

陈海东, 王子龙, 鲁宁, 等. 内蒙古中部和林—凉城一带石榴花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 81-90.  
Chen Haidong, Wang Zilong, Lu Ning, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age and their tectonic Significance of the garnet granites form Helin-Liangcheng zone of Central Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 81-90(in Chinese with English abstract).

# 内蒙古中部和林—凉城一带石榴花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造意义

陈海东<sup>1</sup> 王子龙<sup>2</sup> 鲁宁<sup>1</sup> 银海<sup>1</sup> 何国强<sup>1</sup>

(1. 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古呼和浩特市 010010; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:** 内蒙古中部和林—凉城一带分布着大量石榴花岗岩, 为强过铝(SP)花岗岩。通过对石榴花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 表明其形成年代在 1923~1958 Ma, 为古元古代。通过对其岩石地球化学特征的分析, 表明其花岗岩的源区成分为杂砂岩, 部分熔融温度较高, 且具有后碰撞阶段岩浆活动的特征。结合区域地质特征, 该石榴花岗岩应是古元古代早期发生碰撞的阴山微陆块与鄂尔多斯微陆块由汇聚向伸展过渡, 并伴随有玄武岩浆的底侵, 高温的玄武岩岩浆使地壳下部的杂砂岩在相对高温条件下(大于 875℃)发生部分熔融的产物。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; 石榴花岗岩; 强过铝花岗岩; 内蒙古和林—凉城

中图分类号: P597; P588.12<sup>1</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)01-0081-10

## Zircon LA-ICP-MS U-Pb age and tectonic significance of the garnet granites from Helin-Liangcheng zone of Central Inner Mongolia

CHEN Hai-dong<sup>1</sup>, WANG Zi-long<sup>2</sup>, LU Ning<sup>1</sup>, YIN Hai<sup>1</sup>, HE Guo-qiang<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Institute of Geological Survey and Mineral Exploration, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;  
2. Chengdu University of Technology, Cheng'du 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** Garnet granites in Helin-Liangcheng zone of central Inner Mongolia are strongly peraluminous granites. The age of garnet granites obtained by zircon LA-ICP-MS U-Pb method is 1923-1958 Ma, indicating Paleoproterozoic. The analyses of their geochemical characteristics indicate that the source area was made up of graywackes, and the partial melting temperature was relatively high, suggesting post collision stage magmatite activity characteristics. Considering the regional geological features, the garnet granites should be the product of partial melted graywackes which existed at the bottom of the earth's crust, heated by the basaltic magma with high temperature under the relatively high temperature conditions (above 875℃). The melting happened when Yinshan block and Erduosi block collided in the early Paleoproterozoic and turned from convergence to extension, accompanied by the underplating of basaltic magma.

**Key words:** U-Pb zircon age; garnet granite; strongly peraluminous granites; Helin-Liangcheng area of central Inner Mongolia

收稿日期: 2015-05-13; 改回日期: 2015-06-10

基金项目: 中国地质调查局 1:25 万呼和浩特市幅区域地质调查修测项目(1212011120751)资助。

作者简介: 陈海东, 男, 1987 年生, 地质矿产工程师, 从事区域地质调查工作, E-mail: 346089923@qq.com。

**About the first author:** CHEN Hai-dong, male, born in 1987, engineer, engages in regional geological survey; E-mail: 346089923@qq.com.

**Fund Support:** Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011120751).

在华北克拉通北缘中段内蒙古中部的和林—凉城一带发育大量早前寒武纪变质结晶基底岩系。在凉城北部一带的早前寒武纪变质深成岩中获得了不少同位素数据,并对其地质特征、形成时代、成因、构造属性和时空分布进行了大量的研究报告<sup>[1-7]</sup>,而对和林—凉城一带的石榴花岗岩报道较少,目前仅见少数关于该地区石榴花岗岩形成时代、成因方面的报道<sup>[8]</sup>。本文在呼和浩特市幅1:25万区域地质调查的基础上,通过对和林—凉城一带分布的石榴花岗岩地质特征的研究和锆石U-Pb年龄、主量元素及微量元素的分析,探讨石榴花岗岩的形成时代、成因和物质来源及构造属性,为该地区古元古代的构造背景提供新的参考依据。

## 1 地质背景和岩石学特征

研究区主要由高级变质孔兹岩系和变质深成侵入体组成。孔兹岩系主要岩石组合为矽线石榴片麻岩、石榴变粒岩夹石榴长石石英岩等。变质深成侵入体有石榴花岗岩和少部分紫苏(二辉)斜长麻粒岩。石榴花岗岩为本文研究的主要对象,在研究区呈北东向展布。石榴花岗岩的岩性较为杂多,主要有弱片麻状(变斑状)石榴石英闪长岩、弱片麻状(变斑状)石榴英云闪长岩、弱片麻状(变斑状)石榴花岗闪长岩、弱片麻状(变斑状)石榴二长花岗岩和弱片麻状(变斑状)石榴正长花岗岩,各岩性野外肉眼较难区分,之间呈过渡渐变接触。石榴花岗岩体中多见孔兹岩系的包体,与孔兹岩系呈侵入接触,局部为渐变过渡接触。在研究区南部石榴花岗岩被寒武纪地层角度不整合覆盖。紫苏斜长(二辉)麻粒岩呈零星分布的小岩株产于石榴花岗岩和变质孔兹岩系中,与石榴花岗岩和孔兹岩系呈侵入接触(图1、图2)。

石榴花岗岩具鳞片粒状变晶结构,(似斑状变晶结构),弱片麻状-块状构造。变斑晶(钾长石)0~5%(手标本中呈10~35mm半自形晶),斜长石0~55%,反条纹长石0~5%,钾长石(条纹长石)0~50%,

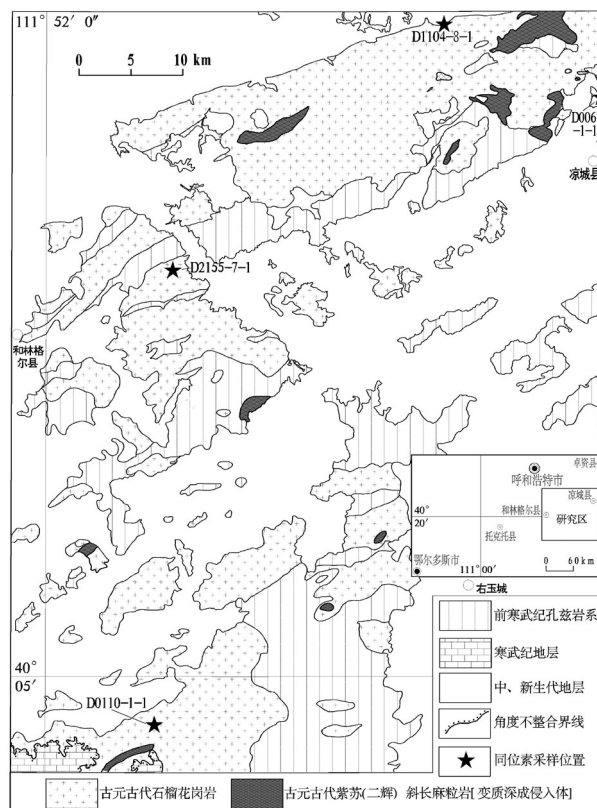


图1 内蒙古和林—凉城一带前寒武纪地质体分布简图  
Fig.1 Distribution of Pre-Cambrian geological bodies in Helin-Liangcheng zone, Inner Mongolia

石英5%~25%,石榴石1%~15%,黑云母1%~5%,(紫苏辉石0~15%,矽线石0~2%),铁矿少量,磷灰石少量。斜长石0.5~5 mm粒状变晶,发育聚片双晶,部分为反条纹长石;钾长石呈0.5~5 mm粒状变晶,发育显微条纹构造,比较干净;石英0.5~5 mm粒状变晶;石榴石0.5~7 mm粒状变晶,黑云母0.5~1 mm片状,浅黄—深棕褐色;紫苏辉石0.5~3 mm柱粒状变晶,淡绿或绿—淡粉或棕粉色;矽线石0.2~0.5 mm柱状变晶。

## 2 岩石地球化学特征

内蒙古中部和林—凉城一带的石榴花岗岩主量元素、稀土元素和微量元素分析数据列于表1。本区的石榴花岗岩岩石化学成分变化较大:SiO<sub>2</sub>在

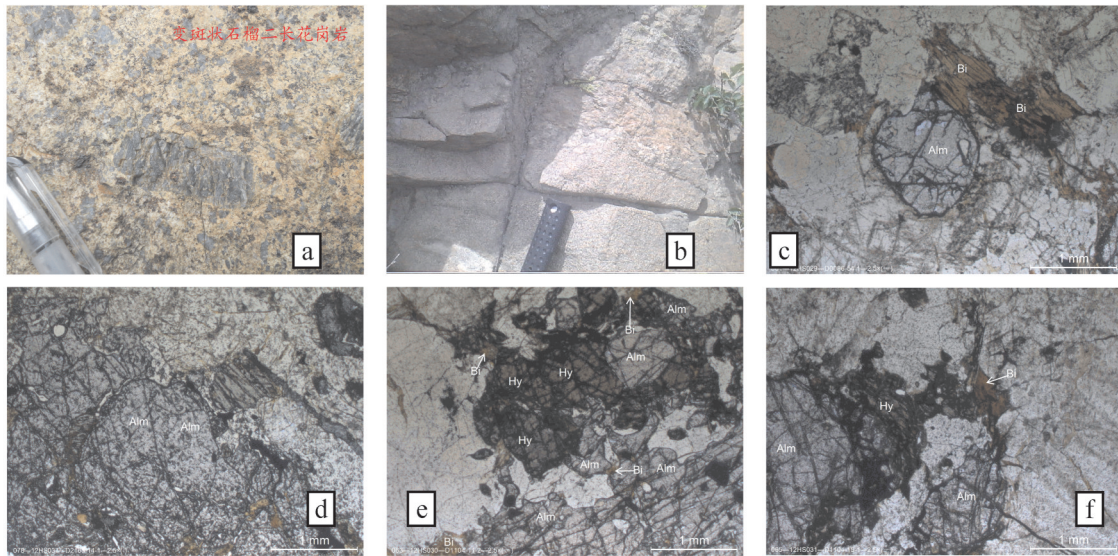


图2 样品宏观照片和镜下显微照片

a—变斑状石榴花岗岩; b—紫苏斜长麻粒岩底侵石榴花岗岩(下部为紫苏斜长麻粒岩,上部为石榴花岗岩); c, d, e, f—石榴花岗岩,正交偏光。  
Alm—石榴子石; Hy—紫苏辉石; Bi—黑云母

Fig.2 photomicrographs and micrographs of samples

a—Porphyroblastic garnet granite; b—Garnet granite intruded by hypersthene plagioclase granulite (lower: hypersthene plagioclase granulite; upper: garnet granite); c, d, e, f—Garnet granite, crossed nicols; Alm—Garnet, Hy—Hypersthene; Bi—Biotite

59.23%~71.98%;  $Al_2O_3$  含量在 14.35%~17.90%, 高铝;  $TiO_2$  含量 0.44%~1.31%; 偏碱性 ( $Na_2O+K_2O$  为 3.66%~7.14%, 平均值为 6.21%); A/CNK 值几乎全部大于 1.1 (仅样品 D1104-8-1 为 1.01), 刚玉 (C) 标准分子含量在 1.39%~5.40%, 均大于 1%, 结合其岩石学和地球化学特征, 表明该区石榴花岗岩属于典型的强过铝 (SP) 花岗岩<sup>[9]</sup>。在  $SiO_2-K_2O$  图解 (图略) 中样品主要落入高钾钙碱性系列范围。具有中等的稀土总量 ( $\Sigma REE=151.09 \times 10^{-6} \sim 438.41 \times 10^{-6}$ ), 轻重稀土分馏较明显 ( $LREE/HREE=5.86 \sim 21.11$ ,  $(La/Yb)_N$  为 6.11~33.64), 轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损, 稀土分配曲线 (图 3) 表现为整体右倾, 具负铈异常,  $\delta Eu$  主要集中在 0.47~0.68, 平均为 0.63。La/Nb 值为 1.53~6.94, 远远大于 1.0, 区别于地幔来源的岩浆<sup>[10]</sup>, 表明该区的石榴花岗岩可能均来源于陆壳。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 显示高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 相对亏损, 而大离子亲石元素 Rb、Ba、U、Zr、Hf 相对富集 (图 4), 反映该区石榴花岗岩源岩为大陆壳性质<sup>[11]</sup>。

主量元素和微量元素由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 稀土元素由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。

### 3 同位素年代学

#### 3.1 样品处理

在河北省廊坊区调所实验室采用常规方法进行粉碎至 80~100 目, 并用浮选和电磁选方法分选, 再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒。将样品锆石置于环氧树脂中, 待固结后抛磨至锆石粒径的大约二分之一, 使锆石内部充分暴露, 最后进行锆石阴极发光 (CL) 显微照相。在天津地质矿产研究所实验室进行 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选, 再与 CL 照片反复对比, 力求避开内部裂隙和包裹体, 以获得较准确的年龄信息。分析使用的激光仪器为 Thermo Finnigan Neptune 型及与之配套的 UP193-FX ArF 准分子激光器, 激光斑束直径 35  $\mu m$ , 频率 10 Hz, 以 He 为载气。样品处理、详细流程及数据处理见侯可军等<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 测试结果

样品 D0067-1-1 取自坐标 112°29'51"E, 40°35'05"N, 岩性为变斑状石榴花岗岩闪长岩, 样品 D1104-8-1 取自坐标 112°19'09"E, 40°38'54"N, 岩性为变斑状含黑云紫苏石英闪长岩, 样品 D0110-1-1 取自坐



表 1 和林-凉城地区石榴花岗岩主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 1 Whole rock analyses of major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) of garnet granite in Helin-Liangcheng area

样号	D1104 -8-1 变斑状 含黑云 紫苏石 英长 岩	D1104 -15-1 变斑状 紫苏石 石榴花 岗长岩	D0086 -54-1 含黑云 石榴英 云闪长 岩	D0067 -1-1 变斑状 石榴花 岗长岩	D1104 -19-1 变斑状 黑云石 榴花 岗长岩	D0088 -1-1 石榴黑 云二长 花岗岩	D0031 -1-1 变斑状 含石榴 黑云石 母二长 花岗岩	D0088 -16-1 石榴黑 云二长 花岗岩	D0110 -1-1 石榴二 长花 岗岩	D1062 -1-1 含石榴 黑云二 长花 岗岩	D2165 -5-1 含砂线 石榴石 二长 花岗岩	D0039 -2-2 变斑状 正长花 岗岩	D2155 -7-1 变斑状 含紫苏 黑云石 榴正长 花岗岩	D049 -26-1 变斑状 含黑云 石榴英 云闪长 岩
SiO <sub>2</sub>	59.23	64.05	71.98	66.28	63.27	66.40	62.85	64.10	68.12	60.32	69.02	61.29	66.45	62.89
TiO <sub>2</sub>	1.31	1.01	0.44	0.96	1.22	0.97	1.12	1.03	0.90	1.19	0.46	1.21	0.96	1.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.99	16.28	14.35	16.54	17.33	17.22	17.17	16.43	15.02	17.60	16.17	17.90	15.58	16.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.91	1.46	0.29	1.80	1.53	0.47	1.41	0.81	1.10	1.58	0.46	1.23	1.39	0.80
FeO	5.39	4.10	2.47	2.68	3.57	2.80	4.48	5.22	4.38	5.41	3.59	5.03	3.52	7.47
MnO	0.08	0.06	0.04	0.05	0.04	0.03	0.06	0.06	0.06	0.09	0.04	0.07	0.05	0.12
MgO	2.31	1.76	0.93	1.68	2.18	1.77	1.80	2.36	0.90	2.24	1.09	2.10	1.63	2.47
CaO	4.03	2.96	1.82	2.63	3.19	3.27	2.81	2.63	3.14	3.76	1.82	3.26	2.47	3.55
Na <sub>2</sub> O	3.06	2.73	2.62	2.97	3.27	4.02	2.73	2.48	2.57	2.90	2.45	3.03	2.57	2.26
K <sub>2</sub> O	4.09	3.73	4.37	3.39	2.91	1.97	4.39	3.50	2.66	3.65	3.58	3.59	4.14	1.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.50	0.10	0.08	0.09	0.09	0.07	0.17	0.09	0.22	0.28	0.08	0.20	0.17	0.22
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.54	0.86	0.36	0.48	0.88	0.54	0.41	0.65	0.38	0.36	0.84	0.51	0.51	0.59
烧失量	0.85	1.55	0.55	0.75	1.22	0.92	0.78	1.12	0.76	0.77	1.10	0.91	0.87	1.03
A/CNK	1.01	1.17	1.16	1.24	1.21	1.17	1.20	1.30	1.17	1.13	1.44	1.21	1.18	1.42
刚玉(C)	1.39	2.60	2.20	3.43	3.21	2.69	3.21	4.00	2.75	2.73	5.14	3.59	2.80	5.40
La	56.29	50.48	35.36	68.02	53.42	84.89	32.60	80.07	63.02	95.87	33.42	82.99	63.60	37.75
Ce	96.10	86.70	67.40	125.33	95.40	174.40	67.03	169.91	118.09	180.81	60.43	154.27	116.57	76.75
Pr	11.49	9.70	8.21	14.76	10.59	20.23	6.09	20.47	14.40	21.24	6.86	18.39	13.53	10.86
Nd	45.34	35.10	30.58	56.21	37.81	78.20	22.68	82.85	58.54	83.74	26.37	69.72	52.57	49.30
Sm	9.25	7.17	7.05	9.99	7.92	14.22	5.58	14.66	12.26	15.63	5.88	14.42	10.32	13.01
Eu	2.69	2.21	0.95	1.79	1.65	1.01	1.62	1.55	1.85	2.22	1.44	2.14	1.96	1.97
Gd	6.41	6.44	4.86	6.80	6.52	8.39	4.79	9.19	9.75	11.23	5.07	9.65	7.49	9.77
Tb	0.73	1.01	0.67	0.87	0.87	0.84	0.71	1.07	1.56	1.57	0.87	1.14	0.96	1.50
Dy	3.18	5.78	3.46	4.45	4.20	3.55	4.02	5.18	10.14	8.98	5.23	5.07	4.66	8.66
Ho	0.59	1.18	0.68	0.89	0.82	0.67	0.81	1.08	2.32	1.99	1.07	0.91	0.87	1.78
Er	1.57	3.17	1.88	2.47	2.28	1.84	2.23	3.17	6.84	6.09	2.96	2.41	2.35	4.85
Tm	0.24	0.47	0.30	0.38	0.36	0.28	0.35	0.53	1.07	1.05	0.46	0.36	0.35	0.73
Yb	1.57	2.76	1.89	2.40	2.32	1.81	2.25	3.48	6.65	6.95	2.85	2.25	2.18	4.43
Lu	0.26	0.40	0.29	0.36	0.37	0.27	0.35	0.54	1.01	1.04	0.44	0.34	0.33	0.66
Y	15.00	30.56	18.22	23.03	21.31	18.28	21.89	27.26	58.88	50.90	28.67	23.77	22.58	45.50
ΣREE	235.71	212.57	163.57	294.72	224.51	390.62	151.09	393.76	307.50	438.41	153.35	364.08	277.77	222.02
LREE/HREE	15.20	9.02	10.66	14.83	11.66	21.11	8.75	15.24	6.82	10.27	7.09	15.45	13.46	5.86
(La/Yb) <sub>N</sub>	25.69	13.13	13.45	20.34	16.51	33.64	10.40	16.50	6.80	9.90	8.40	26.51	20.89	6.11
δEu	1.01	0.97	0.47	0.63	0.68	0.26	0.94	0.38	0.50	0.49	0.79	0.52	0.65	0.51
Rb	107.70	77.55	166.10	112.90	77.41	83.49	130.70	90.50	63.94	97.72	106.60	160.70	139.60	33.11
Ba	1499.00	1395.00	475.50	1038.00	986.40	527.50	1584.00	790.10	1069.00	1153.00	895.60	1263.00	1225.00	651.30
Th	1.67	3.20	7.15	12.87	12.25	19.15	10.01	29.48	10.44	9.37	6.94	13.91	19.91	0.64
U	29.44	14.16	8.96	15.72	18.69	12.23	21.32	14.16	16.10	20.89	6.26	26.23	18.66	15.33
Ta	1.52	0.60	0.65	0.70	0.71	0.48	0.91	0.45	0.94	0.82	0.43	0.94	0.72	0.69
Nb	29.44	14.16	8.96	15.72	18.69	12.23	21.32	14.16	16.10	20.89	6.26	26.23	18.66	15.33
Sr	351.79	265.34	113.81	208.62	221.92	296.88	267.43	201.12	212.99	272.56	205.11	257.36	209.67	186.68
Zr	441.30	322.20	178.50	326.20	419.60	196.70	283.50	472.90	418.60	443.20	249.20	370.70	364.30	156.40
Hf	12.31	8.62	4.96	8.51	11.56	4.83	7.72	12.73	11.16	11.72	6.82	9.73	9.29	3.95

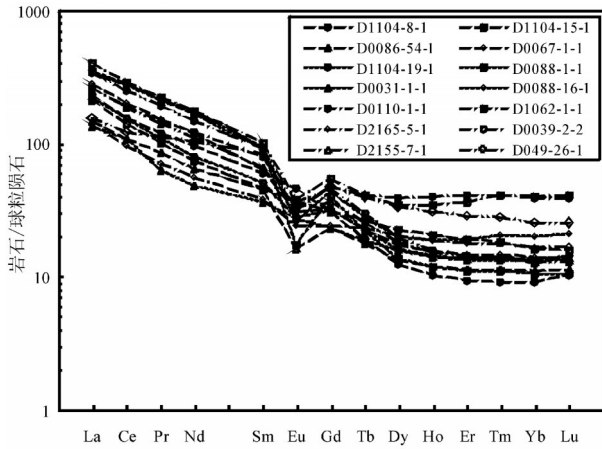


图3 球粒陨石标准化稀土分配模式(球粒陨石数据值据 \*Sun & McDonough, 1989)  
Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns (chondrite normalized values after Sun & McDonough, 1989)

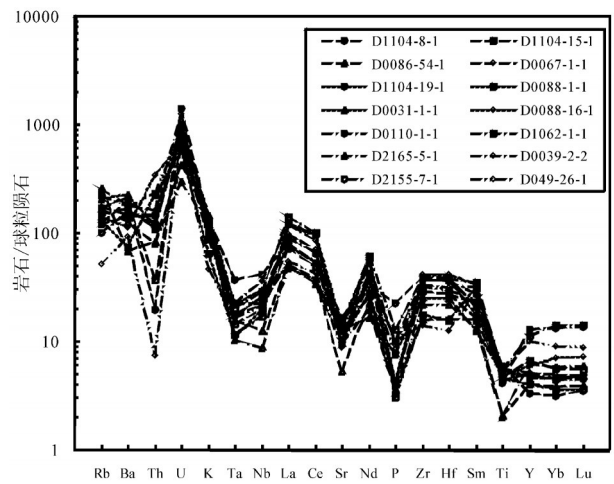


图4 原始地幔标准化蛛网图(原始地幔数据值据 \*Sun & McDonough, 1989)  
Fig.4 Primitive mantle normalized spider diagram (primitive mantle data after Sun & McDonough, 1989)

标 111°59'23"E, 40°02'28"N, 岩性为石榴二长花岗岩, 样品 D2155-7-1 取自坐标 112°00'38"E, 40°26'09"N, 岩性为变斑状含紫苏含黑云石榴正长花岗岩。其锆石呈粉色、浅玫瑰色, 透明-半透明, 次浑圆柱粒状、短柱状为主, 个别为半自形柱状, 晶棱晶面均已钝化, 大部分分辨不清。在 CL 图像上(图 5), 锆石内部大部分显示均匀灰色, 少部分锆石内部结构复杂, 具有环带发育的核, 本次分析点位基本都来自核部, 而核部的 CL 结构较为一致, 多为宽缓的环带或者没有明显的环带, 且年龄一致, 显示岩浆结晶锆石的特点<sup>[13]</sup>。样品锆石 U-Th-Pb 测试结果(表 2)显示: 除少数点有铅丢失外, 大部分分析

结果都在谐和线上或谐和线附近。样品 D0067-1-1 在谐和线上或谐和线附近的 25 个分析点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 加权平均年龄为 (1940.5±9.4) Ma, MSWD=0.29。样品 D1104-8-1 在谐和线上 22 个点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 加权平均年龄为 (1923.7±8.1) Ma, MSWD=1.16。样品 D0110-1-1 在谐和线上或谐和线附近 21 个点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 加权平均年龄为 (1932.4±6.7) Ma, MSWD=0.77。样品 D2155-7-1 在谐和线上或谐和线附近 24 个点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 加权平均年龄为 (1958.6±8.9) Ma, MSWD=1.13(图 6)。这些年龄代表了石榴花岗岩形成的年龄。

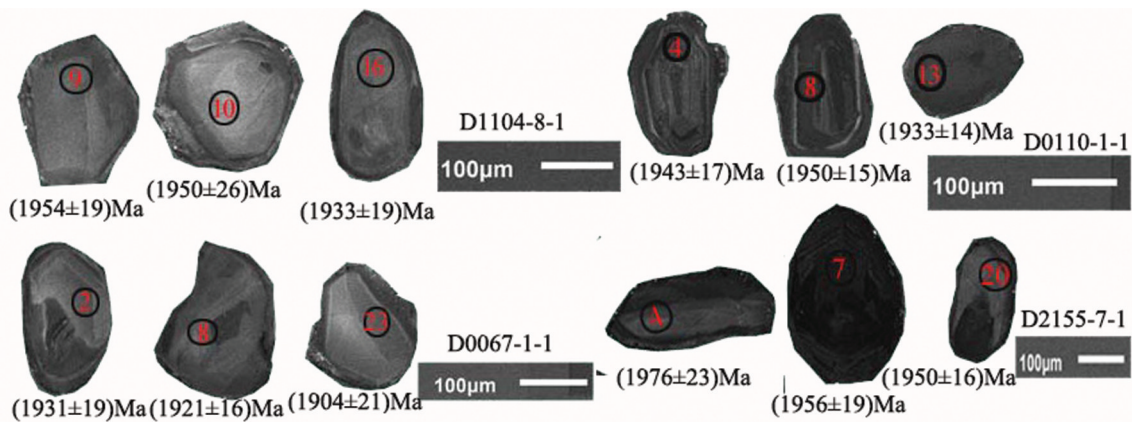


图5 和林—凉城地区石榴花岗岩的锆石阴极发光图像  
Fig.5 Cathodoluminescence images of representative zircon of garnet granite in Helin-Liangcheng area

表2 和林-凉城地区石榴花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb分析结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of granite in Helin-Liangcheng area

测点号	Pb U		同位素比值								表面年龄/Ma					
	含量/ $10^{-6}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
D0067-1-1 弱片麻状变斑状石榴花岗岩内长岩																
1	27	54	0.3500	0.0059	5.760	0.0893	0.1191	0.0015	0.0800	0.0003	1939	33	1941	30	1943	23
2	26	49	0.3500	0.0057	5.730	0.0868	0.1179	0.0014	0.0800	0.0002	1948	31	1936	29	1924	21
3	26	53	0.3500	0.0042	5.730	0.0800	0.1182	0.0015	0.0900	0.0002	1943	23	1936	27	1930	23
4	21	38	0.3500	0.0042	5.620	0.0970	0.1171	0.0019	0.0900	0.0002	1926	23	1920	33	1913	29
5	36	90	0.3400	0.0053	5.600	0.0665	0.1184	0.0011	0.0900	0.0004	1901	30	1916	23	1933	16
6	28	59	0.3500	0.0042	5.790	0.0714	0.1198	0.0013	0.0900	0.0002	1938	23	1946	24	1954	20
7	27	49	0.3500	0.0048	5.740	0.0790	0.1188	0.0014	0.0900	0.0001	1938	26	1938	27	1938	21
8	21	39	0.3500	0.0040	5.720	0.1061	0.1181	0.0021	0.0900	0.0002	1940	22	1934	36	1928	32
9	31	70	0.3500	0.0039	5.820	0.0689	0.1199	0.0013	0.0900	0.0002	1945	22	1950	23	1954	19
10	24	43	0.3500	0.0047	5.840	0.0924	0.1196	0.0017	0.0900	0.0002	1956	26	1953	31	1950	26
11	30	53	0.3500	0.0042	5.770	0.0709	0.1179	0.0013	0.0900	0.0002	1957	23	1941	24	1925	20
12	33	75	0.3500	0.0039	5.790	0.0596	0.1190	0.0011	0.0900	0.0003	1947	22	1944	20	1942	17
13	23	41	0.3600	0.0038	5.870	0.0857	0.1196	0.0016	0.0900	0.0002	1962	21	1956	29	1951	24
14	24	44	0.3500	0.0038	5.850	0.0854	0.1197	0.0016	0.0900	0.0002	1956	21	1954	29	1951	24
15	27	49	0.3500	0.0035	5.780	0.0785	0.1186	0.0015	0.0900	0.0001	1949	19	1943	26	1936	22
16	35	82	0.3600	0.0041	5.820	0.0705	0.1184	0.0012	0.0900	0.0003	1964	22	1949	24	1933	19
17	20	35	0.3600	0.0041	5.820	0.1839	0.1185	0.0037	0.0900	0.0004	1964	23	1949	62	1934	56
18	23	41	0.3600	0.0041	5.890	0.0954	0.1200	0.0018	0.0900	0.0002	1963	23	1960	32	1956	27
19	23	44	0.3500	0.0050	5.830	0.0887	0.1213	0.0017	0.0900	0.0002	1927	28	1950	30	1975	25
20	22	39	0.3600	0.0041	5.850	0.1095	0.1188	0.0021	0.0900	0.0002	1969	23	1954	37	1939	31
21	24	43	0.3600	0.0041	5.880	0.0961	0.1192	0.0018	0.0900	0.0002	1972	22	1958	32	1944	28
22	22	39	0.3600	0.0044	5.840	0.1276	0.1192	0.0025	0.0900	0.0002	1962	24	1953	43	1944	37
23	18	33	0.3600	0.0039	5.850	0.1311	0.1185	0.0025	0.0900	0.0003	1972	22	1954	44	1934	37
24	17	32	0.3600	0.0046	5.840	0.1760	0.1189	0.0034	0.0900	0.0004	1963	25	1952	59	1940	52
25	19	34	0.3500	0.0042	5.810	0.1118	0.1196	0.0022	0.0900	0.0003	1947	23	1948	37	1950	33
D1104-8-1 弱片麻状变斑状含黑云紫苏石英内长岩																
1	29	69	0.3518	0.0064	5.674	0.0855	0.117	0.0014	0.0884	0.0003	1943	35	1927	29	1911	22
2	51	123	0.3517	0.0043	5.736	0.0659	0.1183	0.0012	0.0889	0.0003	1943	24	1937	22	1931	19
3	22	55	0.3514	0.0063	5.754	0.0865	0.1188	0.0015	0.0907	0.0004	1941	35	1940	29	1938	23
4	47	113	0.3521	0.0055	5.738	0.0646	0.1182	0.0010	0.0891	0.0004	1944	30	1937	22	1929	15
5	27	67	0.3454	0.0049	5.708	0.0765	0.1199	0.0014	0.0885	0.0005	1912	27	1933	26	1954	21
6	74	207	0.3456	0.0054	5.560	0.0590	0.1167	0.0009	0.0901	0.0005	1914	30	1910	20	1906	14
7	34	82	0.3548	0.0054	5.704	0.0746	0.1166	0.0012	0.0932	0.0003	1958	30	1932	25	1905	18
8	66	144	0.3536	0.0049	5.737	0.0638	0.1177	0.0011	0.0898	0.0003	1952	27	1937	22	1921	16
9	17	41	0.3521	0.0052	5.716	0.0997	0.1177	0.0018	0.0914	0.0005	1945	29	1934	34	1922	28
10	86	235	0.3509	0.0040	5.737	0.0567	0.1186	0.0010	0.0919	0.0003	1939	22	1937	19	1935	15
11	76	208	0.3468	0.0050	5.594	0.0602	0.117	0.0009	0.0932	0.0005	1919	28	1915	21	1911	14
12	115	639	0.1633	0.0017	2.545	0.0247	0.113	0.0009	0.0538	0.0003	975	10	1285	12	1849	15
13	50	123	0.3504	0.0041	5.743	0.0565	0.1189	0.0010	0.0942	0.0002	1936	22	1938	19	1939	15
14	123	435	0.2836	0.0038	4.535	0.0591	0.116	0.0008	0.0867	0.0010	1609	22	1737	23	1895	13
15	40	100	0.3536	0.0032	5.825	0.0528	0.1195	0.0010	0.0976	0.0004	1952	18	1950	18	1948	15
16	33	83	0.3623	0.0051	5.873	0.0651	0.1175	0.0010	0.0977	0.0003	1993	28	1957	22	1919	16
17	61	157	0.3570	0.0032	5.714	0.0516	0.1161	0.0009	0.0983	0.0004	1968	18	1933	17	1897	13
18	25	62	0.3488	0.0038	5.700	0.0709	0.1185	0.0013	0.0957	0.0004	1929	21	1931	24	1934	20
19	49	127	0.3565	0.0049	5.703	0.0614	0.116	0.0009	0.0987	0.0008	1966	27	1932	21	1896	15
20	20	49	0.3515	0.0033	5.716	0.0818	0.1179	0.0016	0.0871	0.0005	1942	18	1934	28	1925	24
21	175	984	0.1824	0.0025	2.691	0.0292	0.107	0.0008	0.0949	0.0019	1080	15	1326	14	1749	14
22	43	113	0.3638	0.0028	5.981	0.0593	0.1192	0.0011	0.0905	0.0004	2000	16	1973	20	1945	16
23	27	67	0.3462	0.0040	5.563	0.0740	0.1165	0.0013	0.0824	0.0003	1917	22	1910	25	1904	21
24	30	72	0.3533	0.0043	5.820	0.0714	0.1195	0.0013	0.0838	0.0003	1950	24	1949	24	1948	19
25	69	181	0.3524	0.0036	5.770	0.0602	0.1188	0.0011	0.0835	0.0002	1946	20	1942	20	1938	16
D0110-1-1 弱片麻状石榴二长花岗岩																
1	67	177	0.3234	0.0033	5.217	0.0639	0.117	0.0016	0.0923	0.0002	1806	18	1855	23	1911	24
2	106	301	0.3491	0.0049	5.660	0.0872	0.1176	0.0013	0.0819	0.0007	1930	27	1925	30	1920	21
3	104	283	0.3391	0.0049	5.473	0.0612	0.1171	0.0012	0.0933	0.0002	1882	27	1896	21	1912	18

续表2

测点号	Pb U		同位素比值								表面年龄/Ma					
	含量/ $10^{-6}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
4	83	241	0.3288	0.0050	5.400	0.0871	0.1191	0.0011	0.0885	0.0008	1833	28	1885	30	1943	17
5	121	344	0.3555	0.0054	5.820	0.0553	0.1187	0.0010	0.0880	0.0016	1961	30	1949	19	1937	16
6	127	358	0.3413	0.0054	5.570	0.0681	0.1183	0.0010	0.1090	0.0005	1893	30	1911	23	1931	16
7	90	238	0.3578	0.0053	5.845	0.0630	0.1185	0.0010	0.0926	0.0003	1972	29	1953	21	1933	15
8	73	207	0.3520	0.0043	5.805	0.0569	0.1196	0.0010	0.0859	0.0015	1944	24	1947	19	1950	15
9	85	227	0.3528	0.0066	5.767	0.0762	0.1186	0.0011	0.1084	0.0008	1948	37	1942	26	1935	17
10	71	172	0.3563	0.0057	5.811	0.0645	0.1183	0.0011	0.0924	0.0001	1965	32	1948	22	1931	16
11	95	265	0.3376	0.0064	5.532	0.0673	0.1189	0.0010	0.0849	0.0008	1875	36	1906	23	1939	15
12	139	425	0.3311	0.0032	5.351	0.0473	0.1172	0.0010	0.1008	0.0011	1844	18	1877	17	1914	15
13	86	220	0.3550	0.0043	5.797	0.0533	0.1184	0.0009	0.0953	0.0002	1958	24	1946	18	1933	14
14	81	208	0.3520	0.0030	5.712	0.0447	0.1177	0.0009	0.0956	0.0003	1944	17	1933	15	1921	14
15	70	175	0.3566	0.0032	5.778	0.0468	0.1175	0.0009	0.0965	0.0003	1966	18	1943	16	1919	14
16	98	260	0.3460	0.0034	5.707	0.0523	0.1196	0.0011	0.0745	0.0036	1915	19	1932	18	1951	16
17	104	288	0.3565	0.0047	5.838	0.0506	0.1188	0.0008	0.0940	0.0006	1965	26	1952	17	1938	12
18	67	146	0.3675	0.0040	6.821	0.0584	0.1346	0.0011	0.1156	0.0004	2018	22	2088	18	2159	14
19	42	96	0.3588	0.0035	5.907	0.0532	0.1194	0.0011	0.0977	0.0002	1976	19	1962	18	1947	16
20	103	270	0.3574	0.0036	6.032	0.0491	0.1224	0.0010	0.1034	0.0007	1970	20	1980	16	1991	15
21	65	157	0.3602	0.0037	5.907	0.0592	0.1189	0.0011	0.1014	0.0003	1983	20	1962	20	1940	17
22	78	196	0.3595	0.0033	5.958	0.0586	0.1202	0.0012	0.1008	0.0006	1980	18	1970	19	1959	17
24	77	191	0.3522	0.0041	5.662	0.0545	0.1166	0.0011	0.1017	0.0002	1945	23	1926	19	1905	16
25	33	71	0.3659	0.0038	6.455	0.1072	0.128	0.0019	0.1036	0.0006	2010	21	2040	34	2070	26
D2155-7-1 弱片麻状变斑状含紫苏含黑云石榴正长花岗岩																
1	49	127	0.3540	0.0033	5.808	0.0768	0.119	0.0015	0.1354	0.0011	1954	18	1948	26	1941	23
2	90	249	0.3513	0.0035	5.811	0.0600	0.12	0.0011	0.1347	0.0007	1941	19	1948	20	1956	17
3	106	282	0.3541	0.0036	5.837	0.0600	0.1196	0.0011	0.0900	0.0010	1954	20	1952	20	1950	17
4	35	81	0.3628	0.0048	6.068	0.0815	0.1213	0.0016	0.1364	0.0005	1995	26	1986	27	1976	23
5	54	152	0.3304	0.0031	5.538	0.0587	0.1215	0.0012	0.1441	0.0008	1841	17	1907	20	1979	18
6	116	319	0.3644	0.0037	6.110	0.0601	0.1216	0.0010	0.1777	0.0026	2003	20	1992	20	1980	15
7	75	205	0.3605	0.0047	5.964	0.0770	0.12	0.0013	0.2176	0.0021	1984	26	1971	25	1956	19
8	67	184	0.3599	0.0059	6.050	0.0743	0.1219	0.0014	0.0824	0.0017	1982	32	1983	24	1984	20
9	34	77	0.3601	0.0032	5.905	0.0819	0.1189	0.0016	0.1233	0.0004	1983	18	1962	27	1940	23
10	73	200	0.3616	0.0036	5.931	0.0693	0.1189	0.0012	0.1209	0.0013	1990	20	1966	23	1940	19
11	41	105	0.3549	0.0025	5.801	0.0713	0.1185	0.0014	0.1229	0.0006	1958	14	1947	24	1934	21
12	60	155	0.3568	0.0025	5.905	0.0600	0.12	0.0011	0.1262	0.0011	1967	14	1962	20	1956	17
13	32	82	0.3525	0.0031	5.833	0.0738	0.12	0.0015	0.1203	0.0006	1947	17	1951	25	1956	22
14	65	176	0.3479	0.0037	5.692	0.0617	0.1187	0.0011	0.1167	0.0005	1925	21	1930	21	1936	17
15	42	102	0.3608	0.0067	6.075	0.0900	0.1221	0.0015	0.1265	0.0005	1986	37	1987	29	1987	21
16	152	422	0.3582	0.0042	5.836	0.0731	0.1181	0.0013	0.0793	0.0008	1974	23	1952	24	1928	19
17	66	180	0.3578	0.0030	6.040	0.0715	0.1224	0.0014	0.1004	0.0022	1972	16	1982	23	1992	20
18	140	403	0.3519	0.0048	5.724	0.0675	0.118	0.0012	0.1753	0.0026	1943	27	1935	23	1926	18
19	174	664	0.2610	0.0049	4.008	0.0556	0.1114	0.0012	0.1804	0.0036	1495	28	1636	23	1822	20
20	127	363	0.3525	0.0058	5.812	0.0722	0.1196	0.0011	0.1749	0.0027	1947	32	1948	24	1950	16
21	106	287	0.3624	0.0054	6.039	0.0679	0.1209	0.0010	0.1655	0.0014	1993	30	1981	22	1969	15
22	33	85	0.3447	0.0035	5.727	0.0855	0.1205	0.0014	0.1301	0.0008	1909	20	1935	29	1964	20
23	37	91	0.3518	0.0047	5.730	0.0776	0.1181	0.0014	0.1239	0.0004	1943	26	1936	26	1928	21
24	84	229	0.3572	0.0054	6.040	0.0968	0.1226	0.0013	0.0181	0.0012	1969	30	1982	32	1995	19
25	102	279	0.3626	0.0039	6.073	0.0771	0.1215	0.0014	0.2182	0.0023	1994	21	1986	25	1978	20

注:表中所列误差均为1 $\sigma$ 误差。



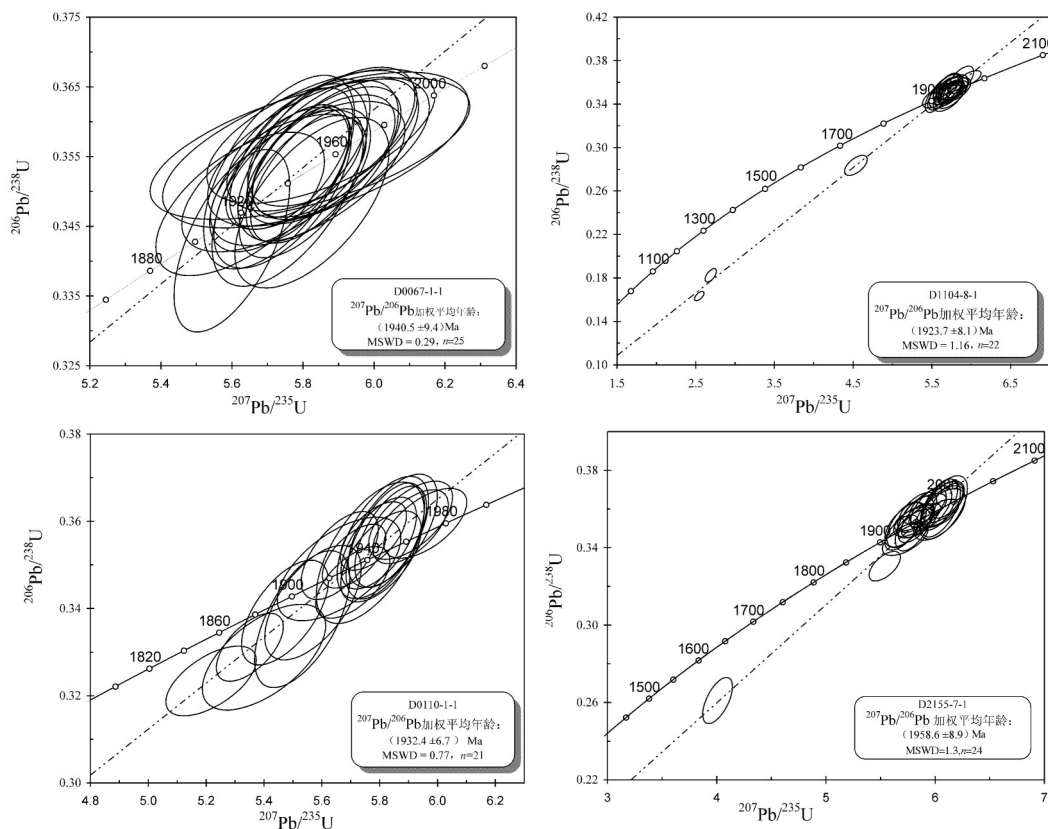


图6 石榴花岗岩的锆石U-Pb同位素年龄谐和图  
Fig.6 Zircon U-Pb concordia diagram of garnet granite

综上所述,和林—凉城一带的石榴花岗岩应形成在1940 Ma年左右,形成时代为古元古代。

## 4 讨论

前人通过岩石组合、构造样式、变质作用和同位素年龄等综合研究,对华北克拉通变质基底早前寒武纪地质和构造演化的有不同的认识,一种主要的认识是华北克拉通基底可分为太古宙三个微陆块,即东部陆块、阴山陆块、鄂尔多斯陆块<sup>[14]</sup>,但对碰撞时代有不同的看法。赵国春认为鄂尔多斯陆块与阴山陆块碰撞拼合的时间在~1.95 Ga<sup>[14]</sup>,另一种认为25亿年地质事件在华北克拉通北缘应是一期广泛的微陆块拼合事件,阴山微陆块与鄂尔多斯微陆块碰撞造山发生于这个时期<sup>[1,7]</sup>。本区的石榴花岗岩(强过铝花岗岩)出露于鄂尔多斯陆块,其CaO/Na<sub>2</sub>O值在0.69~1.74之间,均大于0.3(图7),反映了其岩浆源区岩石应是富长石的杂砂岩;其Rb/Sr和Rb/Ba值较低,反映了源岩为杂砂岩(图7);Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>值在13.02~35.38之间,均远小于100,反

映其部分熔融温度为高温(大于875℃)<sup>[15-16]</sup>,因此本区石榴花岗岩属于高温型强过铝花岗岩,而高温型强过铝花岗岩是在诸如澳大利亚的拉克伦造山带的“高温”碰撞中,在这类碰撞造山过程中,地壳加厚不明显,形成不了高压环境,但在后碰撞造山阶段,岩石圈可发生拆沉作用与热软流圈的上涌,使有关地壳发生深熔作用。本区石榴花岗岩体规模大,形成温度高,并伴随有同时代的紫苏(二辉)斜长麻粒岩(原岩可能为辉长闪长岩)侵入<sup>[17]</sup>,这暗示本区的深部热机制与澳大利亚的克拉伦造山带相似,属于热造山带,石榴花岗质岩是由底侵玄武质岩浆和下地壳的富长石杂砂岩在相对高温条件下发生部分熔融的产物,其热源主要来源于底侵的高温玄武质岩浆。在w(Rb)-w(Yb+Ta)图解<sup>[18]</sup>上(图8),样品大多落入火山弧花岗岩区域内,仅个别落入板内花岗岩(WPG)区域内。在Rb-Y+Nb图解<sup>[19]</sup>上(图7),样品均落入后碰撞花岗岩(Post-COLG)区域内,一般认为,花岗岩的地球化学特征主要受到源区岩石成分和岩浆演化过程等因素的制约,而构造



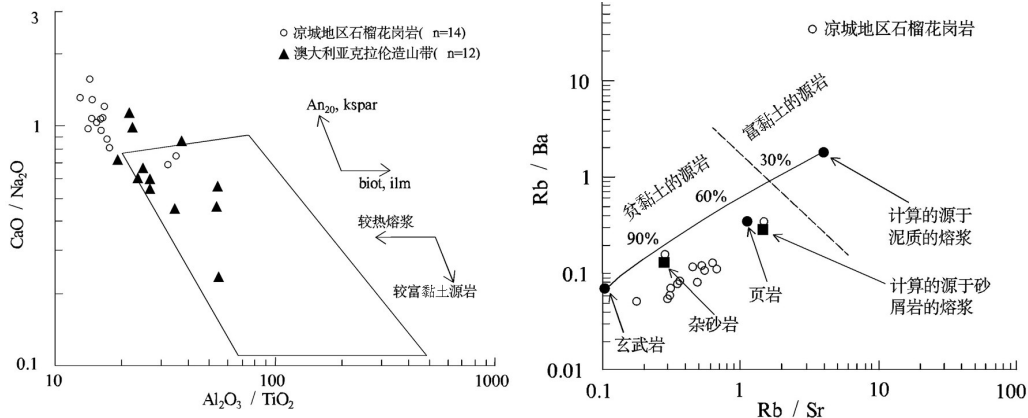


图7 石榴花岗岩的源成分判别图(据文献[16])

Fig.7 Diagram for discriminating compositions of source rocks for garnet granite (after reference [16])

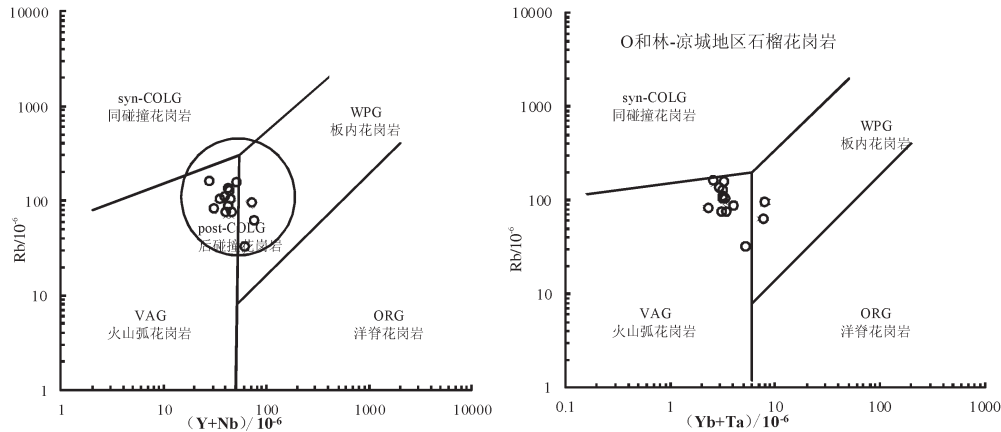


图8 石榴花岗岩微量元素构造环境判别图解(据文献[18-19])

Fig.8 Diagrams of tectonic settings of trace elements for garnet granite (after reference [18-19])

环境的影响相对源区组分而言较弱。因此认为该地区的石榴花岗岩体形成于后碰撞阶段。

综上所述,和林—凉城一带的石榴花岗岩形成于后碰撞阶段,约在1940 Ma年,古元古代早期发生碰撞的阴山微陆块与鄂尔多斯微陆块由汇聚向伸展过渡,并伴随有玄武岩浆的底侵,使地壳下部的杂砂岩在相对高温条件下(大于875℃)发生部分熔融,形成了石榴花岗岩岩浆,其热源主要来源于底侵的高温玄武岩岩浆。

## 5 结论

(1)和林—凉城一带的石榴花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄在 1923~1958 Ma,表明它们形成时代为古元古代。

(2)和林—凉城一带的石榴花岗岩为强过铝(SP)花岗岩,形成于后碰撞阶段。约在1940 Ma,早

期发生碰撞的阴山微陆块与鄂尔多斯微陆块由汇聚向伸展过渡,并伴随有玄武岩浆的底侵,高温的玄武岩岩浆使地壳下部的杂砂岩在相对高温条件下(大于875℃)发生部分熔融,形成了石榴花岗岩岩浆。

**致谢:**工作中曾庆荣、杨亮高工等给予了有益的指导和帮助;审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见。在此一并表示诚挚的感谢。

## 参考文献(References):

[1] 钟长汀,邓晋福,万渝生,等.内蒙古大青山地区古元古代花岗岩:地球化学、锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].岩石学报, 2014, 25 (8): 1772-1792.  
Zhong Changting, Deng Jinfu, Wan Yusheng, et al. Paleoproterozoic granitoids in the Daqingshan Mountain area, Inner Mongolia: Geochemistry, SHRIMP zircon dating and geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 25 (8): 1772-1792 (in Chinese with English abstract).

- [2] 宋海峰, 徐仲元, 刘正宏. 内蒙古大青山地区石榴混合花岗岩地球化学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5): 389-495.  
Song Haifeng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong. Geochemical characteristics and origin of garnet migmatitic granites in Daqingshan area, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(5): 389-495(in Chinese with English abstract).
- [3] 陶继雄, 胡凤翔. 内蒙卓资山地区深熔作用形成的石榴混合花岗岩[J]. 前寒武纪研究进展, 2002, 25(1): 59-64.  
Tao Jixiong, Hu Fengxiang. The formation of garnet-bearing migmatitic granite in Zhuozishan area, Inner Mongolia, China[J]. Progress in Precambrian Research, 2002, 25(1): 59-64 (in Chinese).
- [4] 沈其韩, 刘敦一, 王平, 等. 内蒙中南部太古宙集宁群同位素年代学研究[J]. 中国地质科学院院刊, 1987, 2: 77-86.  
Shen Qihan, Liu Dunyi, Wang Ping, et al. Study of Archean isotope geochronology of Jining Group in south-central Inner Mongolia[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences. 1987, 2: 77-86(in Chinese with English abstract).
- [5] 钟长汀. 华北克拉通北缘中段古元古代花岗岩类地球化学、年代学与构造意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
Zhong Changting. Paleoproterozoic Granitoids from Central Segment of North China Craton: Geochemistry, Geochronology and Tectonic Significance[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张维杰, 李龙, 耿明山. 内蒙古固阳地区新太古代侵入岩的岩石特征及时代[J]. 地球科学——中国地质大学, 2000, 25(3): 221-226.  
Zhang Weijie, Li Long, Geng Mingshan. Petrology and dating of Neo-Archaean intrusive rocks from Guyang area, Inner Mongolia[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 221-226(in Chinese with English abstract).
- [7] 张臣, 韩宝福, 刘树文, 等. 内蒙大青山地区黑云母花岗岩 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 561-567.  
Zhang Chen, Han Baofu, Liu Shuwen, et al. SHRIMP U-Pb dating of bloutite granites in Daqingshan, Inner Mongolia, and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(3): 561-567(in Chinese with English abstract).
- [8] 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 等. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录: S型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 586-600.  
Ding Changting, Deng Jinfu, Wan Yusheng, et al. Magma recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of North China Craton: Geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S-type granitoids[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 36 (6): 585-600(in Chinese with English abstract).
- [9] 叶天竺, 张智勇, 肖庆辉, 等. 成矿地质背景研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 186-192.  
Ye Tianzhu, Zhang Zhiyong, Xiao Qinghui, et al. Technology and Requirements of Study on the Metallogenic Geological Background[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 186-192(in Chinese).
- [10] DePaolo D J, Daley E E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension[J]. Chemical Geology, 2000, 169: 157-185.
- [11] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 2007, 23 (11): 2683-2698.  
Zang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study(3) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2683-2698(in Chinese with English abstract).
- [12] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.  
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using lasers ablation-multiion LA-MC-ICP-MS [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- [13] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 161-170.  
Li Changmin. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircon[J]. Geological Survey and Research, 2009, 33(3): 161-170(in Chinese with English abstract).
- [14] 赵春国. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 2009, 25 (8): 1772-1792.  
Zhao Chunguo. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (8): 1772-1792 (in Chinese with English abstract).
- [15] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Oxford Press, 1985: 312.
- [16] Sylvester P J. Post collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 1998, 45(1): 42-44.
- [17] 陈海东, 黎娇, 景耀祖, 等. 内蒙古中部凉城地区紫苏斜长麻粒岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41 (4): 1136-1142.  
Chen Haidong, Li Jiao, Jing Yaozu, et al. Zircon U-Pb Dating of the Hypersthene-plagioclase Granulite form Liangcheng area of Central Inner Mongolia and its Geological Significance[J]. Geology in China, 2014, 41 (4): 1136-1142 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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(4): 956-983.
- [19] Pearce J A. Sources and setting of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.