

豫西老君山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征

孟 芳¹ 毛景文² 叶会寿² 周 珂³ 高亚龙⁴ 李永峰⁵

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 中国地质学会, 北京 100037; 4. 华北地质勘查局, 天津 300170; 5. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 河南 郑州 450016)

摘要: 豫西老君山花岗岩体位于北秦岭造山带中黑沟—栾川区域性断裂带的南侧。通过系统的野外调查, 将岩体划分为 3 个主要的成岩期次, 第 1 期为含小斑细中粒黑云母二长花岗岩, 第 2 期为中斑中粒黑云母二长花岗岩, 第 3 期为大斑中粗粒黑云母二长花岗岩, 具有同心环带分布特征。在矿物组成和岩石地球化学成分特点上, 这 3 期花岗岩体基本相似, 均由钾长石、斜长石、黑云母和石英组成, 但在岩石结构上有明显差异。岩石具有高硅 ($\text{SiO}_2 > 70\%$)、高碱 ($\text{NaO} + \text{K}_2\text{O} = 8.28\% \sim 9.53\%$)、低钙 ($\text{CaO} = 0.68\% \sim 2.42\%$) 的特点。在微量元素上, Ba、Sr、Nb、Zr、Th、Rb 含量较高, Co、Ni、Cr、V、Sc 含量低。岩体属于 I 型花岗岩。第 2 期和第 3 期花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果分别为 $(111 \pm 1)\text{Ma}$ (MSWD = 0.41) 和 $(108 \pm 1)\text{Ma}$ (MSWD = 0.39), 岩体形成于早白垩世, 是中国东部晚中生代大规模岩浆作用晚期的产物。

关键词: SHRIMP 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 老君山花岗岩; 豫西

中图分类号: P597; P588.12⁻¹ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1501-24

位于华北陆块南缘的东秦岭钼矿带是中国重要的大型钼矿床集中分布区之一, 以往钼矿勘查资料和地质科研成果表明, 东秦岭钼矿床主要与同熔型中酸性小斑岩体有关^[1-11]。但近年来, 在面积出露的老君山花岗岩基内及其接触带附近亦发现了钼矿床^[12]。因此, 对老君山花岗岩的研究显得尤其重要, 乔怀栋等^[13]认为老君山花岗岩的成因属壳源型范畴, 张宗清等^[14]获得其全岩 Rb - Sr 等时线年龄为 $(115.9 \pm 7.6)\text{Ma}$, 本文拟通过对豫西老君山花岗岩的年代学、岩石学、矿物学以及地球化学特征的系统研究, 精确厘定该岩体的形成时代, 并探讨其成因类型及形成时的动力学背景。

1 区域地质背景

老君山花岗岩位于北秦岭造山带中, 处于黑

沟—栾川区域性断裂带的南侧(图 1), 呈近东西向展布, 出露面积约 394 km^2 , 属于东秦岭钼矿成矿带东部。由北往南, 北秦岭造山带由中新元古界宽坪群、早古生代二郎坪群、早元古界秦岭群组成^[15]。宽坪群为一套强烈变形、变质达高绿片岩相—低角闪岩相的中浅变质岩系, 原岩为基性火山岩、碎屑岩和碳酸盐岩组合^[16]; 二郎坪群为一套中深变质杂岩系, 可见多期变质变形和岩浆贯入; 秦岭群为一套低绿片岩相—低角闪岩相浅变质火山—沉积岩系。

北秦岭造山带断裂构造发育, 以近东西向断裂为主, 自北向南出露黑沟—栾川断裂、瓦穴子—乔端断裂、朱阳关—夏馆断裂、商—丹断裂等。北秦岭地区大规模岩浆侵入活动集中在晚古生代和早中生代, 以酸性岩为主, 往往形成大的岩基或岩株, 在区域上大致呈东西向带状分布^[14, 17]。该区出露的古生代

收稿日期: 2012-11-05; 改回日期: 2012-11-13

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(20089949, 200841019) 资助。

作者简介: 孟芳, 女, 1982 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: mengfang0617@126.com。

通讯作者: 叶会寿, 男, 1964 年生, 研究员, 矿床学专业; E-mail: yehuishou@163.com。

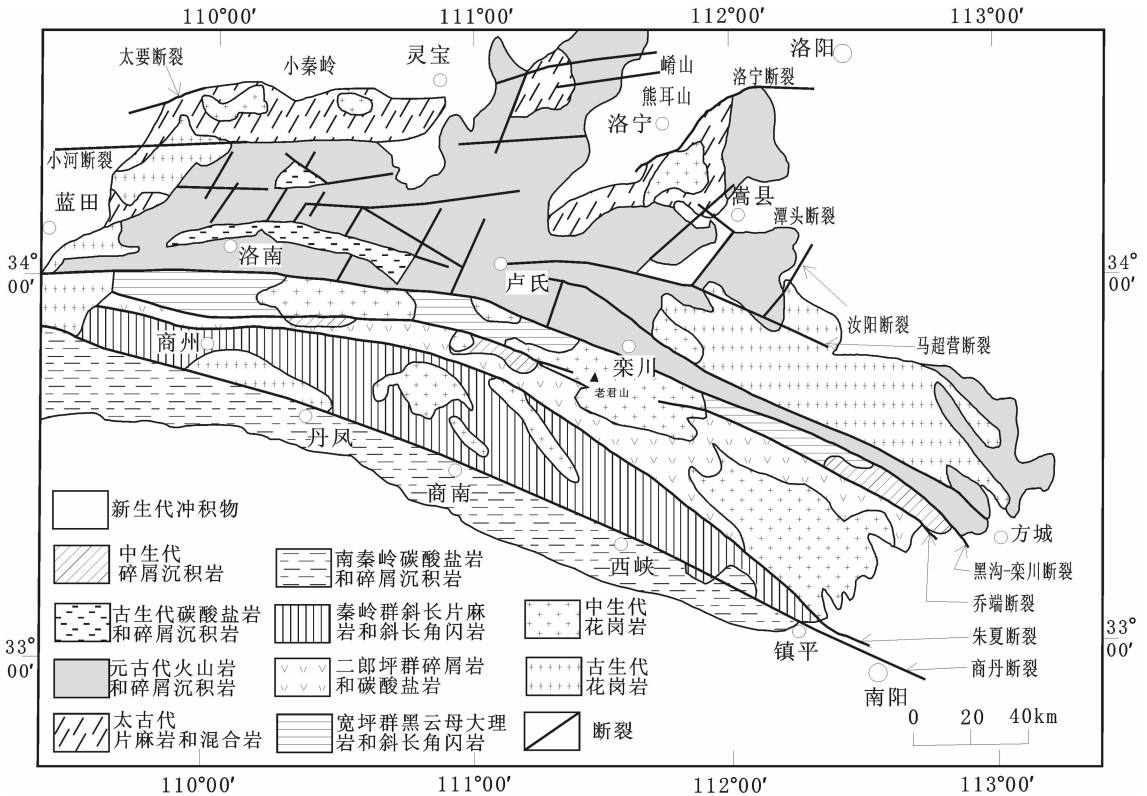


图1 东秦岭地质简图^[8]

Fig.1 Geological sketch map of East Qinling^[8]

岩浆岩有满子营—洞街、摸云垛、黄龙庙—四棵树、牧虎顶、卢家坪、茶庵等花岗岩体,板山坪闪长岩体和川心垛斜长花岗岩体;中生代岩浆岩包括二郎坪、石板河、老君山等花岗岩体。

2 老君山花岗岩地质特征

老君山花岗岩体侵入于宽坪群斜长角闪岩和二郎坪群碎屑岩之中(图2)。根据岩体侵入接触关系可划分为3期:第1期为含小斑细中粒黑云母二长花岗岩,第2期为中斑中粒黑云母二长花岗岩,第3期为大斑中粗粒黑云母二长花岗岩,具有同心环带特征。

第1期含小斑细中粒黑云母二长花岗岩(图3-A):灰白色,块状构造,含小斑似斑状结构,基质细中粒花岗结构。斑晶为钾长石,含量4%,分布不均,自形—半自形板状,粒径5~13 mm。基质由钾长石(17%~33%)、斜长石(25%~37%)、石英(15%~20%)、黑云母(3%~5%)等组成,粒径0.3~3 mm,副矿物有磁铁矿、钛铁矿、榍石等。

第2期中斑中粒黑云母二长花岗岩(图3-B):

岩石呈灰白—浅红色,中斑似斑状结构,块状构造。斑晶为钾长石,自形—半自形板柱状,含量5%~10%,长轴定向排列。基质由钾长石(20%~35%)、斜长石(25%~35%)、石英(21%~25%)、黑云母(3%~6%)组成,粒径1.3~4.5 mm。副矿物为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、榍石等。钾长石很少泥化,钾长石为条纹长石,呈不规则板状体,发育斜长石的环带构造(图3-D)和聚片双晶。黑云母为棕褐色,鳞片状,部分沿解理面蚀变为绿泥石。

第3期大斑中粗粒黑云母二长花岗岩(图3-C):岩石呈灰白—浅红色,块状构造,大斑似斑状结构。斑晶为自形—半自形长条板柱状钾长石,含量5%~7%。基质中粗粒花岗结构,基质由钾长石(22%~31%)、斜长石(30%~35%)、石英(21%~24%)、黑云母(5%~7%)等组成,粒径2~6 mm(图3-E),副矿物为磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石、榍石等。在老君山一带岩性具不均匀的垂向变化,下部岩性变化大,粒度不均,结晶程度较差,出现条纹、条带状构造,上部岩性均一,矿物结晶粗大,显示出均匀岩浆熔融交代作用特征。显微镜下观察,由于受构造活动的影响,

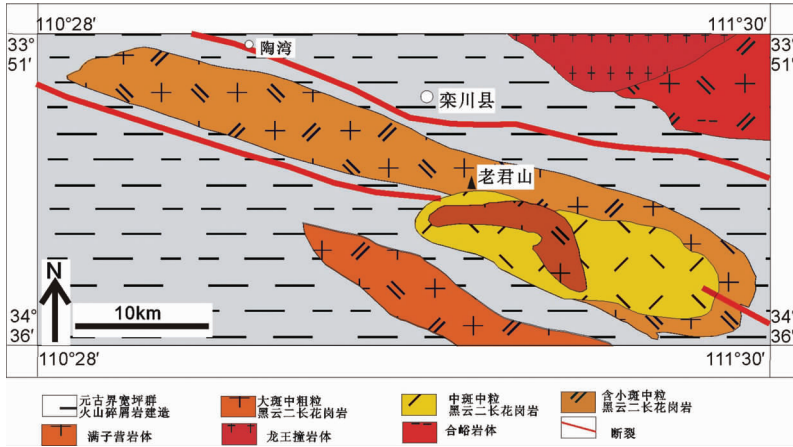


图 2 老君山岩体地质图

Fig.2 Geological sketch map of Laojunshan complex

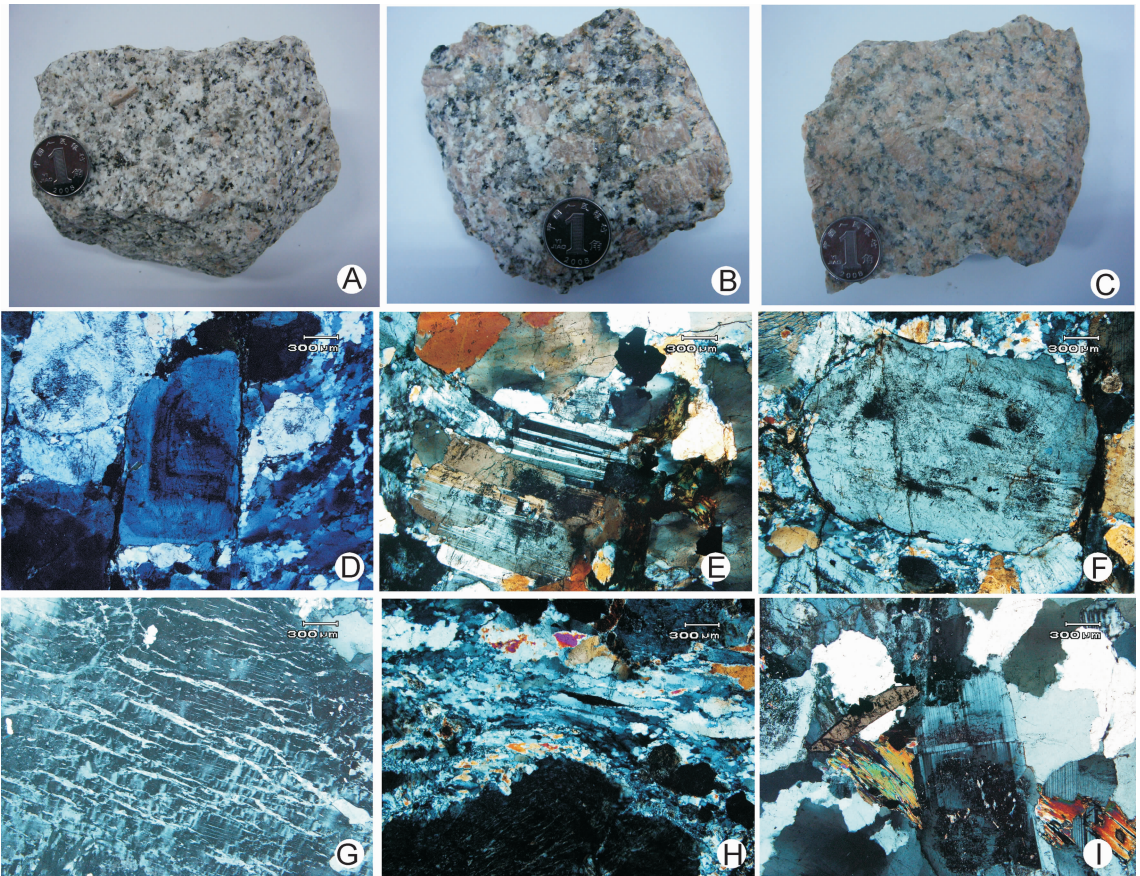


图 3 老君山岩体的典型岩石的手标本照片和显微照片

A—含小斑细中粒黑云母二长花岗岩;B—中斑中粒黑云母二长花岗岩;C—大斑中粗粒黑云母二长花岗岩;
 D—斜长石的环境构造(正交偏光);E—斜长石卡钠复合双晶(正交偏光);F—钾长石的泥化,表面呈尘土状(正交偏光);G—网状条纹长石(正交偏光);H—定向的石英(正交偏光);I—黑云母蚀变为绿泥石(正交偏光)

Fig.3 Hand specimen photographs and photomicrographs of Laojunshan complex

A— Small-prophyry fine-medium-grained biotite monzonitic granite;B—Mid-prophyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite ;C—Big-prophyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite;D— Zoned plagioclase under crossed nicols;E— Carlsbad twin of feldspar under crossed nicols;F— Argillation of potash feldspar under crossed nicols;G— Network perthite under crossed nicols;H— Orientated quartz under crossed nicols;I— Chloritization of biotite under crossed nicols

大部分钾长石发生泥化(图 3-F),具有环带结构,有网状的条纹长石现象(图 3-G),常见云母、锆石、榍石等矿物包裹体;斜长石呈自形-半自形,石英呈他形,具有定向拉长现象(图 3-H);黑云母多呈半自形鳞片状,具绿泥石化(图 3-I);副矿物以榍石、磷灰石和锆石为主,其中榍石多为自形,发育双晶、裂纹(图 3-I)。

总体上,组成老君山复式岩体的 3 个期次岩石岩性单一,仅结构、颜色有较明显的差别。不同期次之间呈不规则套环式分布,脉动式、涌动式接触,结构上从边缘到中心表现为斑晶含量由多到少、粒径由粗至细,具明显结构上的同源岩浆演化特点。

3 矿物化学特征

老君山岩体各期次岩石均以长石、石英和黑云母为主,副矿物有磁铁矿、锆石、榍石和磷灰石。长石和云母的电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,仪器型号为 JXA-8800R,分析条件:加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径为 5 μ m。

3.1 长石

老君山岩体 3 个期次岩石中斑晶均以钾长石为主,基质中有钾长石和斜长石。斑晶钾长石呈浅红色-肉红色,自形板柱状。斜长石呈白色,自形-半自形。含小斑细中粒黑云母二长花岗岩钾长石斑晶含量较少,表面干净,呈半自形-他形板柱状。斜长石呈半自形板条状或板状,聚片双晶发育,常被钾长石包裹或穿插。中斑中粒黑云母二长花岗岩的钾长石呈自形-半自形板状,发育条纹双晶、格子双晶,部分泥化,斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶。大斑中粗粒黑云母二长花岗岩的钾长石呈自形、半自形板柱状,普遍泥化而表面显得不干净。

从电子探针分析结果(表 1)中可以看出,钾长石在不同期次的岩石中,成分上没有明显的区别。在长石分类图解中(图 4),富钠的变种投在钠长石和更长石区,偶见倍长石。富钾的的变种投在正长石区和歪长石区。不同期次的斜长石成分略有差别,表现为粗粒花岗岩中的斜长石的 An 含量相对较低,而细粒花岗岩斜长石的 An 含量相对较高。

3.2 黑云母

黑云母单偏光下呈棕色,自形-半自形,片状和鳞片状,解理极发育,粒径 < 1.5 mm,有轻微的绿泥

石化,正交偏光下具绿-浅绿多色性,其电子探针分析结果见表 2。

电子探针分析数据表明,黑云母富 Ti ($\text{TiO}_2 = 1.83\% \sim 3.4\%$)、富 Mg ($\text{MgO} = 10\% \sim 12\%$)和 K (K_2O 约 10%), Al_2O_3 含量为 13%~15%,主要为镁质黑云母(图 5)。但 LJS4-B6-1-1 样品中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 FeO 的含量分别为 45%、35%和 4%, TiO_2 和 MgO 的含量分别为 0.067%和 0.069%,明显与其他云母成分不同。据丁孝石^[20]的研究,典型幔源黑云母中 $\text{MgO} > 15\%$,而壳源黑云母中 $\text{MgO} < 6\%$,在 $\text{MgO}-\text{FeO}^*/(\text{FeO}^* + \text{MgO})$ 图解中投入壳幔混源区靠近壳源一侧(图 6),表明成岩物质可能来源于壳幔混源。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

老君山岩体主量元素分析结果(表 3~4)显示:岩石富 K_2O 、MgO,贫 CaO。在侵入岩 TAS 图解(图 7)中,3 个期次的样品均落于花岗岩区(除 LJS-B2、LJS-B3),属于亚碱性系列,在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 8)中,基本上落在高钾钙碱系列区域内,在岩石铝饱和和指数判别图(图 9)中,基本上在准铝质和过铝质之间。CIPW 标准矿物计算(表 4),标准矿物中含有刚玉(C)。

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的比值介于 1.12~1.47, TiO_2/MgO 的比值介于 0.54~1.14,变化范围较大。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 的比值介于 25~114, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 0.19~0.57。岩石为富钾、过铝质碱质钙碱性岩系, Na_2O 的含量为 3.59%~4.28%,均大于 3%,具有 I 型花岗岩特征^[22]。从早到晚,老君山岩体的 3 个侵入期次的花岗岩: SiO_2 含量由低→高,MgO、CaO、 Na_2O 含量由高→低, K_2O 含量由低→高,K/Na、A/NCK 值由小→大,具明显的同源岩浆演化特征。

由 SiO_2 主量元素哈克图解(图 10)可以看出,老君山岩体中 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、MgO、 P_2O_5 与 SiO_2 总体上呈现良好的线性关系,但是 CaO、 Na_2O 与 SiO_2 线性相关不明显,整体上来说,这样好的相关性表明很好的结晶分异作用。随着 SiO_2 的增加,MgO、CaO、FeO、 TiO_2 、 P_2O_5 的含量有逐渐降低的变化规律,岩石的含水量在 0.12%~0.82%,表现贫水,岩石富 K_2O 、MgO,贫 CaO。

4.2 稀土元素

稀土元素的分析结果及特征值(表 5)显示:老

表 1 老君山岩体长石电子探针成分分析 (%)
Table 1 Electron microprobe analyses of feldspar from Laojunshan Intrusion (%)

spot	LJS-B1-2	LJS-B1-3	LJS-B17-2	LJS-B17-3	LJS2-B8-3	LJS2-B8-4	LJS2-B8-5	LJS2-B9-2	LJS2-B11-1-1	LJS2-B11-1-2	LJS2-B11-2-1	LJS2-B11-2-2
岩性	大斑中粗粒黑云母二长花岗岩						中斑中粒黑云母二长花岗岩					
SiO ₂	64.83	66.92	63.37	64.44	68.50	67.80	64.00	65.28	64.68	65.62	64.50	65.80
TiO ₂	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	18.17	20.46	22.90	18.08	19.94	19.85	18.35	21.43	18.27	21.44	17.90	21.00
FeO	0.08	0.03	0.15	0.04	0.00	0.04	0.03	0.13	0.05	0.09	0.14	0.02
Cr ₂ O ₃	0.03	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.00
MnO	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
CaO	0.03	0.75	3.51	0.05	0.39	0.33	0.00	2.11	0.01	2.02	0.02	1.77
Na ₂ O	1.20	10.67	9.11	0.85	11.37	11.30	0.45	10.55	0.64	9.92	0.67	10.29
K ₂ O	16.13	0.21	0.32	16.19	0.03	0.13	16.77	0.21	16.42	0.47	16.57	0.11
NiO	0.00	0.02	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	100.47	99.12	99.42	99.69	100.30	99.52	99.66	99.74	100.11	99.58	99.90	99.01
Si	2.99	2.95	2.82	3.00	2.98	2.98	2.98	2.88	3.00	2.90	3.00	2.91
Al	0.99	1.06	1.20	0.99	1.02	1.03	1.01	1.12	1.00	1.12	0.98	1.10
Ca	0.00	0.04	0.17	0.00	0.02	0.02	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.08
Na	0.11	0.91	0.79	0.08	0.96	0.96	0.04	0.90	0.06	0.85	0.06	0.88
K	0.95	0.01	0.02	0.96	0.00	0.01	1.00	0.01	0.97	0.03	0.98	0.01
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An	0.13	3.69	17.24	0.25	1.85	1.58	0.00	9.83	0.02	9.82	0.09	8.61
Ab	10.11	95.10	80.91	7.40	98.01	97.67	3.94	89.03	5.59	87.43	5.79	90.75
Or	89.77	1.21	1.85	92.34	0.14	0.75	96.06	1.14	94.38	2.75	94.12	0.64

续表 1

spot	LJS2-B11-2-3	LJS2-B11-3-2	LJS2-B11-3-3	LJS-B11-1-1	LJS-B11-1-2	LJS-B11-1-3	LJS-B11-2-1	LJS-B11-2-2	LJS-B11-2-3	LJS4-B4-1	LJS4-B4-2	
岩性	中斑中粒黑云母二长花岗岩						含小斑细中粒黑云母二长花岗岩					
SiO ₂	64.93	67.37	65.02	63.14	66.18	66.45	61.42	65.13	64.80	67.55	64.33	
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	
Al ₂ O ₃	22.35	19.87	18.18	22.82	20.94	19.71	23.83	21.43	17.95	20.21	18.22	
FeO	0.10	0.10	0.06	0.08	0.09	0.03	0.09	0.15	0.08	0.02	0.11	
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.65	0.00	0.03	0.00	0.06	0.03	0.05	0.00	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CaO	3.12	0.78	0.00	2.37	1.57	1.04	4.82	2.52	0.02	0.43	0.00	
Na ₂ O	9.06	11.00	0.49	9.64	10.34	9.11	8.58	10.00	1.06	10.96	1.25	
K ₂ O	0.53	0.15	16.76	0.40	0.15	3.46	0.19	0.27	15.26	0.07	15.68	
NiO	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	
P ₂ O ₅	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	
Total	100.10	99.33	100.51	99.11	99.28	99.91	98.96	99.60	99.19	99.30	99.61	
Si	2.86	2.97	3.00	2.83	2.92	2.96	2.75	2.88	3.01	2.97	2.99	
Al	1.16	1.03	0.99	1.20	1.09	1.03	1.26	1.12	0.98	1.05	1.00	
Ca	0.15	0.04	0.00	0.11	0.07	0.05	0.23	0.12	0.00	0.02	0.00	
Na	0.77	0.94	0.04	0.84	0.88	0.79	0.75	0.86	0.10	0.93	0.11	
K	0.03	0.01	0.99	0.02	0.01	0.20	0.01	0.02	0.91	0.00	0.93	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
An	15.48	3.76	0.00	11.70	7.67	4.78	23.44	12.03	0.08	2.12	0.02	
Ab	81.41	95.37	4.23	85.94	91.46	76.16	75.44	86.42	9.54	97.46	10.82	
Or	3.10	0.87	95.77	2.35	0.87	19.05	1.12	1.56	90.38	0.43	89.16	

续表 1

spot	LJS4-B5-1-1	LJS4-B5-1-2	LJS4-B5-1-3	LJS4-B5-2-1	LJS4-B5-2-2	LJS4-B6-1-2	LJS4-B6-1-3	LJS4-B6-2-1	LJS4-B6-2-2	LJS-B6-1	LJS-B6-2	LJS-B6-3
含小斑细中粒黑云母二长花岗岩												
岩性												
SiO ₂	63.59	63.50	63.92	64.00	65.07	64.26	61.02	65.43	65.53	64.53	63.67	65.51
TiO ₂	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	22.91	22.76	22.99	23.15	18.82	18.23	23.32	20.46	18.09	22.40	22.64	21.82
FeO	0.06	0.08	0.10	0.09	0.05	0.10	0.05	0.05	0.02	0.04	0.09	0.13
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00	0.22	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
CaO	4.07	4.02	4.08	4.06	0.32	0.00	5.70	1.98	0.00	2.83	3.64	2.32
Na ₂ O	8.70	8.70	8.94	8.17	3.22	0.76	8.41	9.20	0.76	9.63	9.36	9.71
K ₂ O	0.20	0.21	0.20	0.18	11.63	16.37	0.40	2.41	16.28	0.10	0.13	0.41
NiO	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02
Total	99.55	99.34	100.26	99.67	99.15	99.75	99.15	99.54	100.76	99.59	99.57	99.93
Si	2.82	2.82	2.82	2.82	2.99	2.99	2.75	2.91	3.01	2.85	2.82	2.88
Al	1.20	1.19	1.19	1.20	1.02	1.00	1.24	1.07	0.98	1.17	1.18	1.13
Ca	0.19	0.19	0.19	0.19	0.02	0.00	0.27	0.09	0.00	0.13	0.17	0.11
Na	0.75	0.75	0.76	0.70	0.29	0.07	0.73	0.79	0.07	0.82	0.80	0.83
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.68	0.97	0.02	0.14	0.95	0.01	0.01	0.02
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
An	20.32	20.09	19.91	21.29	1.60	0.00	26.65	9.22	0.00	13.87	17.54	11.37
Ab	78.52	78.65	78.93	77.58	29.15	6.62	71.15	77.42	6.65	85.57	81.72	86.21
Or	1.16	1.26	1.16	1.13	69.25	93.38	2.20	13.36	93.35	0.56	0.74	2.42

注:由中国地质科学院电子探针实验室陈振宇分析;采用 Geokit 软件进行矿物分子式计算。

表 2 老君山岩体黑云母电子探针成分分析 (%)
Table 2 Electron microprobe analyses of biotite from Laojunshan Intrusion (wt%)

Spot	LJS1-B1-2	LJS1-B2-1-4	LJS1-B2-2-1	LJS1-B3-1-1	LJS1-B3-2-1	LJS-B17-1	LJS2-B11-3-1	LJS2-B8-1	LJS4-B6-1-1
SiO ₂	37.78	37.77	38.64	38.73	37.33	37.74	38.24	37.75	45.34
TiO ₂	2.11	3.39	3.16	3.46	3.26	2.76	2.49	2.91	0.07
Al ₂ O ₃	15.76	13.69	13.69	13.36	13.08	13.91	14.44	15.12	34.52
FeO	15.96	17.28	16.40	17.44	17.97	16.62	15.97	17.25	3.65
MnO	0.80	1.02	0.94	1.36	1.55	0.65	0.81	0.66	0.04
MgO	11.82	12.41	12.81	10.76	11.99	12.49	12.60	12.05	0.07
CaO	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.09
Na ₂ O	0.26	0.05	0.13	0.00	0.07	0.05	0.15	0.21	0.27
K ₂ O	9.54	9.98	10.03	9.94	10.01	10.23	10.00	10.22	11.49
Si	2.87	2.86	2.90	2.95	2.86	2.89	2.90	2.84	3.07
Al ^{IV}	1.13	1.14	1.10	1.05	1.14	1.11	1.10	1.16	0.93
Al ^{VI}	0.29	0.09	0.12	0.15	0.05	0.14	0.19	0.18	1.82
Ti	0.12	0.19	0.18	0.20	0.19	0.16	0.14	0.16	0.00
Fe ³⁺	0.22	0.18	0.20	0.26	0.15	0.17	0.19	0.17	0.21
Fe ²⁺	0.80	0.91	0.83	0.85	1.00	0.89	0.82	0.92	0.00
Mn	0.05	0.07	0.06	0.09	0.10	0.04	0.05	0.04	0.00
Mg	1.34	1.40	1.43	1.22	1.37	1.42	1.42	1.35	0.01
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
K	0.93	0.97	0.96	0.97	0.98	1.00	0.97	0.98	0.99
Total	7.78	7.82	7.80	7.74	7.85	7.83	7.81	7.83	7.07
FeO ^{*/(FeO[*]+MgO)}	0.59	0.60	0.58	0.64	0.62	0.58	0.57	0.60	0.98

注:由中国地质科学院电子探针实验室陈振宇分析。

表 3 老君山岩体主量元素地球化学特征 (%)
Table 3 Analytical data of major elements of Laojunshan Intrusion

岩性	含小斑细中粒黑云母二长花岗岩					中斑中粒黑云母二长花岗岩					大斑中粗粒黑云母二长花岗岩				
	LJS4-B4	LJS4-B5	LJS4-B6	LJS-B5	LJS-B6	LJS2-B8	LJS2-B9	LJS2-B11	LJS-B11	LJS1-B2	LJS1-B3	LJS-B2	LJS-B3	LJS-B17	
SiO ₂	72.37	71.80	73.42	72.11	72.59	72.09	74.67	76.34	73.76	72.27	77.15	67.18	69.25	72.62	
TiO ₂	0.27	0.30	0.24	0.26	0.30	0.29	0.20	0.16	0.29	0.30	0.11	0.58	0.42	0.28	
Al ₂ O ₃	13.96	14.20	14.08	14.32	14.06	14.14	13.14	12.82	13.38	14.02	12.56	14.82	15.07	13.86	
FeO	0.45	0.54	0.41	0.66	0.81	0.47	0.34	0.18	0.70	0.56	0.20	1.28	1.10	0.81	
Fe ₂ O ₃	1.28	1.31	1.07	1.05	1.07	1.21	0.87	0.68	0.95	1.27	0.51	1.85	1.30	0.89	
MnO	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.05	0.03	0.06	0.06	0.03	0.07	0.05	0.06	
MgO	0.37	0.49	0.39	0.45	0.55	0.36	0.23	0.14	0.43	0.42	0.11	0.87	0.68	0.47	
CaO	1.24	1.39	1.28	1.34	1.40	1.16	0.86	0.68	0.88	1.28	0.88	2.42	1.81	1.32	
Na ₂ O	3.90	3.83	3.97	3.97	3.98	3.95	3.92	3.59	3.98	3.94	3.81	4.28	3.86	3.87	
K ₂ O	5.00	4.96	4.87	5.24	4.86	5.04	4.85	5.15	4.68	5.28	4.47	4.78	5.67	4.75	
P ₂ O ₅	0.08	0.09	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.03	0.10	0.11	0.03	0.22	0.14	0.09	
CO ₂	0.17	0.17	0.09	0.09	0.09	0.17	0.09	0.09	0.17	0.09	0.09	0.26	0.09	0.09	
H ₂ O+	0.20	0.22	0.12	0.12	0.14	0.30	0.56	0.12	0.42	0.38	0.18	0.82	0.34	0.36	
LOI	0.34	0.37	0.09	0.22	0.19	0.44	0.55	0.29	0.46	0.48	0.28	1.09	0.29	0.28	
Total	99.69	99.73	100.15	99.96	100.19	99.77	100.39	100.30	100.26	100.46	100.41	100.52	100.07	99.75	
δ	2.70	2.68	2.57	2.91	2.64	2.78	2.43	2.29	2.44	2.90	2.01	3.39	3.46	2.51	
Mg [#]	31.38	36.08	36.00	35.70	38.05	31.38	28.85	25.93	35.38	32.81	24.84	36.91	37.23	36.62	
ANK	1.18	1.22	1.19	1.17	1.19	1.18	1.12	1.12	1.15	1.15	1.13	1.21	1.21	1.20	
ACNK	0.99	1.00	1.00	0.98	0.98	1.00	0.99	1.01	1.01	0.96	0.99	0.89	0.95	1.00	
Na ₂ O/K ₂ O	8.90	8.79	8.84	9.21	8.84	8.99	8.77	8.74	8.66	9.22	8.28	9.06	9.53	8.62	
K ₂ O/Na ₂ O	1.28	1.30	1.23	1.32	1.22	1.28	1.24	1.43	1.18	1.34	1.17	1.12	1.47	1.23	
CaO/Na ₂ O	0.32	0.36	0.32	0.34	0.35	0.29	0.22	0.19	0.22	0.32	0.23	0.57	0.47	0.34	
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	51.70	47.33	58.67	55.08	46.87	48.76	65.70	80.13	46.14	46.73	114.18	25.55	35.88	49.50	

注: LOI 为烧失量; ANK = Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)(分子比); ACNK = Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(分子比); Mg[#] = 100×[MgO]/{[MgO]+0.505×[(FeO)+0.9×[Fe₂O₃]]}。

表 4 老君山岩体 CIPW 标准矿物含量 (%)
Table 4 Analytical data of major elements of Laojunshan Intrusion

岩性 Sample	含小斑细中粒黑云母二长花岗岩					中斑中粒黑云母二长花岗岩					大斑中粗粒黑云母二长花岗岩				
	LJS4-B4	LJS4-B5	LJS4-B6	LJS-B5	LJS-B6	LJS2-B8	LJS2-B9	LJS2-B11	LJS-B11	LJS1-B2	LJS1-B3	LJS-B2	LJS-B3	LJS-B17	
石英(Q)	27.44	26.93	28.34	25.56	27.08	27.02	31.29	33.96	30.37	28.84	39.47	23.35	20.6	28.5	
钙长石(An)	5.88	6.59	5.97	5.81	6.16	5.39	3.96	3.49	3.86	3.28	2.41	8.44	7.09	6.28	
钠长石(Ab)	33.34	32.74	33.65	33.76	33.76	33.81	33.44	30.43	33.94	30.36	27.52	30.01	32.87	33.05	
正长石(Or)	29.85	29.61	28.83	31.12	28.79	30.13	28.89	30.49	27.87	31.19	26.28	28.43	33.72	28.33	
刚玉(C)	0	0.14	0.09	0	0	0.24	0	0.06	0.37	1.2	1.45	0.78	0	0.07	
透辉石(Di)	0.07	0	0	0.34	0.17	0	0.06	0	0	0	0	0	0.9	0	
紫苏辉石(Hy)	1.53	1.9	1.49	1.57	1.97	1.49	0.98	0.61	1.66	1.64	0.56	2.74	1.96	1.83	
钛铁矿(Il)	0.52	0.58	0.46	0.5	0.57	0.56	0.38	0.3	0.56	0.57	0.21	1.11	0.8	0.54	
磁铁矿(Mt)	1.17	1.25	1	1.19	1.28	1.15	0.82	0.58	1.13	1.26	0.47	2.13	1.7	1.16	
磷灰石(Ap)	0.19	0.21	0.16	0.16	0.21	0.19	0.14	0.07	0.23	0.26	0.07	0.53	0.33	0.21	
锆石(Zr)	0.03	0.05	0.02	0	0	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	
黄铁矿(Py)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43	0	0	
岩盐(Hl)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.37	0.58	0.81	0	0	
萤石(Flr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.84	0.68	0.83	0	0	
合计	100.01	100	100.01	100	99.99	100.02	99.98	100.02	100	99.82	99.74	99.62	100	99.99	

注:采用 Geokit 软件进行计算。

表 5 老君山岩体稀土元素分析结果(10⁻⁶)及特征值
Table 5 Analytical data of trace elements of Laojunshan Intrusion

岩性 Sample	含小斑细中粒黑云母二长花岗岩					中斑中粒黑云母二长花岗岩					大斑中粗粒黑云母二长花岗岩				
	LJS4-B4	LJS4-B5	LJS4-B6	LJS-B5	LJS-B6	LJS2-B8	LJS2-B9	LJS2-B11	LJS-B11	LJS1-B2	LJS1-B3	LJS-B2	LJS-B3	LJS-B3	LJS-B17
La	36.7	41.8	30	35.7	43.7	39.7	21.5	16	38.3	32.6	44.8	50	41.2		
Ce	66.2	74.4	54.3	66	82.2	64.8	30	21.6	64.1	53.6	110	97	76.4		
Pr	7.31	8.13	6.15	7.12	8.4	7.22	4.21	3.02	7.32	6.19	12.4	10.3	8.07		
Nd	25.5	28.1	22.3	25.4	29.2	24.1	14.5	10.6	25	21.6	45.5	37.2	28.2		
Sm	4.78	5.15	4.34	4.88	5.22	4.18	2.65	2.03	4.34	3.86	8.48	6.93	5.35		
Eu	0.71	0.8	0.71	0.72	0.76	0.66	0.38	0.35	0.64	0.7	1.28	1.1	0.76		
Gd	4.77	5	4.61	4.7	5.04	3.96	2.76	2.13	4.36	3.93	8.36	6.71	5.28		
Tb	0.72	0.73	0.76	0.68	0.73	0.61	0.46	0.35	0.68	0.61	1.26	1.03	0.8		
Dy	4.39	4.49	4.86	4.08	4.55	3.98	3.09	2.25	4.32	3.98	7.96	6.43	5.03		
Ho	0.92	0.9	1	0.86	0.9	0.82	0.66	0.49	0.94	0.82	1.64	1.3	1.01		
Er	2.95	2.71	3.2	2.62	2.78	2.72	2.41	1.54	3.01	2.64	5.03	3.93	3.08		
Tm	0.47	0.43	0.48	0.4	0.45	0.47	0.44	0.25	0.5	0.43	0.78	0.59	0.49		
Yb	3.35	2.95	3.57	2.92	3.05	3.51	3.84	2.04	3.68	3.07	5.37	4.07	3.56		
Lu	0.51	0.46	0.55	0.45	0.5	0.57	0.69	0.34	0.59	0.49	0.79	0.59	0.54		
Y	25.7	24.1	26.5	22.5	25.3	23.3	19.8	12.9	26.1	22.2	43.7	33.3	27.7		
Σ REE	159.28	176.05	136.83	156.53	187.48	157.30	87.59	62.99	157.78	134.52	253.65	227.18	179.77		
LREE	141.20	158.38	117.80	139.82	169.48	140.66	73.24	53.60	139.70	118.55	222.46	202.53	159.98		
HREE	18.08	17.67	19.03	16.71	18.00	16.64	14.35	9.39	18.08	15.97	31.19	24.65	19.79		
LREE/HREE	7.81	8.96	6.19	8.37	9.42	8.45	5.10	5.71	7.73	7.42	7.13	8.22	8.08		
La _N /Y _N	7.86	10.16	6.03	8.77	10.28	8.11	4.02	5.63	7.47	7.62	5.98	8.81	8.30		
δ Eu	0.45	0.48	0.48	0.45	0.45	0.49	0.43	0.51	0.45	0.54	0.46	0.49	0.43		
δ Ce	0.93	0.93	0.93	0.96	0.98	0.87	0.73	0.71	0.88	0.86	1.12	0.99	0.96		

表 6 老君山岩体微量元素分析结果(10^{-6})及特征值
Table 6 Analytical data of trace elements of Laojunshan Intrusion

岩性 Sample	含小斑细中粒黑云母二长花岗岩					中斑中粒黑云母二长花岗岩					大斑中粗粒黑云母二长花岗岩				
	LJS4-B4	LJS4-B5	LJS4-B6	LJS-B5	LJS-B6	LJS2-B8	LJS2-B9	LJS2-B11	LJS2-B11	LJS1-B2	LJS1-B3	LJS-B2	LJS-B3	LJS-B17	
Cu	9.99	4.47	4.53	7.99	9.01	23.3	3.08	10.1	13.7	3.63	1.98	15.5	8.91	8.47	
Fe	1.25	1.34	1.07	1.25	1.38	1.21	0.87	0.62	0.21	1.32	0.51	2.29	1.77	0.25	
Pb	24.3	22.8	27.2	25.3	25.9	22.2	25	24.4	22.9	23.5	24.4	24.2	24.3	24.8	
Zn	46.9	40.6	28	47.1	46.6	31.9	29.6	14.3	45.7	36.9	15.9	61.8	50.2	30.4	
Ni	15.7	4.76	1.92	3.13	3.3	1.87	1.34	3.49	1.89	2.18	2.02	4.99	3.93	1.87	
Co	2.18	2.17	1.7	2.04	2.36	1.43	1.01	0.93	1.5	2.13	0.63	5.68	3.57	1.94	
V	17.6	18.7	14.3	17.6	21.3	14	9.36	7.97	13.4	18.4	5.49	39.2	28.4	16.4	
Cr	30.1	7.79	2.96	5.07	5.11	2.65	1.81	6.41	2.9	3.02	3.04	5.55	6.18	2.49	
Rb	194	174	188	190	205	205	237	251	209	177	245	133	163	202	
Sr	183	203	160	185	198	198	84.5	78.2	163	238	116	382	314	173	
Ba	642	742	634	739	708	572	277	275	465	672	270	872	1249	609	
F	0.043	0.065	0.047	0.043	0.063	0.077	0.022	0.022	0.054	0.052	0.016	0.11	0.065	0.073	
Mo	0.49	0.23	0.14	0.31	0.22	0.43	0.24	0.34	0.32	0.4	0.13	1.35	1.19	0.06	
Mn	0.046	0.046	0.039	0.046	0.046	0.054	0.039	0.023	0.046	0.046	0.023	0.054	0.039	0.046	
Sc	4.69	4.18	4.01	3.97	5.14	3.83	3.92	2.05	4.16	3.57	1.93	6.18	4.38	4.38	
Y	25.7	24.1	26.5	22.5	25.3	23.3	19.8	12.9	26.1	22.2	9.82	43.7	33.3	27.7	
Zr	186	196	167	186	209	189	139	73.6	222	188	61.6	292	307	179	
Hf	5.17	5.26	5.17	5.07	5.66	5.44	5.22	2.67	5.88	5.11	2.23	6.84	7.3	5.23	
Nb	25.4	24.1	26.8	24.5	26.8	41	44.1	23.2	39.6	29.2	26.4	32.9	22.4	24.8	
Ta	3.03	2.47	3.08	2.8	2.76	4.51	6.78	2.63	3.89	3.35	2.27	3.99	2.59	3.1	
Th	24.1	22.8	23.4	24.2	26.5	23.5	22.2	16.1	25.2	21.5	17.7	21.5	28.9	27	
U	6.61	5.4	7.1	7.35	7.3	8.18	7.64	6.2	4.71	6.21	9.14	7.46	5.04	7.69	
Cs	4.68	5.43	6	5.74	6.32	5.1	4.44	4.62	4.81	5.21	6.03	3.06	4.23	6.56	
Ga	18.7	18.6	18.5	18.4	19.2	18.6	19.3	15.5	17.8	17.1	14	19.9	19.2	18.7	
Au	0.54	0.49	0.38	1.47	0.42	0.89	0.54	0.48	0.39	0.89	0.65	0.8	0.49	0.59	

表 7 老君山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年有效数据
Table 7 Valid zircon SHRIMP U-Pb analytical data of Laojunshan Intrusion

Spot	$^{206}\text{Pb}/\%$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Age/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Age/Ma
LJS2-B8-1.1	0.68	1712	826	0.5	26.8	0.0462	5.1	0.115	5.2	0.01807	1	115.4	± 1.1	7	± 120
LJS2-B8-2.1	0.91	893	688	0.8	18.4	0.0489	6.3	0.16	6.5	0.02377	1.1	151.5	± 1.7	143	± 150
LJS2-B8-3.1	0.92	1915	1825	0.98	30.4	0.0456	4.8	0.1149	4.9	0.01829	0.98	116.8	± 1.1	-25	± 120
LJS2-B8-4.1	0.48	1674	928	0.57	25.3	0.0495	4.2	0.1192	4.3	0.01748	0.99	111.7	± 1.1	170	± 98
LJS2-B8-5.1	1.11	1294	890	0.71	20.7	0.0448	7	0.1136	7.1	0.01839	1.1	117.5	± 1.3	-66	± 170
LJS2-B8-6.1	5.91	1407	1341	0.98	22.3	0.053	22	0.126	22	0.01734	1.8	110.8	± 1.9	315	± 510
LJS2-B8-7.1	0.62	1529	601	0.41	23.2	0.0465	4.9	0.1125	5	0.01753	1.1	112	± 1.2	26	± 120
LJS2-B8-8.1	1.05	1738	702	0.42	26	0.0435	6.6	0.1035	6.7	0.01725	1	110.2	± 1.1	-138	± 160
LJS2-B8-10.1	0.34	2027	971	0.49	30.5	0.0465	3.9	0.112	4.1	0.01746	1	111.6	± 1.1	25	± 95
LJS2-B8-11.1	0.76	1775	661	0.38	26.6	0.046	3.5	0.11	3.7	0.01733	1.1	110.8	± 1.2	-0.05	± 85
LJS2-B8-12.1	0.55	1491	826	0.57	22.6	0.0484	3.6	0.1169	3.7	0.01753	0.78	112.01	± 0.87	117	± 86
LJS2-B8-13.1	0.35	1621	1007	0.64	24.2	0.0473	2.8	0.113	2.9	0.01734	0.83	110.82	± 0.91	63	± 66
LJS2-B8-14.1	3.61	2692	2115	0.81	43.3	0.0485	6.5	0.1206	6.6	0.01803	0.79	115.18	± 0.91	125	± 150
LJS2-B8-15.1	0.57	763	301	0.41	11.4	0.0494	5.1	0.1176	5.2	0.01727	1	110.4	± 1.1	167	± 120
大斑中粗粒黑云母二长花岗岩 (LJS1-B1)															
LJS1-B1-1.1	0.47	959	616	0.66	14	0.0491	3	0.1146	3.2	0.01694	0.9	108.29	± 0.97	150	± 71
LJS1-B1-3.1	1.17	1626	1453	0.92	23.9	0.0457	4.9	0.1066	5	0.0169	0.99	108	± 1.1	-16	± 120
LJS1-B1-4.1	1.83	1327	915	0.71	19.7	0.0448	7.6	0.1049	7.7	0.017	0.9	108.66	± 0.97	-69	± 190
LJS1-B1-5.1	0.3	1150	657	0.59	17.6	0.0463	3.2	0.1134	3.3	0.01776	0.89	113.5	± 1.0	15	± 76
LJS1-B1-6.1	0.64	1325	467	0.36	18.8	0.0466	5.2	0.1056	5.3	0.01644	0.99	105.1	± 1.0	28	± 120
LJS1-B1-7.1	0.13	1155	681	0.61	16.6	0.0496	2.9	0.1147	3	0.01676	0.89	107.14	± 0.95	177	± 67
LJS1-B1-8.1	0.5	1080	990	0.95	15.9	0.0526	4	0.1234	4.1	0.01701	0.93	108.7	± 1.0	313	± 92
LJS1-B1-9.1	0.78	1274	791	0.64	18.5	0.0506	4.7	0.1172	4.8	0.01682	0.92	107.5	± 0.98	221	± 110
LJS1-B1-10.1	1	743	290	0.4	10.9	0.0468	4.5	0.1088	4.6	0.01685	1.1	107.7	± 1.1	41	± 110
LJS1-B1-11.1	0.62	1416	1070	0.78	20.9	0.0463	3.2	0.1088	3.3	0.01705	0.83	108.99	± 0.90	12	± 76
LJS1-B1-12.1	0.82	1604	1499	0.97	23.4	0.0455	4.7	0.1055	4.7	0.01683	0.83	107.61	± 0.89	-31	± 110
LJS1-B1-13.1	0.47	1447	1045	0.75	21.7	0.0459	4.3	0.1098	4.4	0.01736	0.94	110.9	± 1.0	-8	± 100
LJS1-B1-14.1	5.51	3298	2740	0.86	64.6	0.0455	8.6	0.135	8.7	0.02156	1.1	137.5	± 1.4	-28	± 210
LJS1-B1-15.1	0.3	1485	623	0.43	21.7	0.0494	2.9	0.1154	3	0.01693	0.92	108.21	± 0.99	169	± 67

中斑中粒黑云母二长花岗岩 (LJS2-B8)

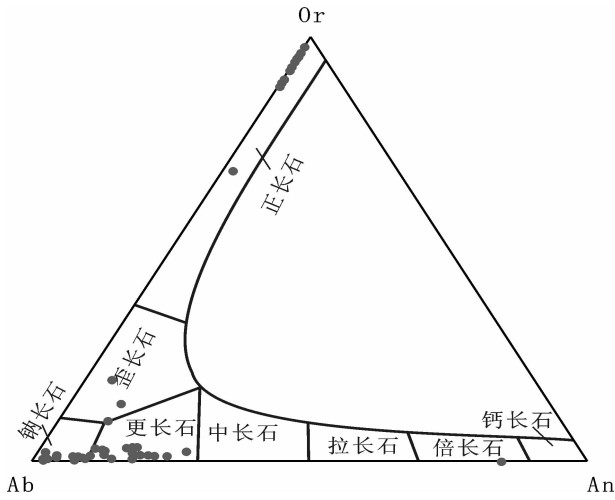


图4 长石分类图解^[18]

Fig.4 Classification of feldspar^[18]

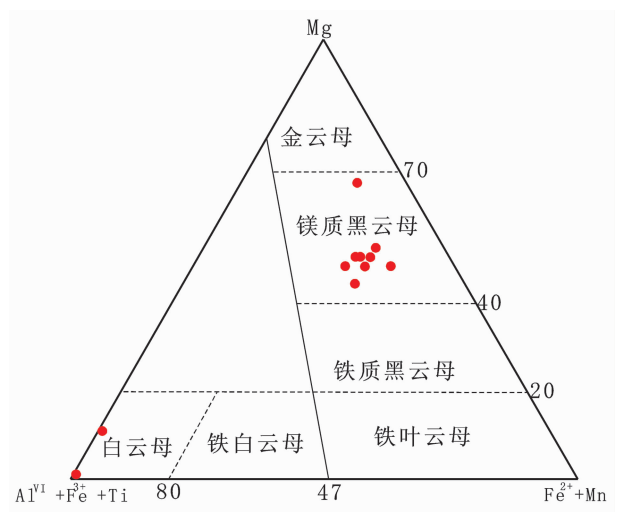


图5 黑云母成分分类图^[19]

Fig.5 Classification of biotites^[19]

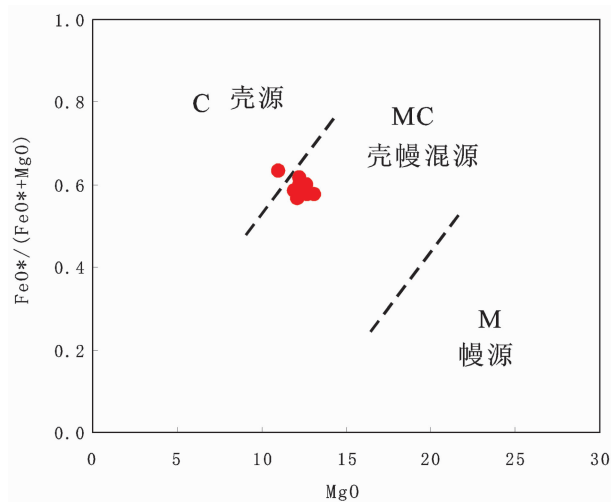


图6 黑云母物质来源判别图^[21]

Fig.6 Diagram for discrimination of matter source of biotites^[21]

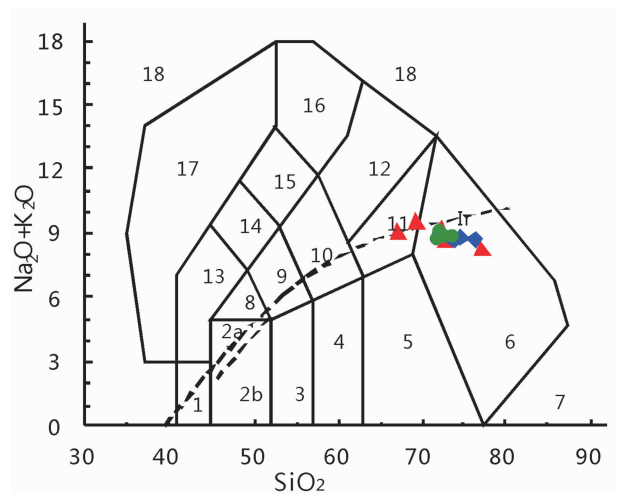


图7 SiO₂-(Na₂O+K₂O)岩石类型分类图解^[23]

(含小斑细中粒黑云母二长花岗岩;中斑中粒黑云母二长花岗岩;大斑中粗粒黑云母二长花岗岩)

Fig.7 SiO₂-(Na₂O+K₂O)plots for Laojunshan Intrusion^[23]

(Small-porphyry fine-medium-grained biotite monzonite granite;Mid-porphyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite;Big-porphyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite)

君山花岗岩稀土总量在 $52.69 \times 10^{-6} \sim 227.18 \times 10^{-6}$ 。样品 La 和 Nd 含量较高, Eu/Sm 比值变化不大, 介于 0.14~0.18, Sm/Nd 为 $0.17 \times 10^{-6} \sim 0.19 \times 10^{-6}$, 为轻稀土富集型, 重稀土元素几乎没有分馏; 3 个期次的稀土元素配分曲线都近于平行, 仅总量上有所差别, LREE/HREE 比值为 $6.19 \times 10^{-6} \sim 9.42 \times 10^{-6}$, 说明轻重稀土分馏程度较大。在稀土元素球粒陨石标准化配分型式图上(图 11), δ Eu 均小于 1, 存在负 Eu 异常, 3 期花岗岩具有明显的 Eu 异常, 所有岩石均显示出相似的配分模式: 总体表现为向右倾斜且相对左陡右平, Eu 处“V”型谷的曲线特征, 暗示它们应为同一母岩浆演化的结果。

4.3 微量元素

微量元素的分析结果及特征值列于表 6。其中 Ba 含量为 $270 \times 10^{-6} \sim 872 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $84.5 \times 10^{-6} \sim 382 \times 10^{-6}$, Ni 含量为 $1.34 \times 10^{-6} \sim 4.99 \times 10^{-6}$, Sr/Y 比值为 4.27~11.81, Zr/Hf 比值为 26.63~42.69, Nb/Ta 比值为 6.5~11.63, 老君山 3 个期次岩体的过渡族元素 Co、Ni、Cr、V 含量低, 亲石元素 Ba、Sr 高, Rb 低, 高

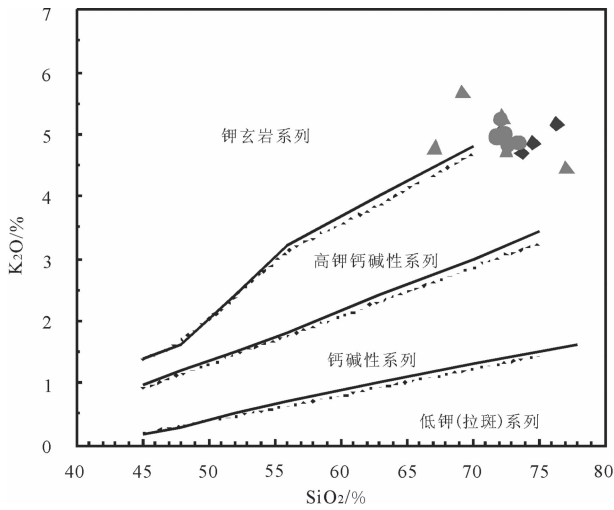


图 8 SiO₂-K₂O 岩石系列判别图^[24]

Fig.8 K₂O-SiO₂ plot for Laojunshan Intrusion^[24]

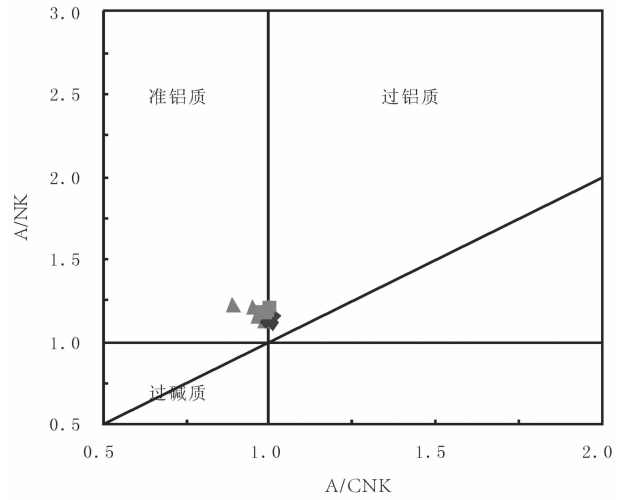


图 9 岩石铝饱和指数判别图解^[24]

Fig.9 A/CNK-A/NK plot for Laojunshan Intrusion^[24]

场强元素 Nb、Zr、Th 高, Sc 低, 与 I 型花岗岩相比, 亲石元素富集。Rb/Sr>0.5, 为 0.51~2.67, 具壳源花岗岩的特征。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 12)上, 3 期花岗岩具有明显的 Ti 和 P 负异常, 出现明显的 Pb 正异常, 表明 Pb 相对富集。

5 花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年

尽管张宗清等^[20]报道了老君山岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄(115.9±7.6)Ma, 但是由于 Rb-Sr 法测年的局限性, 还没有全面对各侵入期次的岩石进行测年。为了准确厘定花岗岩成岩年龄, 笔者选用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法对第 2 期中斑中粒黑云母二长花岗岩和第 3 期大斑中粗粒黑云母二长花岗岩进行精确测年。

5.1 样品描述

2 个样品均采自栾川—西峡的公路上, 第 2 期中斑中粒黑云母二长花岗岩样品(LJS2-B8)位于: 东经 111°42'02", 北纬 33°40'14"; 第 3 期大斑中粗粒黑云母二长花岗岩样品(LJS1-B1)位于: 东经 111°42'51", 北纬 33°43'40"。

样品中的锆石多数呈无色透明, 金刚光泽, 晶体呈柱状, 具有完好的晶形。锆石阴极发光图像(图 13)显示, 多数锆石颗粒发育典型的韵律环带结构, 表现出岩浆成因锆石的特点。部分锆石颗粒中可见不规则的内核, 应为继承锆石。从表 7 中可知, 中

斑中粒黑云母二长花岗岩 U、Th 含量分别变化于 763×10⁻⁶~2692×10⁻⁶ 和 301×10⁻⁶~2115×10⁻⁶, Th/U 值为 0.38~60.98; 大斑中粗粒黑云母二长花岗岩 U、Th 含量分别变化于 743×10⁻⁶~3 298×10⁻⁶ 和 290×10⁻⁶~2 740×10⁻⁶, Th/U 值在 0.36~0.97, 均显示出岩浆锆石的特点。

5.2 测试结果

分析了中斑中粒黑云母二长花岗岩(LJS2-B8) 15 个锆石颗粒共计 15 个点, 其中 10 粒锆石的 10 个点的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 14), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (111 ± 1) Ma (MSWD=0.41)。这一年龄解释为第 2 期岩浆结晶的年龄。其中测点 LJS2-B8-1.1、LJS2-B8-3.1、LJS2-B8-5.1、LJS2-B8-6.1 和 LJS2-B8-14.1 的 U 和 Th 含量明显高于其他测点, 导致年龄值离群, 故在年龄统计时舍去。

分析了大斑中粗粒黑云母二长花岗岩(LJS1-B1) 14 粒锆石共计 14 个点, 其中 10 粒锆石的 10 个点的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 14), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (108 ± 1) Ma (MSWD=0.39), 这一年龄解释为第 3 期侵入岩的结晶年龄。其中测点 LJS1-B1-5.1、LJS1-B1-6 和 LJS1-B1-13.1 均测的是锆石的核部, U 含量明显低于其他测点, 并且存在铅丢失; 而测点 LJS1-B1-14.1 的普通 Pb 含量过高, 在年龄统计时舍去这 4 个点的结果。

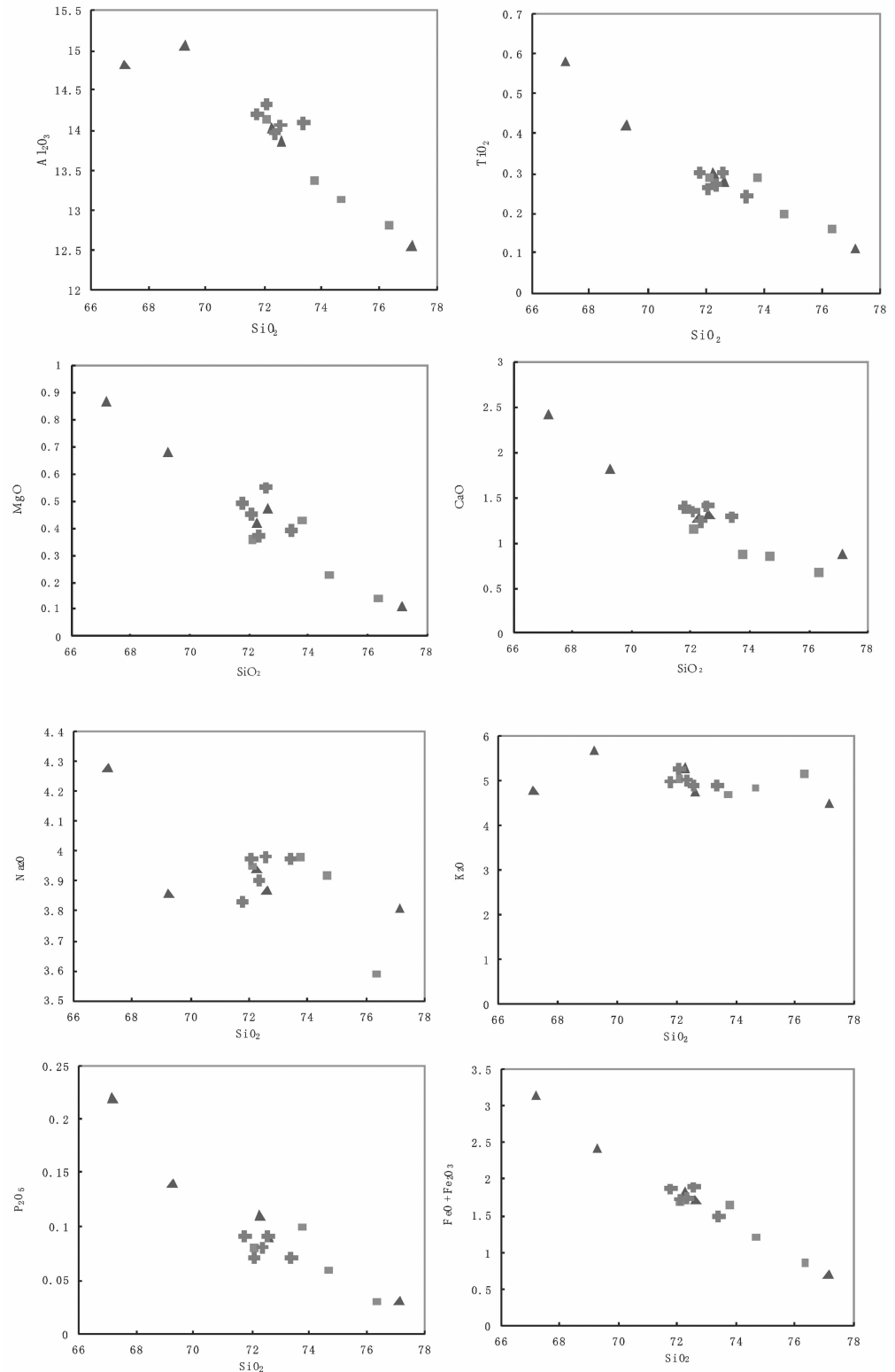


图 10 主要元素 Harker 图解(十含小斑细中粒黑云母二长花岗岩;▲大斑中粗粒黑云母二长花岗岩; ■中斑中粒黑云母二长花岗岩)

Fig.10 Variations of major elements with SiO_2 for Laojunshan Intrusion (十Small-porphyry fine-medium-grained biotite monzonitic granite;▲Big-porphyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite; ■Mid-porphyry medium-coarse grained biotite monzonitic granite)

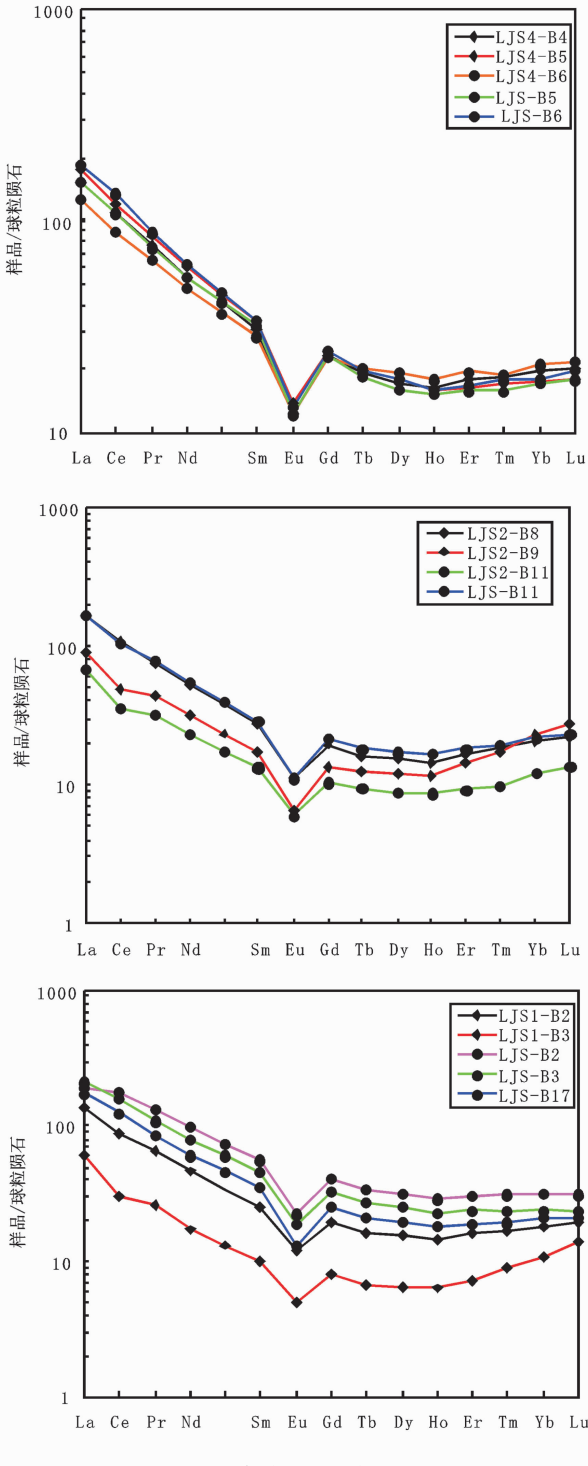


图 11 稀土元素球粒陨石标准化图解^[25]
 Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns of Laojunshan Intrusion^[25]

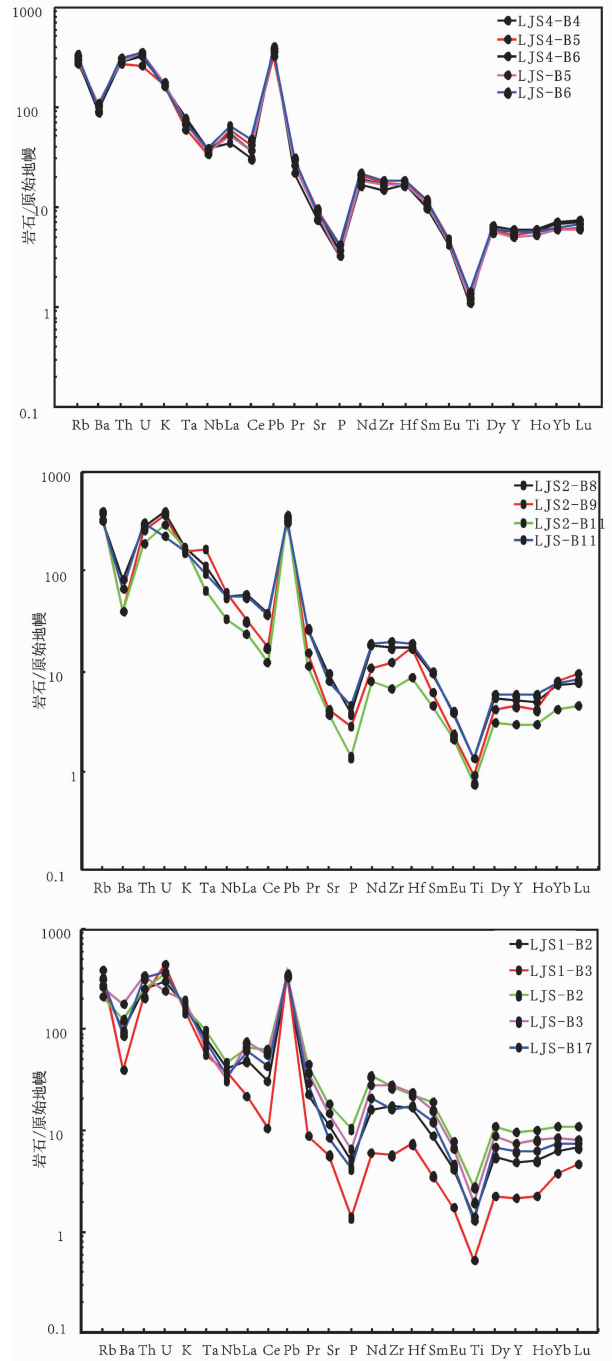


图 12 微量元素原始地幔标准化图解^[25]
 Fig.12 Primitive mantle-normalized trace element patterns of Laojunshan Intrusion^[25]

6 讨论

6.1 成岩构造环境

研究表明,不同构造环境下形成的各种岩石的

微量元素含量与组合也不同^[27-29],不同微量元素组合特点,反映不同的花岗岩成岩构造环境。例如:(1)洋脊花岗岩的微量元素标准化图解呈平坦型大多数正常洋脊花岗岩微量元素标准化值近于1,K,Rb明显亏损;异常洋脊花岗岩以 Ta、Th、Nb、Ce 丰度高

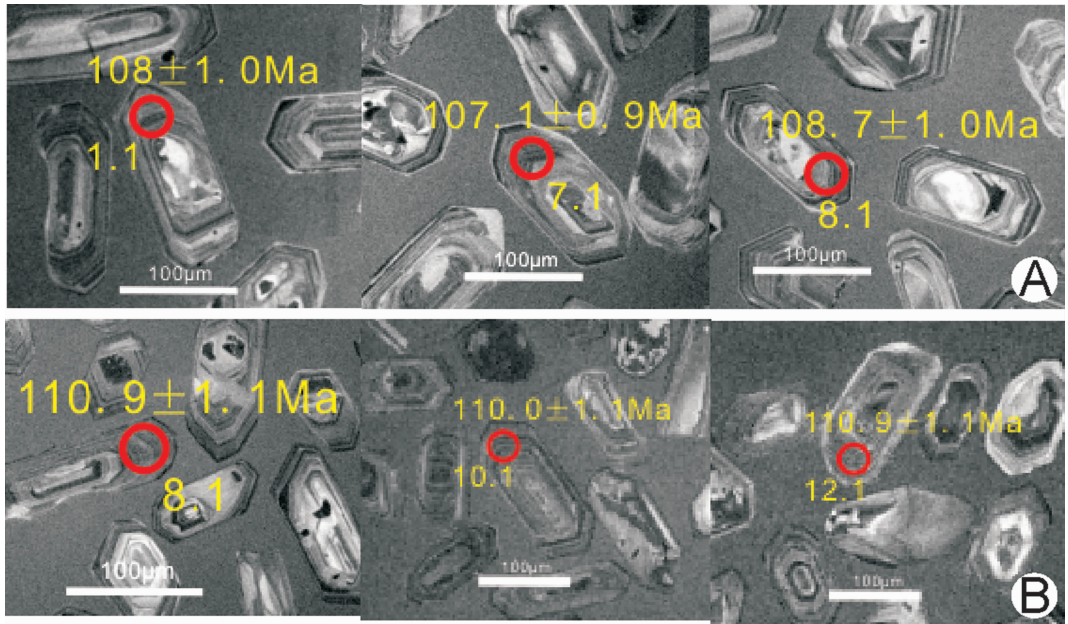


图 13 样品锆石阴极发光图
(A-大斑中粗粒黑云母二长花岗岩,B-中斑中粒黑云母二长花岗岩)

Fig.13 Cathodoluminescence images of zircons of samples
A-Big-porphry medium-coarse grained biotite monzonitic granite, B-Mid-porphry medium-coarse grained biotite monzonitic granite

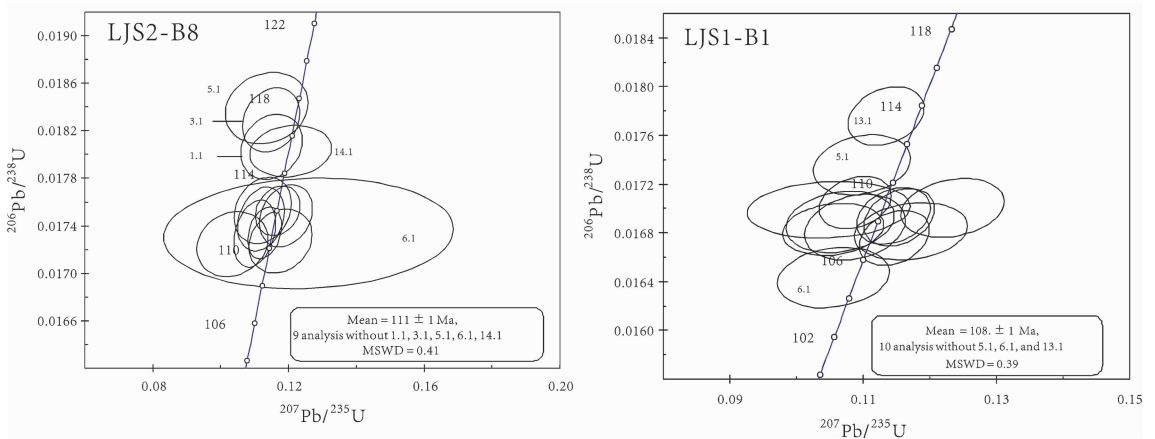


图 14 老君山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图
Fig.14 Concordia diagram of zircon SHRIMP U-Pb dating results

而偏离平坦型模式;俯冲带洋脊花岗岩 Ta、Ba 含量高,K、Rb 含量较低。(2) 火山弧花岗岩的 Ta、Nb、Ce、Hf、Sm、Zr、Y、Yb 等含量较低。(3)板内花岗岩以明显 Ba 亏损和富集其余 11 种微量元素为特征,其中 K、Ta、Th、Rb 富集更为明显。(4)碰撞型花岗岩以 Rb 明显富集为特征,K、Th 含量也较高,Ba 相对亏损,但 Ce、Hf、Sm、Zr、Y、Yb 等明显低于洋脊花

岗岩。(5)后碰撞花岗岩同样具有 Th、Rb 富集,但具有较强的 Ba 亏损和弱的 Zr 亏损,而 Ta、Nb 没有或亏损不明显。因此 Rb、Y(Yb)、Nb(Ta)等元素是判断花岗岩构造环境的有效元素。

秦岭造山带是华北和扬子两大板块于三叠纪相互碰撞形成的^[30-32]。三叠纪以前,华北地台和扬子地台一直处于稳定发展阶段。印支期,华北陆块和扬子

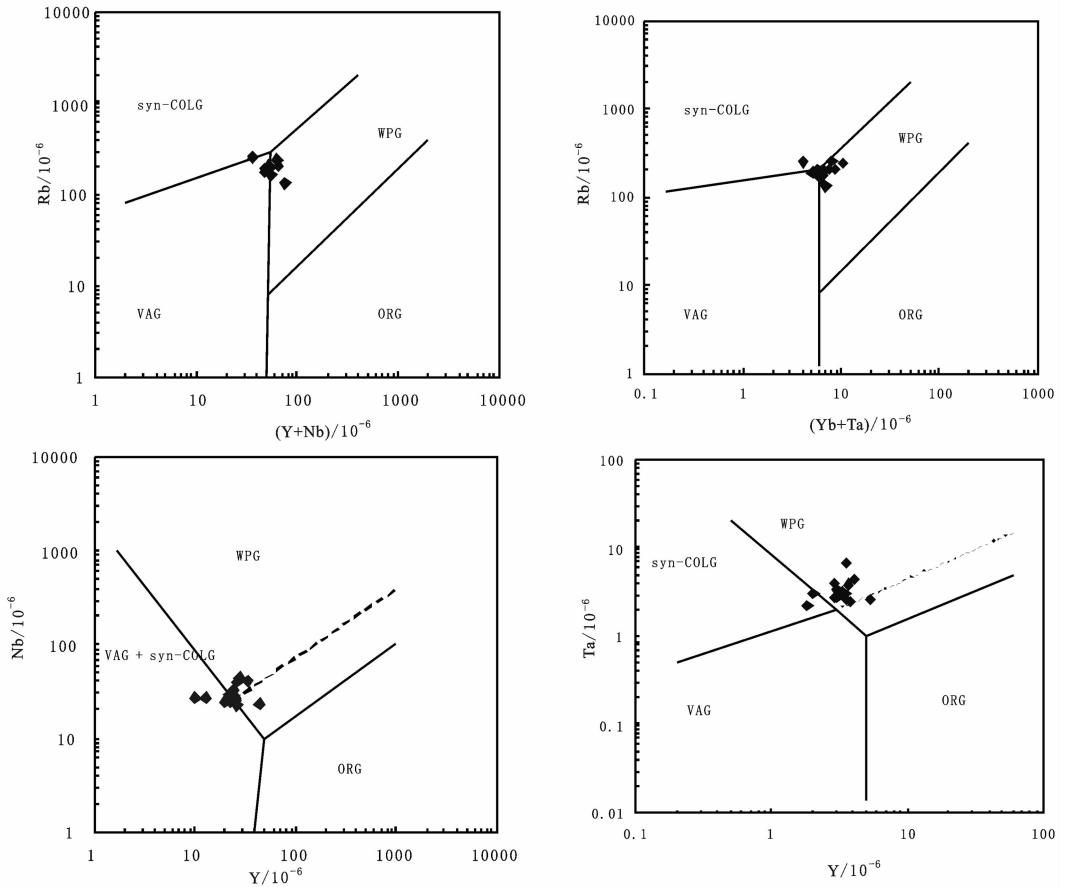


图 15 花岗岩构造环境判别图解^[36]

COLG-同碰撞花岗岩;VAG-火山弧花岗岩;WPG-板内花岗岩;ORG-洋脊花岗岩

Fig.15 Discrimination diagram for tectonic settings of Laojunshan Intrusion^[36]

COLC-Syn-collision granite;VAG-Volcanic arc granite;WPG-Intraplate granite;ORG- Ocean ridge granite

陆块相向俯冲挤压碰撞造山^[33]。之后开始陆内造山作用,碰撞造山作用结束于侏罗纪^[34]。侏罗纪末—白垩纪初,整个中国东部发生了构造体制的大转换,主应力场由近 EW 向构造体制转换为古太平洋板块向欧亚板块下俯冲控制的 NE-NNE 向构造体制^[35],包括东秦岭在内的华北地台南缘转入伸展构造环境。早白垩世中晚期,受中国东部岩石圈减薄作用的影响,华北克拉通南缘发生了大规模的伸展及变质核杂岩构造。伸展作用导致岩石圈减薄、太古宙变质核的隆升及大规模的岩浆侵位。

由老君山花岗岩微量元素含量(表 6)和原始地幔标准化微量元素蛛网曲线(图 12)可知,Ba 含量相对较高,Co、Ni、Cr、V 含量低,亲石元素 Ba、Sr 高、Rb 低,高场强元素 Nb、Zr、Th 高,Sc 低,Rb 明显富集,K、Th 含量也较高,Ba 相对亏损(部分 Ba 亏损较强烈),亲石元素富集,具壳源花岗岩的特征。微量元

素投在(Y+Nb)-Rb、(Yb+Ta)-Rb、Y-Nb 和 Yb-Ta 等判别花岗岩成岩构造环境的图解(图 15)上,结果显示出血内花岗岩的特征。结合该区的区域地质背景及室内研究,认为老君山花岗岩形成于大陆岩石圈稳定后的(陆内)拉张环境。

6.2 成岩时代

早白垩世为华北陆块南缘非常重要的一期强烈岩浆活动,以侵入为主,仅晚期伴随中酸性火山喷发-沉积。侵入岩以花岗岩基为主,其次为花岗斑岩体和隐爆角砾岩体。花岗岩基主要有华山、文峪、娘娘山、花山、合峪、太山庙、四棵树、老君山等。花岗斑岩体主要有蒿坪沟、雷门沟、祁雨沟、斑竹寺、东沟、小妹河、龙卧沟、后河、小湖峪等。近年来秦岭地区晚中生代侵入岩的年龄精测数据(表 8)表明,区内侵入岩年龄数据多分布于 157~101 Ma。毛景文等^[35]与 Mao et al^[37]提出,在中国东部以 135 Ma 为界线,曾

表 8 东秦岭地区晚中生代岩体精确年龄结果
Table 8 Precise dating results of late Mesozoic intrusions in east Qinling area

岩体 名称	岩性	LA-ICP-MS	SHRIMP 锆石	资料来源
		锆石 U-Pb 法	U-Pb 法	
	角闪石英正长岩		107.3 ± 2.4 Ma	[38]
张士英	花岗斑岩		106.7 ± 2.5 Ma	[38]
	石英斑岩		101 ± 3 Ma	[38]
老君山	大斑中粗粒黑云二长花岗岩		108 ± 1Ma	本文
	中斑中粒黑云二长花岗岩		111 ± 1 Ma	本文
石板河	花岗岩		108.9 ± 3.0Ma	[39]
东沟	石英正长斑岩		112 ± 1Ma	[11]
太山庙	花岗岩		115 ± 2Ma	[40]
二郎坪	花岗岩		116 ± 2.0Ma	[39]
曲里	石英闪长斑岩		117 ± 1.6Ma	[41]
合峪	花岗岩		127.2 ± 1.4Ma	[35]
	二长花岗岩	134.5 ± 1.5Ma		[42]
蒿坪	花岗岩		130.7 ± 1.4Ma	[35]
花山	花岗岩		132.0 ± 1.6Ma	[34]
蒿坪沟	花岗斑岩		133.5 ± 1.4Ma	[11]
华山	二长花岗岩	133.8 ± 1.1Ma		[41]
祁雨沟	花岗斑岩	134.1 ± 2.3Ma		[43]
雷门沟	花岗斑岩		136.2 ± 1.5Ma	[44]
文峪	花岗岩		138.4 ± 2.5Ma	[34]
娘娘山	花岗岩		141.7 ± 2.5Ma	[34]
金堆城	花岗斑岩	140.95 ± 0.45Ma		[45]
莲花沟	二长花岗斑岩	144.5 ± 8.9Ma		[46]
	闪长岩	147.7 ± 2.0Ma		[46]
老牛山	二长花岗岩	146.35 ± 0.55Ma		[45]
五丈山	花岗岩		156.8 ± 1.2Ma	[35]
南泥湖	花岗岩		157.1 ± 2.9Ma	[35]
上房沟	花岗岩		157.6 ± 2.7Ma	[35]

经发生过两次大规模的花岗岩侵位事件,对应的动力学过程分别为侏罗纪—早白垩世 Izanagi 板块的浅位平板俯冲和中白垩世由于 Izanagi 板块平行大陆边缘运动而导致岩石圈减薄伸展。

6.3 岩石成因

花岗岩的成因分类繁多,其中应用较为广泛的主要是 I、S、M、A 型分类,前三者强调其物质来源:I 型来自火成岩或下地壳,S 型来自沉积岩或上地壳,M 型则是地幔来源,A 型则强调其形成的构造环境及成分特点。从岩石系列来看,I 型和 S 型主要是钙

碱性系列或高钾钙碱性系列,M 型则是拉斑玄武岩系列,A 型已属碱性系列范围。同一岩石系列的岩石在矿物组成和化学成分上相似,不同岩石系列的岩石的形成环境、物质来源和形成过程则不尽相同。岩石成因信息可以通过岩石系列及其地球化学特征来反映^[47-48]。就本区岩石系列而言,其完全不同于 A 型花岗岩类,也不是拉斑玄武岩系列的幔源岩石,从表 9 可以看出,老君山花岗岩既具有 I 型花岗岩的特征又具有 S 型花岗岩的特征,因此,反映其原岩为火山—沉积岩。

表 9 老君山花岗岩特征与典型 I 型、S 型花岗岩对比
Table 9 Laojunshan intrusion characteristics in comparison with typical I type and S type granites

特征	I 型(同熔型)	S 型(改造型)	老君山
时空分布	大陆板块边缘活动带和大陆板块内部深断裂带	晚元古代至中生代, 大陆板块内部	北秦岭构造带中
CIPW 矿物刚玉、透辉石	常见透辉石 (Di), 刚玉<1%	多不见透辉石 (Di), 刚玉>1%	不见透辉石, 可见刚玉1%
富矿物	富含副矿物, 以磁铁矿为主, 稀土放射性矿物少见	常见堇青石、石榴石、红柱石等铝矿物, 重熔花岗岩可含铁族及铈族稀土矿物	含锆石、榍石、磁铁矿等
黑云母成分	镁-镁铁黑云母	铁黑云母	镁黑云母
角闪石	含	不含	不含
Na ₂ O	一般>3%	一般<3%	均>3% (3.59%~4.28%)
K ₂ O/Na ₂ O	低 (0.8~1.28)	高 (0.79~2.5)	高 (1.12~1.47)
A/NKC	<1.1	>1.1	0.95~1.01
过渡族元素 Cr、Ni	Cr 平均: 15×10 ⁻⁶ ; Ni 平均: 13×10 ⁻⁶	Cr 平均: 2×10 ⁻⁶ ; Ni 平均: 1×10 ⁻⁶	Cr 平均: 6.07×10 ⁻⁶ ; Ni 平均: 3.74×10 ⁻⁶
Rb/Sr	<1	>1	0.34~3.21
SiO ₂	53%~76%, 变化范围宽	65%~76%, 变化范围窄, 相对限于高 SiO ₂ 范围	67%~77%, 变化范围窄, 高 SiO ₂ 范围
CaO	高	低	低 (0.68%~2.42%)
稀土配分型式	右倾平滑状, 一般 Eu 异常, 有时有极弱的正和负异常, δEu=1.1~0.8	左高右低 L 型, 具明显的 Eu 异常, δEu 一般小于 0.6	右倾平滑状, δEu=0.43~0.54

组成老君山岩体的各期次岩石岩性单一, 均为二长花岗岩类, 岩浆演化以结构演化为主, 成分演化为辅, 出现有钾长石交代斑晶, 由下到上变化特征明显, 微量元素总体都具有富集大部分亲石元素的特征, 稀土元素分布曲线为右倾“海鸥”型, 具地壳重熔融交代作用特征。

7 结 论

(1) 根据岩体内部接触关系、岩石的矿物组成、结构构造, 将老君山岩体划分为 3 个侵入期次。第 1 期为含小斑细中粒黑云母二长花岗岩岩, 分布于老君山复式岩体内部, 呈不规则岩株产出; 第 2 期为中斑中粒黑云母二长花岗岩; 第 3 期为大斑中粗粒黑云母二长花岗岩, 分布于岩体外部, 呈不规则的钩状分布, 规模最大。岩体具有同心环状分布特点。

(2) 岩石地球化学特征显示, 老君山花岗岩为富钾铝质、过铝质碱质钙碱性岩系, 具 I 型花岗岩特征。组成老君山的 3 个期次从早到晚 SiO₂ 含量由低→高, MgO、CaO、Na₂O 由高→低, K₂O 由低→高, K/Na、A/NCK 值由小→大, 具明显的同源岩浆

演化特征。

(3) 第 2 期中斑中粒黑云母二长花岗岩和第 3 期大斑中粗粒黑云二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 (111±1)Ma 和 (108±1)Ma, 形成时代为早白垩世, 是中国东部晚中生代岩石圈拆沉伸展环境下大规模岩浆作用的产物。

参考文献(References):

[1] 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 中国钼矿床[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1991: 118-128, 403-408.
Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qunying, et al. Molybdenum Deposits in China[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1991: 118-128, 403-408(in Chinese with English abstract).

[2] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re -Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. Mineral Deposits, 1994, 13 (3): 221-230 (in Chinese with English abstract).

[3] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re -Os ages for molybdenum from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China [J]. Economic Geology,

- 1997, 92(7/8):827-835.
- [4] 张伟伟, 翟裕生, 邓军, 等. 华北古大陆南缘的金属成矿作用[J]. 地球学报, 2001, 22(2):129-134.
Zhang Zhengwei, Zhai Yusheng, Deng Jun, et al. Metallogenic process in the Southern margin of North China Palecontinent [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2):129-134(in Chinese).
- [5] 李永峰, 王春秋, 白凤军, 等. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 2004, 18(6):571-577.
Li Yongfeng, Wang Chunqiu, Bai Fengjun, et al. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in East Qinling and their geodynamic settings[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18 (6):571-578 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李永峰. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用[D]. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文, 2005:1-135.
Li Yongfeng. The Temporal-spatial Evolution of Mesozoic Granitoids in Xiong'ershan Area and Their Relationships to Molybdenite-gold Mineralization [D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2005:1-135 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 2005, 24(3):292-304.
Li Yongfeng, Mao Jinwen, Hu Huabin, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3):292-304(in Chinese with English abstract).
- [8] Mao Jinwen, Xie Guiqing, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(18):4607-4626.
- [9] 卢欣祥, 于在平, 冯有利, 等. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质, 2002, 21(2):168-178.
Lu Xinxiang, Yu Zaiping, Feng Youli, et al. Mineralization and tectonic setting of deep2hypabyssal granites in East Qinling Mountain [J]. Mineral Deposits, 2002, 20(2):168-178 (in Chinese with English abstract).
- [10] 徐兆文, 陆现彩, 杨荣勇, 等. 河南省栾川县上房斑岩钼矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 2000, 36(1):14-16.
Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Yang Rongyong, et al. Geochemistry and metallogensis of the Shangfang porphyry molybdenum deposit in Luanchuan, Henan [J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(1):14-16(in Chinese with English abstract).
- [11] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(7):1078-1088.
Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, et al. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, Western Henan Province [J]. Geoscience, 2006, 20(3):219-226(in Chinese with English abstract).
- [12] 孟芳, 叶会寿, 周珂, 等. 豫西老君山地区钼矿地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 2012, 31(3):480-492.
Meng Fang, Ye Huishou, Zhou Ke, et al. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Mo deposits in Laojunshan area western Henan [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3):480-492(in Chinese with English abstract).
- [13] 乔怀栋, 刘长命, 彭万夫. 从栾川老君山花岗岩的成因看其与成相小岩体的关系[J]. 河南地质, 1988, 4(1):10-11.
Qiao Huaidong, Liu Changming, Peng Wanfu. The relationship between the small intrusion of molybdenum and the Laojunshan granites in Luanchuan [J]. Henan Geology, 1988, 4(1):10-11.
- [14] 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京:地质出版社, 2002:1-348.
Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan. Isotope Geochronology of the Metamorphic Stratum in South Qinling[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002:1-348(in Chinese).
- [15] 符光宏. 河南省秦岭——大别造山带地质构造与成矿规律[M]. 郑州:河南科技出版社, 1994:1-300.
Fu Guanghong. The Geological Structure and Metallogensis of the Qinling-Dabie Orogenic Belt in Henan Province[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1994:1-300(in Chinese).
- [16] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京:科学出版社, 2001:1-855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing:Science Press, 2001:1-855(in Chinese with English abstract).
- [17] 河南省地矿局区域地质调查队. 河南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989:68-74.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. Regional Geology of Henan Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1989:98-74(in Chinese).
- [18] Holness MB. Spherulitic textures formed during crystallization of partially melted arkose [J]. Rum, Scotland, Geol.Mag., 2002, 139(6):651-663.
- [19] Foster M A. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. U. S. Geol. Surv. Proj. paper. 354-B. 11-48.
- [20] 丁孝石. 西藏中南部各类花岗岩中黑云母标型特征及其地质意义[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 1988, (1):33-50.
Ding Xiaoshi. Study of Typomorphic characteristics of Micas from granitoids in Central-Southern Xizang and their geological significance [J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences, 1988, (1):33-50.
- [21] 周作侠. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 1986, 2(1):59-70.
Zhou Zuoxia. The origin of intrusive mass in Fengshangdong, Hubei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1986, 2(1):59-70.
- [22] 邱家骧, 林景仔. 地球化学 [M]. 北京:地质出版社, 1991:205-206.
Qiu Jiexiang, Lin Jingzhan. Geochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991:205-206(in Chinese).
- [23] Rollinson H R. Using Geochemical Data; Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Group UK Ltd, New York, 1993, 352.
- [24] Le Maitre R.W. Igneous Rocks:A Classification and Glossary of Terms, 2nd[M]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2002, 236.
- [25] Sun S S, McDough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D (eds.). Magmatism in ocean Basins. Geological

- Society Publication, 1989, 42:313-345.
- [26] 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2006. Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, et al. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李昌年. 火成岩微量元素地球化学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992:1-187. Li Changnian. Petrology of Trace Element of Igneous[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:1-195 (in Chinese with English abstract).
- [28] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997:1-238. Zhao Zhenhua. The Principles of Microelement Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1997:1-238(in Chinese with English abstract).
- [29] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 地质出版社, 2004:181-296. Han Yinwen, Ma Zhendong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:181-296 (in Chinese).
- [30] 李曙光, Hart S R, 郑双根. 中国华北、华南陆块碰撞时代的 Sm-Nd 同位素年龄证据[J]. 中国科学(B 辑), 1989, 19(3):312-319. Li Shuguang, Hart S R, Zheng Shuanggen, et al. Timing of south China Blocks: The Sm-Nd isotopic age evidence. Science in China (Series B), 1989, 19(3):312-319(in Chinese).
- [31] Ames et al, Ames L, Tilton G R, et al. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons U-Pb zircon dating of coesite bearing eclogites[J]. Geology, 1993; 21:339-342.
- [32] 张国伟, 孟庆仁, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3):193-200. Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3):193-200.
- [33] 钟增球, 索书田, 张宏飞, 等. 桐柏—大别碰撞造山带的基本组成与结构[J]. 地球科学, 2001, 26 (6):560-567. Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Hongfei, et al. Major constituents and texture of the Tongbai-Dabie collisional orogenic belt [J]. Earth Science, 2001, 26 (6):560-567 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京:地震出版社, 1992:1-234. Chen Yanjin, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan[M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-234(in Chinese).
- [35] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):169-188. Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1) : 169-188(in Chinese with English abstract).
- [36] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25:956-983.
- [37] Mao Jenwen, Xie Guiqing, Pirajno F, et al. Late Jurassic - Cretaceous granitoids in the Eastern Qinling, Central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications[J]. Australia Journal of Earth Sciences, 2010, 57(1):51-58.
- [38] 向君峰, 赵海杰, 李永峰, 等. 华北地台南缘张士英岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2010, 26(3):871-887. Xiang Junfeng, Zhao Haijie, Li Yongfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Zhangshiying intrusive complex in the southern margin of the North China Craton and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3):871-887.
- [39] 韩以贵. 豫西地区构造、岩浆作用与金成矿的关系——同位素年代学的新证据[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2007. Han Yigui. Structural and Magmatic Evolution in Western Henan Province and Their Implications to Gold Mineralization: New Geochronological Evidence [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) 2007. (in Chinese with English abstract).
- [40] 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 等. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 地质论评, 2008, 54(5):699-711. Ye Huishou, Mao Jinwen, Xu Lingang, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in western Henan Province[J]. Geological Review, 2008, 54 (5):699-711 (in Chinese with English abstract).
- [41] 杨德彬, 许文良, 王冬艳, 等. 河南三门峡曲里石英闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 中国地质, 2004, 31 (4):379-383. Yang Debin, Xu Wenliang, Wang Dongyan, et al. SHRIMP zircon U-Pb Dating of the Quli quartz diorite porphyry, Sanmenxia City, Henan, and its geological significance[J]. Geology in China, 2004, 31(4):379-383(in Chinese with English abstract).
- [42] 郭波, 朱赖民, 李森, 等. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景 [J]. 岩石学报, 2009, 25(2):265-281. Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (2):265-281(in Chinese with English abstract).
- [43] 姚军明, 赵太平, 李晶, 等. 河南祈雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2009, 25(2):374-384. Yao Junming, Zhao Taiping, Li Jing, et al. Molybdenite Re-Os age and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2):374-384 (in Chinese with English abstract).
- [44] 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 等. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义 [J]. 地质论评, 2006, 52(1):122-131. Li Yongfeng, Mao Jinwen, Liu Dunyi, et al. SHRIMP zircon U-

- Pb and molybdenite Re–Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication [J]. *Geological Review*, 2006, 52 (1):122–131 (in Chinese with English abstract).
- [45] 张照伟, 李文渊, 赵东宏, 等. 东秦岭莲花沟岩体锆石 U–Pb 年代学研究及其地质意义 [J]. *地球科学*, 2010, 39(1):90–99.
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Zhao Donghong, et al. Zircon U–Pb Dating of Lianhuagou Pluton in East Qinling and its geological implications [J]. *Geochimica*, 2010, 39(1): 90–99 (in Chinese with English abstract).
- [46] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及成矿动力学背景 [J]. *地质学报*, 2008, 82(2):204–22.
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, et al. U–Pb (LA–ICP–MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenic geodynamical setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (2): 204–220 (in Chinese with English abstract).
- [47] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002:1–292.
- Xiao Qinhui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. *The Ways of Investigation on Granitoids* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:1–292 (in Chinese).
- [48] 李进文, 裴荣富, 张德全, 等. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *地球学报*, 2007, 28(1):11–22.
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Zhang Dequan, et al. Geochemical characteristics of the Yanshanian intermediate –acid intrusive rocks in the Tongling mineralization concentration area, Anhui Province, and their geological implications [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(1):11–22 (in Chinese with English abstract).

Zircon SHRIMP U–Pb dating and geochemistry of the Laojunshan Intrusion, western Henan Province

MENG Fang¹, MAO Jing–wen², YE Hui–shou², ZHOU Ke³, GAO Ya–long⁴, LI Yong–feng⁵

(1. Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Geological Society of China, Beijing 100037, China; 4. North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300170, China; 5. Henan Non–ferrous Mineral Exploration Engineering Research Center, Zhengzhou 450016, Henan, China)

Abstract: The Laojunshan Intrusion is situated in northern Qinling orogenic belt, which is located in southern Heigou–Luanchuan faulted zone in the Qinling orogenic belt. Based on the contact relationship, the evolution of the intrusion can be divided from early to late into three stages, i.e., small–porphyry fine–medium–grained biotite monzonitic granite, mid–porphyry medium–coarse grained biotite monzonitic granite and big–porphyry medium–coarse grained biotite monzonitic granite. They are characterized by concentric zoning. All the three stages of granites have similar mineralogical and geochemical characteristics. They are composed of potash feldspar, plagioclase, biotite and quartz, but there are obvious differences in the rock texture. They are characterized by high Si (>70%) and alkali (8.28–9.53 %) and low Ca (0.68%–2.42%) . They also have relatively high Ba, Sr, Nb, Zr, Th and Rb concentrations and comparatively low Co, Ni, Cr, V and Sc concentrations, belonging to I–type granite. The SHRIMP U–Pb zircon dating of the second and third stage rocks yielded ages of 111 ± 1 Ma (MSWD=0.41) and 108 ± 1 Ma (MSWD=0.39) respectively, suggesting Late Mesozoic. It is inferred that the Laojunshan Intrusion resulted from large–scale late Mesozoic magmatism in eastern China.

Key words: SHRIMP zircon U–Pb dating; geochemistry; Laojunshan intrusion; western Henan Province

About the first author: MENG Fang, female, born in 1982, doctor candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E–mail: mengfang0617@126.com.

About the corresponding author: YE Hui–shou, male, born in 1964, senior researcher, engages in the study of mineral deposits; E–mail: yehuishou@163.com.