in Daxing'anling. *Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, (3): 23 – 100 (in Chinese with English abstract)
- Kuster D and Harms U. 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the late Neo-proterozoic East African Orogen: A review. *Lithos*, 45: 177 – 195
- Li CY, Wang Q, Liu XY and Tang YQ. 1982. Explanatory Notes to the Tectonic Map of Asia. Beijing: Cartographic Publishing House, 1 – 49
- Li CZ. 1999. Metallogenic series of the Erguna polymetallic ore belt and its metallogenic conditions. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 8(6): 329 – 332 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339 – 347 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He ZJ, Mo SG and Zheng QD. 1999. The late Mesozoic orogenic processes of Mongolia-Okhotsk orogen: Evidence from field investigations into deformation of the Mohe area, NE China. *Jour. Geosci. Res. NE Asia*, 2(2): 172 – 178
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW china. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405 – 419 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Mo SG, He ZJ, Sun GH and Chen W. 2004a. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Khing'an ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of NE China and adjacent areas since the Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 157 – 167 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He ZJ, Mo SG and Sorokin AA. 2004b. The age of conglomerates in the lower part of the Xiufeng Formation in the northern Da Hinggan Mountains, NE China, and their tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 120 – 129 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565 – 582 (in Chinese with English abstract)
- Liegeois JP. 1998. Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: X V – X VII
- Liegeois JP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high K calc-alkaline and shoshonitic versus

- alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45: 1-28
- Li PZ, Yu FJ, Liu DP and Yu JS. 1992. The relationship between δH and magma degassing of the Nianzishan miarolitic alkaline granite, Heilongjiang. *Geochimica*, 21 (1): 70-76 (in Chinese with English abstract)
- Li PZ and Yu JS. 1994. Isotopic geochemistry of the Nianzishan miarolitic alkaline granite. In: Chen HS (ed.). *Study on Isotopic Geochemistry*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 269-286 (in Chinese)
- Lin Q, Ge WC, Wu FY, Sun DY and Cao L. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (3): 403-412 (in Chinese with English abstract)
- Ma JJ and Fang DH. 1991. A preliminary study of the Mesozoic volcanic rocks in Heilongjiang Province, China. *Heilongjiang Geology*, 2 (2): 1-16 (in Chinese)
- Ma XH, Xing LS, Yang ZY, Xu SJ and Zhang JX. 1993. Paleomagnetic study since Late Paleozoic in the Ordos basin. *Acta Geophysica Sinica*, 36 (1): 68-79 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635-643
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411-429
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTC), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1-24
- Meng QR. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369: 155-174
- Nabelek PI, O'Neill JR and Rapike JJ. 1982. Vapor phase exsolution as a controlling factor in hydrogen isotope variation in granitic rocks: The Notch Peak granitic stock, Utah. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 66: 137-150
- Nelson DR. 1999. *Compilation of SHRIMP U-Pb Geochronology Data*. Perth: Geological Survey of Western Australia Record, 189
- Parfenov LM, Popeko LI and Tomurtogoo O. 2001. Problems of tectonics of the Mongolia-Okhotsk orogenic belt. *Geology of Pacific Ocean*, 16: 797-830
- Pearce JA. 1996. Source and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120-125
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 68-81
- Pirajno F. 2008. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Berlin: Springer, 1250.
- Poli G, Ghezzi C and Conticelli S. 1989. Geochemistry of granitic rocks from the Hercynian Sardinia-Corsica batholith: Implication for magma genesis. *Lithos*, 23: 247-266
- Pruner P. 1987. Paleomagnetism and paleogeography of Mongolia in the Cretaceous, Permian and Carboniferous preliminary data. *Tectonophysics*, 139: 155-167
- Qi JP, Chen YJ and Pirajno F. 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 47-59 (in Chinese with English abstract)
- Ren JS, Chen TY, Niu BG, Liu ZG and Liu FR. 1990. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 217 (in Chinese)
- Ren JS, Wang ZX and Chen BW. 1999. The Tectonics of China from A Global View; A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-32
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21 (9): 825-828
- Shao JA, Mu BL, He GQ and Zhang LQ. 1997. Geological effects in tectonic superposition of Paleo-Pacific domain and Paleo-Asian domain in northern part of North China. *Science in China (Series D)*, 40 (6): 634-640
- Shao JA, Zhang LQ and Mu BL. 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan MTS. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 339-346 (in Chinese with English abstract)
- Streckeisen AL. 1976. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: A provisional attempt. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1: 1-15
- Sylvester PJ. 1998. Post-collision strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29-44
- Taylor HPJ. 1971. Oxygen isotope evidence for large-scale interaction between meteoric ground water and Tertiary granodiorite intrusion, Western Cascade Range, Oregon. *Geophys. Res.*, 75 (32): 7855-7874
- Taylor HPJ. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38 (1): 177-210
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 54-372
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33: 241-265
- Wang PJ, Liu ZJ, Wang SX and Song WH. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *Int. J. Earth Sci.*, 91: 331-340
- Wei CS, Zheng YF and Zhao ZF. 1999. The hydrogen and Oxygen isotope geochemistry of the Suzhou A-type granite. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 224-236 (in Chinese with English abstract)
- Wei CS, Zhang YF and Zhao ZF. 2001. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A type granites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (1): 95-111 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev. Econ. Geol.*, 7: 1-35
- Wu FY, Jahn BM and Lin Q. 1997. Isotopic characteristics of the postorogenic granites in orogenic belt of northern China and their implications in crustal growth. *Chinese Science Bulletin*, 43 (5): 420-424
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 181-189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Zhang GL and Ren XW. 2000. Deep geodynamics of Yanshan movement. *Geological Journal of China Universities*, 6 (3): 379-388 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89-113
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143-173
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Sun FY, Zhao CS, Li ZT, Zhao AL, Pang QB and Li GY. 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50 (23): 2733-2743
- Wu G, Sun FY, Zhu Q, Li ZT, Ding QF, Li GY, Pang QB and Wang HB. 2006. Geological characteristics and genesis of gold deposits in Upper Heilongjiang Basin. *Mineral Deposits*, 25 (3): 215-230 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Sun FY, Zhao CS, Ding QF and Wang L. 2007. Fluid inclusion study on gold deposits in northwestern Erguna metallogenic belt, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (9): 2227-2240 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Chen YJ, Sun FY, Li JC, Li ZT and Wang XJ. 2008a. Geochemistry of the Late Jurassic granitoids in the northern end area of Da Hinggan Mountains and their geological and prospecting implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (4): 899-910 (in Chinese with English abstract)

- Wu G, Fan CW, Li ZQ, Mei M, Liu J and Zhu MT. 2008b. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the muscovite from the mylonite of the Mohe ductile shear zone, in northern Da Hinggan Mountain and its geological significance. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35 (3): 297 - 302 (in Chinese with English abstract)
- Wu JJ and Chen B. 2004. Trace element and Nd-Sr isotope characteristics of the post-collisional granitoids from Miaogou of west Junggar, and implication for petrogenesis. *Xinjiang Geology*, 22 (1): 29 - 35 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Xu JF and Wang Q. 2001. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constrains for Nd and Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (4): 514 - 522 (in Chinese with English abstract)
- Xu CZ, Bian QT and Wang YF. 1998. Tectonic evolution and metallization of the Erguna orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, 33 (1): 84 - 92 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Zhang M and Wan DF. 2003. A discussion on the petrogenesis of ^{18}O -low alkali granite: A case study of Baerzhe alkali granite in Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22 (2): 119 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Zartman RE and Doe BR. 1981. *Plumbotectonics: The model*. *Tectonophysics*, 75: 135 - 162
- Zhang LF, Xian WS and Sun M. 2004. Petrogenesis of charnockites from western Junggar, Xinjiang, China. *Xinjiang Geology*, 22 (1): 36 - 42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LG *et al.* 1995. *Block-Geology of Eastern Asia Lithosphere: Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granite*. Beijing: Science Press, 153 - 173 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang YL, Jin WJ, Jia XQ and Li CD. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks. *Geological Bulletin of China*, 27 (1): 1 - 18 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GL, Yang GL, Wang Z, Fu JY and Yang YZ. 1989. *Mesozoic Volcanic Rocks in Middle-South Daxing'anling*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1 - 260 (in Chinese)
- Zhao XX and Coe R. 1989. Tectonic implication of Permian-Triassic paleomagnetic result from North and South China. In: Hillhouse JW (ed.). *Deep Structure and Past Kinematics of Accreted Terranes*, *Am. Geophys. Union, Geophys. Monoger./IUGG*, 5: 278 - 293
- Zhao XX, Coe RS, Zhou YX, Wu HR and Wang J. 1990. New paleomagnetic results from Northern China: Collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 181: 43 - 81
- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29: 105 - 119 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZF, Zheng YF and Wei CS. 2001. Kinetics of oxygen isotope exchange between water and minerals of miarolitic alkaline granite from Nianzishan. *Geochimica*, 30 (2): 177 - 185 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Wang ZC, Zou TR and Masuda A. 1996. Study on petrogenesis of alkali-rich intrusive rocks of Ulungur, Xinjiang. *Geochimica*, 25 (3): 205 - 220 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. *Chemical geodynamics*. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 14: 493 - 571
- Zhou TX, Chen JF and Li XM. 1996. Origin of high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ granites from Alatao Mountain, Xinjiang. *Scientia Geologica Sinica*, 31 (1): 71 - 79 (in Chinese with English abstract)
- Zhu QW, Lu FX, Xie YH and Zheng JP. 1997. Volcanic assemblages in active belt of spreading type in continental margin: Study on Mesozoic volcanic rocks around Songliao basin. *Acta Petrologica Sinica*, 13 (4): 551 - 562 (in Chinese with English abstract)
- Zonenshain LP, Kuzmin MI and Natapov LM. 1990. *Geology of the USSR: Plate tectonic synthesis*. *AGU, Geodyn. Ser.* 21, Washington D. C., 242
- Zorin Yu A. 1999. *Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia*. *Tectonophysics*, 306: 33 - 56
- 附中文参考文献**
- 陈辉. 1995. 关于碱性花岗岩 H 同位素组成及其有关问题的讨论. *地球化学*, 24(2): 193 - 195
- 陈辉. 1996. 氧在地球演化过程中的同位素分馏. *地质科学*, 31(3): 238 - 249
- 陈衍景. 1996. 碰撞造山体制的流体演化模式: 理论推导和东秦岭金矿床氧同位素证据. *地学前缘*, 3(3-4): 282 - 289
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 吴宗絮, 罗照华. 1996. 中国大陆根—柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1 - 110
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Hartmutkern. 1999. 中国东部地壳的结构和组成. *中国科学(D辑)*, 29(3): 204 - 213
- 和政军, 李锦铁, 莫申国, Sorokin AA. 2003. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析. *中国科学(D辑)*, 33(12): 1219 - 1226
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴安造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441 - 456
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 张季生, 王涛. 2003. 从中亚正 ϵ_{Nd} 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系. *地质学报*, 77(2): 203 - 207
- 韩宝福, 王式洸, 孙元林, 洪大卫. 1998. 正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的准铝-过铝花岗岩: 新疆也布山岩体. *科学通报*, 43(12): 1323 - 1328
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16 - 21
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. *黑龙江省区域地质志*. 北京: 地质出版社, 5 - 438
- 蒋国源, 权恒. 1988. 大兴安岭根海拉尔盆地中生代火山岩. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, (3): 23 - 100
- 李长珠. 1999. 额尔古纳成矿带金铜多金属矿成矿条件和成矿系列. *有色金属矿产与勘查*, 8(6): 329 - 332
- 李锦铁. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. *地质论评*, 44(4): 339 - 347
- 李锦铁, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. *地质科学*, 34(4): 405 - 419
- 李锦铁, 莫申国, 和政军, 孙桂华, 陈文. 2004a. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约. *地学前缘*, 11(3): 157 - 167
- 李锦铁, 和政军, 莫申国, Sorokin AA. 2004b. 大兴安岭北部绥化组下部砾岩的形成时代及其大地构造意义. *地质通报*, 23(2): 120 - 129
- 李锦铁, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中-三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. *岩石学报*, 23(3): 565 - 582
- 李培忠, 虞福基, 刘德平, 于津生. 1992. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩氩同位素组成与岩浆去气作用. *地球化学*, 21(1): 70 - 76
- 李培忠, 于津生. 1994. 碾子山晶洞碱性花岗岩同位素地球化学. 见: 陈好寿主编. *同位素地球化学研究*. 杭州: 浙江大学出版社, 269 - 286
- 林强, 葛文春, 吴福元, 孙德有, 曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩

- 类的地球化学. 岩石学报, 20(3):403-412
- 马家骏, 方大赫. 1991. 黑龙江省中生代火山岩初步研究. 黑龙江地质, 2(2):1-16
- 马醒华, 邢历生, 杨振宇, 徐树金, 张景鑫. 1993. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来古地磁研究. 地球物理学报, 36(1):68-79
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 7-498
- 祁进平, 陈衍景, Pirajno F. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景. 矿物岩石, 25(2):47-59
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 217
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学(D辑), 27(5):390-394
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用. 地学前缘, 6(4):339-346
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 1999. 苏州 A 型花岗岩氢氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 15(2):224-236
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 2001. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约. 岩石学报, 17(1):95-111
- 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
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2):181-189
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 6(3):379-388
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6):1217-1238
- 武广, 孙丰月, 赵财胜, 李之彤, 赵爱琳, 庞庆帮, 李广远. 2005. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. 科学通报, 50(20):2278-2288
- 武广, 孙丰月, 朱群, 李之彤, 丁清峰, 李广远, 庞庆帮, 王宏博. 2006. 上黑龙江盆地金矿床地质特征及成因探讨. 矿床地质, 25(3):215-230
- 武广, 孙丰月, 赵财胜, 丁清峰, 王力. 2007. 额尔古纳成矿带西北部金矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 23(9):2227-2240
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 李景春, 李之彤, 王希今. 2008a. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义. 岩石学报, 24(4):899-910
- 武广, 范传闻, 李忠权, 糜梅, 刘军, 朱明田. 2008b. 大兴安岭北部漠河韧性剪切带白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(3):297-302
- 伍建机, 陈斌. 2004. 西准噶尔庙尔沟后碰撞花岗岩微量元素和 Nd-Sr 同位素特征及成因. 新疆地质, 22(1):29-35
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 许继峰, 王强. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制. 岩石学报, 17(4):514-522
- 徐贵忠, 边千韬, 王艺芬. 1998. 额尔古纳造山带构造演化与成矿作用. 地质科学, 33(1):84-92
- 袁忠信, 张敏, 万德芳. 2003. 低¹⁸O 碱性花岗岩成因讨论——以内蒙古巴尔哲碱性花岗岩为例. 岩石矿物学杂志, 22(2):119-124
- 张立飞, 洗伟胜, 孙敏. 2004. 西准噶尔紫苏花岗岩成因岩石学研究. 新疆地质, 22(1):36-42
- 张理刚等. 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 153-173
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 李承东. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报, 27(1):1-18
- 赵国龙, 杨桂林, 王忠, 傅嘉友, 杨玉琢. 1989. 大兴安岭中南部中生代火山岩. 北京: 北京科学技术出版社, 1-260
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2):105-119
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 增田彰正. 1996. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨. 地球化学, 25(3):205-220
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生. 2001. 碾子山晶洞碱性花岗岩矿物-水氧同位素交换反应动力学. 地球化学, 30(2):177-185
- 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高 ϵ_{Nd} 值的成因探讨. 地球科学, 31(1):71-79
- 朱勤文, 路凤香, 谢意红, 郑建平. 1997. 大陆边缘扩张型活动带火山岩组合——松辽盆地周边中生代火山岩研究. 岩石学报, 13(4):551-562