

doi:10.3799/dqkx.2014.026

# 内蒙古固阳地区新太古代变质侵入岩 地球化学特征及意义

张莉莉<sup>1</sup>, 代芳华<sup>2</sup>, 崔加伟<sup>1</sup>, 吴松<sup>1</sup>, 郑海涛<sup>2</sup>, 郑有业<sup>1,2\*</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 内蒙古固阳地区新太古代变质侵入岩具明显 TTG 岩系特征, 符合钙碱性系列岩石的演化趋势, 且具有由早期富钙向晚期富钠演化的趋势。其 SiO<sub>2</sub> 含量介于 49.99%~76.08% (绝大多数为 51%~67% 之间), 全碱含量高 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O>7%), 富钠 (Na<sub>2</sub>O>3%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O>1, 铝含量高 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量通常在 13%~18% 之间), Mg<sup>#</sup> 值较高 (Mg<sup>#</sup> 变化范围为 33~50, 均值为 45)。微量元素显示岩石较低的 Rb/Sr 比值 (0.02<Rb/Sr<0.22, 均值为 0.08), 具有明显的 Nb、P 和 Ti 负异常以及 Sr 正异常。稀土元素配分曲线为右倾型, 岩石强烈富集 LREE, 亏损 HREE, 具弱 Eu 正异常。利用激光等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 对其锆石进行了 U-Pb 定年, 测得其年龄在 2 500~2 520 Ma 之间, 属新太古代晚期。另外, 二长花岗岩的不一致线下交点年龄为 410~576 Ma, 代表着引起 Pb 从矿物中丢失的热事件的时间, 即可以作为“早古生代华北地台应祁连山褶皱带的闭合而向南增生”这一事件在该区的时间响应。

**关键词:** 变质侵入岩; 岩石学; 地球化学; 形成时代; 固阳地区。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)03-0271-12

收稿日期: 2013-04-16

## Geochemistry Characteristics and Significance of Metamorphic Intrusions in Guyang Region, Inner Mongolia

Zhang Lili<sup>1</sup>, Dai Fanghua<sup>2</sup>, Cui Jiawei<sup>1</sup>, Wu Song<sup>1</sup>, Zheng Haitao<sup>2</sup>, Zheng Youye<sup>1,2\*</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The Neoproterozoic intrusions in Guyang area, Inner Mongolia, with obvious characteristics of TTG rock series, are in line with the calc-alkaline series in the rock evolution, reflecting the trend of rock evolution from the early Ca-enriched one to later Na-enriched one. The SiO<sub>2</sub> content of these intrusive rocks is in the range of 49.99%–76.08% (mostly 51%–67%), with a high alkali content (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O>7%), enriched in Na (Na<sub>2</sub>O>3%), Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O>1, high-alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content usually between 13%–18%), high Mg<sup>#</sup> value (Mg<sup>#</sup> ranging from 33–50, average 45). Trace elements show low Rb/Sr ratio (0.02<Rb/Sr<0.22, average 0.08), with significant Nb, P and Ti negative anomalies and a positive Sr anomaly. REE distribution curves show that the rocks with a weak positive Eu anomaly are strongly LREE enriched, HREE loss, belonging to a right-inclined type. The laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) was used for the zircon U-Pb dating of the intrusive rocks, and the isotope age is between 2 500 and 2 520 Ma, belonging to the Late Neoproterozoic. Moreover, monzogranite in obtaining inconsistent U-Pb age settlement under the curve (410–576 Ma) represents the cause of the loss of Pb from the mineral-thermal event of the time, that can be used as the time limit of the incident in this area, what is the southward hyperplasia of North China platform in Early Paleozoic should be with the closure of Qilian fold belt.

**Key words:** metamorphic intrusion; petrology; geochemistry; formation age; Guyang area.

**基金项目:** 地质大调查项目内蒙古 1:5 万南卜塔亥幅 (No. K49E017010); 地质大调查项目内蒙古 1:5 万银号幅 (No. K49E018010); 区域地质调查 (No. 1212010610414)。

**作者简介:** 张莉莉 (1987-), 女, 主要从事矿床学、数字化区域地质调查等研究。E-mail: zhanglili331@163.com

\* 通讯作者: 郑有业, E-mail: zhyouye@163.com

内蒙古固阳地区新太古代变质侵入岩与新太古代色尔腾山岩群共同构成一条呈带状展布的花岗—绿岩带。以该侵入岩带为界,南北两侧变质岩石中的构造线方向明显不一致,证实了该侵入岩带所处构造位置的特殊性(陶继雄,2003)。新太古代变质侵入岩的确定对研究华北地块北缘太古宙地壳演化有重要意义。

原 1:20 万区调及《内蒙古自治区区域地质志》划出了大面积分布的吕梁期和加里东期变质石英闪长岩体,近年来的 1:5 万区调及 1:25 万国土资源大调查工作,又进一步确定划分出大量新太古代变质侵入岩。前人对这一变质岩系做了一定的工作,如张维杰等(2000)在固阳地区发现 TTG 岩系(Didier *et al.*, 1982; Condie, 1989; Martin *et al.*, 2005),并测得其锆石 U-Pb 年龄为 2 400~2 580 Ma;陶继雄(2003)进一步对其地化特征进行研究,并获得 2 575~2 676 Ma 的锆石 U-Pb 年龄;简平等(2005)则对固阳东部和北部赞岐岩的年代学进行探讨,并得出年龄在 2 530~2 550 Ma 之间;贺元凯等(2010)则对固阳北部合教 S 型花岗岩主、微量元素与年代学进行研究;王仁民等(2012)也在同为华北克拉通北缘的尚义地区发现低  $Al_2O_3$  型 TTG 岩体,并对其地化特征、年代学及成因进行探讨。

上述资料为揭示太古代末至古元古代初华北板块北缘中段的地质演化历史提供了证据,但对该岩构造意义的探讨仍不充分。故本文通过对固阳地区新太古代变质侵入岩的地球化学及锆石年代学研究,进一步为研究华北北缘太古宙地壳演化提供证据,并为本区色尔腾山岩群的构造提供间接的年代学约束。

## 1 区域地质背景

研究区位于内蒙古自治区中部的包头市固阳县境内,大地构造位置属华北地块北缘隆起带、大青山复式背斜的北翼,其在晚古生代晚期与北部的华北陆块北缘增生带的地质演化有着紧密的关系。区内大地构造演化划分为基底形成和构造岩浆活动改造 2 个大的构造演化阶段。出露的新太古代变质侵入岩依据野外的相对侵位顺序,由早到晚划分为 6 个填图单位,依次为斜长角闪岩( $Ar_3\phi_0$ )、片麻状闪长岩( $Ar_3\delta$ )、片麻状石英闪长岩( $Ar_3\sigma_0$ )、片麻状英云闪长岩( $Ar_3\gamma_0$ )、片麻状花岗闪长岩( $Ar_3\gamma\delta$ )、片麻状二长花岗岩( $Ar_3\gamma\gamma$ )。这些岩体主要分布于研究区西

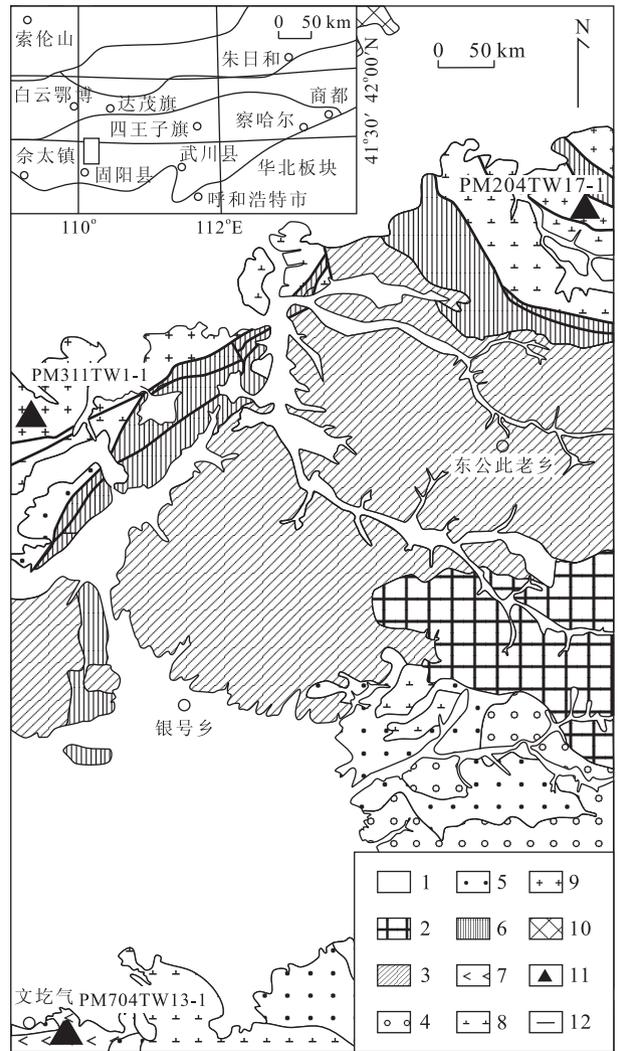


图 1 固阳测区地质简图及采样位置分布

Fig. 1 Sketch geological map and sampling sites of the igneous rocks in Guyang

1. 中、新生界;2. 晚三叠世玉元城岩体;3. 早二叠世西营子岩体;4. 早泥盆世柳下沟岩体;5. 新太古界色尔腾山岩群;6. 中元古界渣尔泰山岩群;7. 新太古代斜长角闪岩;8. 新太古代片麻状闪长岩、石英闪长岩、石英二长闪长岩;9. 片麻状二长花岗岩、二长花岗岩;10. 新太古代变质深成岩;11. 采样点;12. 断层

南部文圪气、银号西南哈彦忽洞以及后岔泌、后公中村、南壕、公中渠、小石拐一带,近北东东向展布,侵入于色尔腾山岩群之中,出露面积约 72 km<sup>2</sup>(图 1)。

## 2 地球化学特征

研究区变质侵入岩的主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。

分析结果表明:固阳地区的变质侵入岩样品  $SiO_2$  含量介于 49.99%~76.08%(绝大多数为

表 1 固阳地区新太古代变质侵入岩主量元素(%)、微量和稀土元素( $10^{-6}$ )分析及有关参数

Table 1 Major, trace and rare-earth element compositions of the Neoproterozoic intrusive rocks in Guyang area

样号	PM204 YQ17-1	PM310 YQ6-1	PM311 YQ1-1	PM404 YQ35-1	D7034 YQ1	D7035 YQ1	PM704 YQ5-1	PM704 YQ13-1	PM311 YQ13-1	PM704 YQ13-1	文圪气 YQ-1	文圪气 YQ-2	文圪气 YQ-2	杨家店 YQ-2	杨家店 YQ-4
岩石名称	中细粒二 长花岗岩	片麻状花 岗闪长岩	片麻状二 长花岗岩	中细粒石 英闪长岩	石英二长 闪长岩	石英闪 长岩	中细粒石 英闪长岩	蚀变斜长 角闪岩	糜棱岩化 闪长岩	蚀变斜长 角闪岩	细粒含铁 角闪岩	斜长角 闪岩	斜长角 闪岩	细粒含铁 角闪岩	细粒含铁 角闪岩
SiO <sub>2</sub>	72.31	60.05	76.08	62.50	64.53	51.63	67.12	56.42	49.99	56.42	32.96	39.43	37.49	37.49	33.50
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.67	0.07	0.36	0.61	1.05	0.38	0.71	1.68	0.71	1.41	0.84	2.37	2.37	1.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.37	17.42	13.76	17.87	16.78	16.20	15.97	16.48	14.24	16.48	2.06	2.95	6.87	6.87	3.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.59	1.81	0.01	2.94	2.21	4.88	2.13	3.60	4.11	3.60	14.43	8.20	13.63	13.63	11.91
FeO	0.42	4.10	0.53	1.63	1.08	4.88	1.00	3.53	8.55	3.53	10.20	7.70	9.00	9.00	9.40
MnO	0.02	0.09	0.01	0.11	0.07	0.14	0.03	0.10	0.19	0.10	0.25	0.16	0.53	0.53	0.24
MgO	0.58	2.87	0.24	1.65	0.83	5.12	1.61	3.81	6.04	3.81	11.07	12.94	6.72	6.72	9.28
CaO	2.05	5.63	0.33	5.46	2.34	7.19	1.80	5.40	9.11	5.40	20.63	21.93	19.37	19.37	22.16
Na <sub>2</sub> O	4.02	3.35	3.85	3.36	3.93	3.56	4.37	3.98	3.08	3.98	0.37	0.45	1.02	1.02	0.77
K <sub>2</sub> O	2.98	2.42	4.04	1.64	5.34	1.62	3.41	3.27	0.37	3.27	0.05	0.95	0.50	0.50	0.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.22	0.03	0.14	0.34	0.53	0.12	0.32	0.22	0.32	2.49	2.94	1.10	1.10	2.30
H <sub>2</sub> O <sub>p</sub>	0.97	0.97	0.69	1.99	1.36	2.72	1.62	1.93	2.05	1.93	1.20	0.75	0.89	0.89	1.09
CO <sub>2</sub>	0.14	0.10	0.10	0.12	0.18	0.14	0.18	0.12	0.16	0.12	2.61	0.50	0.12	0.12	3.71
LOI	0.80	0.55	0.66	1.79	1.22	2.39	1.58	1.62	1.40	1.62	2.88	0.17	0.18	0.18	3.66
Q	32.89	13.69	37.26	23.36	16.18	3.54	23.20	4.91	2.57	4.91	0.00	0.00	1.93	0.00	0.00
C	0.93	0.00	2.53	0.94	1.01	0.00	2.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Or	17.87	24.15	14.51	9.93	32.21	9.90	20.59	19.81	2.24	19.81	0.00	0.00	3.00	3.00	0.00
Ab	34.44	28.71	32.88	29.08	33.87	31.08	37.71	34.46	26.68	34.46	0.00	0.00	8.74	8.74	0.00
An	9.96	25.65	1.48	26.91	9.81	24.17	8.40	17.82	24.50	17.82	3.97	3.26	12.85	12.85	5.34
Di	0.00	1.12	0.00	0.00	0.00	7.55	0.00	6.14	16.73	6.14	69.23	71.05	41.24	41.24	63.70
Hy	1.47	11.88	1.48	4.40	2.12	13.19	4.11	9.41	17.42	9.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	0.67	2.66	0.01	4.37	1.98	7.31	2.26	5.35	6.11	5.35	21.81	12.07	20.04	20.04	18.19
Il	0.50	1.29	0.13	0.70	1.18	2.06	0.74	1.38	3.27	1.38	2.79	1.62	4.57	4.57	2.84
Ap	0.13	0.49	0.07	0.31	0.76	1.20	0.27	0.72	0.49	0.72	5.67	6.52	2.44	2.44	5.29
No	12.63	30.88	2.20	31.63	12.65	28.00	10.02	20.54	31.47	20.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	85.20	56.91	94.29	62.37	82.26	44.52	81.50	59.18	31.49	59.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\sigma$	1.67	1.95	1.88	1.28	3.99	3.11	2.51	3.92	1.70	3.92	-0.02	-0.55	-0.42	-0.42	-0.14
Si	6.05	19.73	2.77	14.71	6.20	25.52	12.86	20.95	27.27	20.95	30.65	42.79	21.77	21.77	29.23
Fl	77.35	50.61	95.99	47.80	79.84	41.88	81.21	57.31	27.47	57.31	2.00	6.00	7.28	7.28	4.97
Ar	2.49	1.67	3.55	1.55	2.88	1.57	2.56	1.99	1.35	1.99	1.04	1.12	1.12	1.12	1.09
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.35	1.38	0.95	2.05	0.74	2.20	1.28	1.22	8.32	1.22	7.40	0.47	2.04	2.04	1.97
Mg <sup>#</sup>	0.36	0.47	0.44	0.41	0.33	0.50	0.50	0.50	0.47	0.50	0.46	0.61	0.36	0.36	0.45
Ba	828.00	1422.00	1096.00	637.00	1970.00	1077.00	1059.00	1235.00	178.00	1235.00	55.90	421.00	898.00	898.00	189.00
Rb	52.50	70.90	33.60	33.60	95.60	37.40	81.40	87.80	9.20	87.80	1.80	31.30	6.30	6.30	11.20
Sr	430.00	494.00	326.00	635.00	821.00	970.00	580.00	914.00	515.00	914.00	461.00	508.00	941.00	941.00	411.00
Zr	132.00	148.00	91.60	95.30	192.00	167.00	106.00	122.00	116.00	122.00	14.70	12.50	132.00	132.00	29.80

续表 1

岩石名称	PM204 YQ17-1	PM311 YQ1-1	PM310 YQ6-1	PM404 YQ35-1	D7034 YQ-1	D7035 YQ-1	PM704 YQ5-1	PM311 YQ13-1	PM704 YQ13-1	文圻气 YQ-1	文圻气 YQ-2	文圻气 YQ-2	杨家店 YQ-2	杨家店 YQ-4
Nb	2.75	1.58	5.90	4.44	9.28	12.30	3.45	8.90	5.95	1.20	1.23	1.23	8.44	3.17
Th	4.62	0.94	4.20	1.61	3.15	1.95	0.51	0.51	0.46	0.85	0.82	0.82	3.53	1.34
Ga	18.40	13.60	18.70	19.90	17.00	20.40	17.80	21.60	22.60	9.87	6.61	6.61	22.40	14.00
Ni	3.28	6.25	13.80	6.07	6.76	68.60	29.80	43.30	32.40	48.80	77.60	77.60	13.40	33.40
V	24.7	17.0	121.0	59.4	70.0	148.0	61.7	316.0	144.0	673.0	320.0	320.0	608.0	661.0
Cr	3.5	3.5	28.5	13.5	12.5	129.0	78.4	164.0	73.0	73.0	152.0	152.0	33.9	59.0
Hf	5.3	2.7	4.7	3.2	6.7	4.6	4.4	2.6	3.9	0.6	0.3	0.3	4.0	1.1
Cs	0.90	2.27	1.2	1.02	1.04	1.06	1.39	0.96	1.03	0.92	1.15	1.15	0.86	1.09
Sc	1.57	1.10	15.20	9.06	3.67	24.30	3.90	46.50	24.30	82.40	83.80	83.80	38.50	68.00
Ta	0.096	0.420	0.360	0.260	0.320	0.590	0.330	0.620	0.140	0.100	0.100	0.100	0.800	0.160
Co	2.72	2.16	17.70	6.71	11.00	30.50	8.85	44.60	20.20	83.30	51.00	51.00	46.90	60.10
Be	0.98	1.06	1.30	1.01	1.23	1.35	1.37	0.98	2.08	0.32	0.26	0.26	2.81	0.59
U	0.230	0.200	0.630	0.370	0.320	0.320	0.180	0.410	0.088	0.200	0.170	0.170	0.830	1.150
La	28.29	9.59	23.40	17.61	56.37	69.68	15.66	20.82	37.35	19.53	21.44	21.44	65.67	24.63
Ce	48.97	11.63	46.75	33.75	95.15	143.70	25.18	44.02	77.92	47.72	47.46	47.46	159.10	57.60
Pr	4.55	1.35	6.15	4.29	10.18	18.43	2.75	5.98	10.10	8.23	7.25	7.25	23.53	8.93
Nd	13.99	3.53	21.78	15.91	34.14	69.80	8.94	24.52	38.78	36.56	34.20	34.20	106.80	37.84
Sm	1.68	0.60	4.18	3.00	4.49	11.24	1.34	5.42	7.27	8.39	7.41	7.41	22.75	8.01
Eu	0.83	0.64	1.15	0.97	1.81	2.80	0.72	1.80	1.59	2.21	2.03	2.03	6.59	2.15
Gd	1.00	0.37	3.65	2.63	2.80	7.78	0.92	5.41	5.05	6.58	6.02	6.02	17.42	6.51
Tb	0.14	0.05	0.57	0.41	0.36	1.09	0.13	0.91	0.72	0.82	0.73	0.73	2.49	0.90
Dy	0.65	0.26	3.14	2.20	1.70	5.51	0.66	5.45	3.74	3.80	3.15	3.15	11.71	4.43
Ho	0.11	0.05	0.64	0.45	0.31	1.09	0.13	1.10	0.70	0.62	0.54	0.54	2.09	0.81
Er	0.25	0.14	1.71	1.20	0.69	2.61	0.29	3.09	1.72	1.20	1.10	1.10	4.66	1.83
Tm	0.04	0.02	0.27	0.19	0.09	0.38	0.04	0.47	0.25	0.14	0.14	0.14	0.59	0.24
Yb	0.20	0.15	1.71	1.14	0.56	2.17	0.24	2.92	1.43	0.72	0.70	0.70	3.19	1.31
Lu	0.04	0.03	0.26	0.19	0.09	0.30	0.04	0.45	0.21	0.10	0.09	0.09	0.47	0.19
Y	1.95	1.26	15.65	11.28	6.51	25.75	2.67	27.45	15.61	12.29	11.74	11.74	44.30	17.80
ΣREE	102.69	29.67	131.01	95.22	215.25	362.33	59.71	149.81	202.44	148.91	144.00	144.00	471.36	173.18
ΣCe	98.31	27.34	103.41	75.53	202.14	315.65	54.59	102.56	173.01	122.64	119.79	119.79	384.44	139.16
ΣY	4.38	2.33	27.60	19.69	13.11	46.68	5.12	47.25	29.43	26.27	24.21	24.21	86.92	34.02
ΣCe/ΣY	22.45	11.73	3.75	3.84	15.42	6.76	10.66	2.17	5.88	4.67	4.95	4.95	4.42	4.09
(La/Yb) <sub>N</sub>	93.18	42.11	9.01	10.18	66.31	21.15	42.98	4.70	17.21	17.87	20.18	20.18	13.56	12.39
Sr/Y	220.510	258.730	31.565	56.294	126.110	37.670	217.230	18.761	58.552	37.510	43.271	43.271	21.242	23.090
Rb/Sr	0.12	0.22	0.12	0.05	0.12	0.04	0.14	0.02	0.10	0.00	0.06	0.06	0.01	0.03
δEu	1.81	3.87	0.88	1.03	1.46	0.87	1.88	1.01	0.76	0.88	0.90	0.90	0.97	0.88

注:样品测试由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心分析。

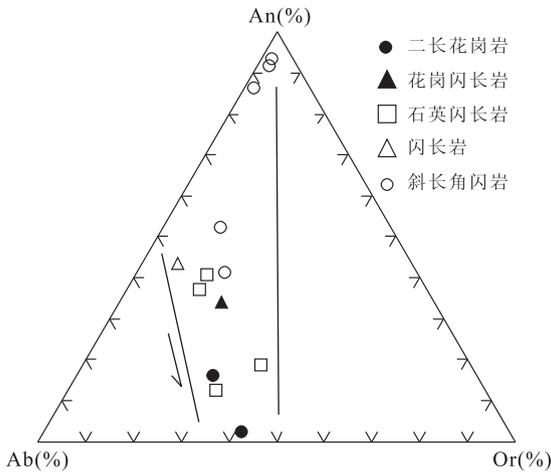


图 2 固阳地区变质侵入岩 An-Ab-Or 关系

Fig. 2 Relation of An-Ab-Or from metamorphic intrusion in Guyang area

51%~67%);高铝,  $Al_2O_3$  含量通常在 13%~18% 之间;全碱含量高,  $Na_2O+K_2O$  一般大于 7%, 岩石富钠,  $Na_2O/K_2O$  比值大于 1.0, 绝大多数大于 1.2; 具有较高的  $Mg^\#$  值, 变化范围为 0.33~0.50, 均值为 0.45; 岩石属钙碱性系列. 在 An-Ab-Or 图解(图 2)中, 演化线由 An 向 Ab-Or 端元演化, 反映岩石由早期富钙向晚期富钠演化, 符合岩浆演化规律; 在 K-Na-Ca 的三角图(图 3a)上, 样品位于 TTG 的演化线上; 在  $CaO-Na_2O-K_2O$  图解(图 3b)中, 反映岩石具有由早期富钙向晚期富钠演化的趋势, 即英云闪长岩→奥长花岗岩的演化趋势.

微量元素显示, Sr 平均含量为  $681.85 \times 10^{-6}$ ,

明显富集(平均值为  $454 \times 10^{-6}$ ), 显示具较低的 Rb/Sr 比值( $0.02 < Rb/Sr < 0.22$ , 均值为 0.08). 由原始地幔标准化图解(图 4a)可知, 该研究区新太古代侵入岩具有明显的 Nb、P 和 Ti 负异常, 主要原因是部分熔融过程中角闪石和(或)Fe-Ti 氧化物通常作为残余相而分离. P 负异常显示在分异过程中可能有磷灰石的析出.

稀土元素含量从表中可以看出:(1)斜长角闪岩稀土元素特征:  $\sum REE$  为 144.00~471.46;  $\sum Ce/\sum Y$  为 4.09~5.88, 属强烈 LREE 富集型, HREE 亏损;  $(La/Yb)_N$  为 12.39~20.18;  $\delta Eu$  为 0.76~0.97, 稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4b)上显示出强烈的稀土元素分异, 具弱 Eu 正异常, 无明显的 Eu 负异常;(2)闪长岩稀土元素特征:  $\sum REE$  为 149.81;  $\sum Ce/\sum Y$  为 2.17, 属 LREE 富集型, HREE 亏损;  $(La/Yb)_N$  为 4.70;  $\delta Eu$  为 1.01, 稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4b)上为右倾型, 显示为轻稀土富集, 具弱 Eu 正异常;(3)石英闪长岩稀土元素特征:  $\sum REE$  为 59.71~362.33;  $\sum Ce/\sum Y$  为 3.84~15.42, 属强烈 LREE 富集型, HREE 亏损;  $(La/Yb)_N$  为 10.18~66.31;  $\delta Eu$  为 0.87~1.88, 稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4c)上显示出强烈的稀土元素分异, 具 Eu 正异常, 无明显的 Eu 负异常;(4)花岗闪长岩稀土元素特征:  $\sum REE$  为 131.01;  $\sum Ce/\sum Y$  为 3.75, 属强烈 LREE 富集型, HREE 亏损;  $(La/Yb)_N$  为 9.01;  $\delta Eu$  为 0.88, 稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4d)上为右倾型, 显示为轻稀土富集, 具弱负 Eu 异常;(5)二长花岗

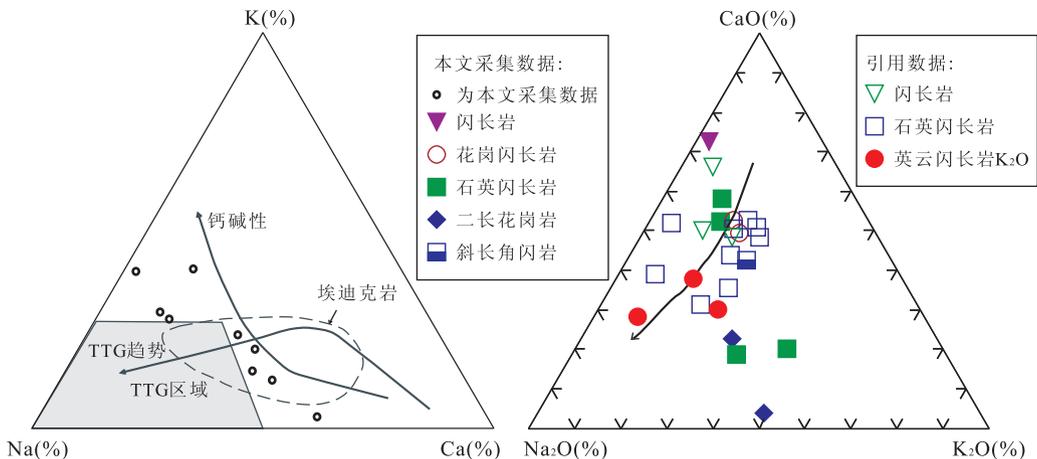


图 3 固阳地区变质侵入岩的 K-Na-Ca 关系(a)和固阳地区变质侵入岩的  $CaO-Na_2O-K_2O$  关系(b)

Fig. 3 Relation of K-Na-Ca from metamorphic intrusion in Guyang area (a) and relation of  $CaO-Na_2O-K_2O$  from metamorphic intrusion in Guyang area (b)

图 a 中 TTG 和钙碱性的趋势线及埃达克岩的区域见 Martin *et al.* (2005); 图中部分数据引自北京地大固阳幅区调资料(张维杰等, 2000)

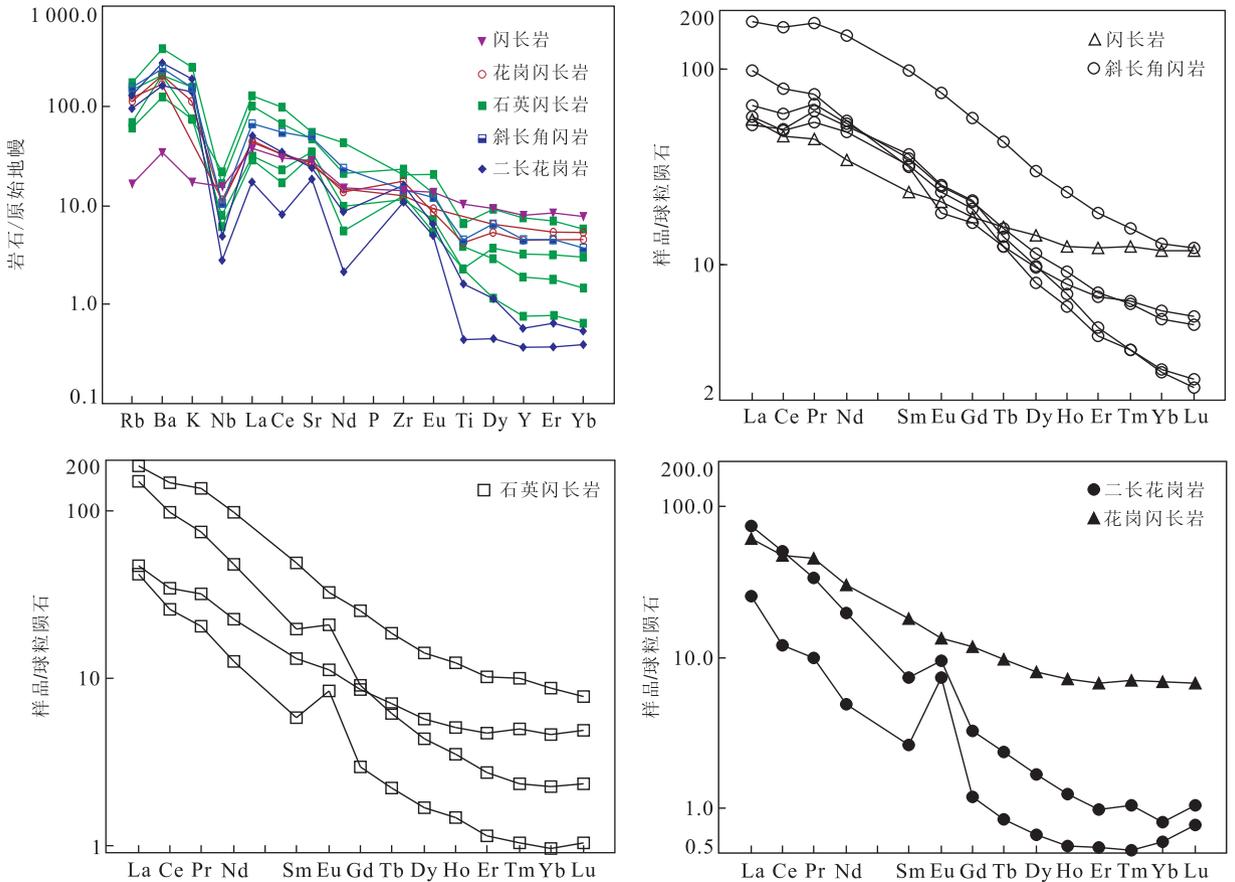


图 4 固阳地区侵入岩微量元素蛛网图(a)、斜长角闪岩及闪长岩(b)、石英闪长岩(c)和花岗闪长岩及二长花岗岩(d)稀土元素配分曲线(球粒陨石标准据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 The trace elements spidergram (a), the chondrite-normalized REE patterns of amphibolites and diorites (b), quartz diorite (c) and granodiorite and monzonitic granite (d) of metamorphic intrusion in Guyang area

岩稀土元素特征:  $\sum \text{REE}$  为 29.67~102.69;  $\sum \text{Ce}/\sum \text{Y}$  为 11.73~22.45, 属强烈 LREE 富集型, HREE 亏损;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 42.11~93.18;  $\delta \text{Eu}$  为 1.81~3.87, 稀土元素球粒陨石标准化图解(图 4d)上为右倾型, 显示为轻稀土富集, 具 Eu 正异常。

从岩石地球化学特征可以看出, 固阳地区新太古代变质侵入岩具有明显 TTG 岩系特征, 推断为具有较高热流值的太古宙铁镁质地壳部分熔融, 产生 TTG 岩浆上侵而成, 进一步证实了新太古代变质侵入岩为古老地块裂解、焊接活动的产物。

### 3 形成时代探讨

#### 3.1 样品特征

本研究选取锆石样品 3 件(样品分布见图 1): PM704TW13-1 岩性为斜长角闪岩, 分布于文圪气以南, 出露面积约 2 km<sup>2</sup>, 侵入新太古代点力素泰岩组之中, 并被同时代的石英闪长岩侵入; 岩石受后期

变质变形改造比较强烈, 多呈片麻状构造, 韧形变形不明显。PM311TW1-1 岩性为片麻状二长花岗岩, 分布于羊盖岗, 总体上呈近北东东向带状展布; 岩石呈深灰色, 花岗结构, 片麻状构造, 具一定程度的片麻理, 浅色矿物与暗色矿物相间排列, 定向拉长明显; 岩石风化蚀变较强, 斜长石发生强烈的绿帘石化和高岭土化使晶形不完整, 暗色矿物发生绿泥石化而褪色, 遭受强烈的变质变形作用, 原岩面貌已发生改变, 但仍保留部分侵入岩的特征。PM204TW17-1 岩性为灰色中细粒二长花岗岩, 分布于四分子, 岩石呈灰色, 花岗结构, 块状构造。

#### 3.2 测试方法

锆石分选在中国地质大学(武汉)选矿实验室完成, 在测试之前, 在中国地质科学院先进行透射、反射光拍照以及阴极发光(CL)照相。锆石 U-Pb 同位素分析在地质过程与矿产资源国家重点实验室用标准测定程序条件进行, 采用激光剥蚀(LA)一等离子体质谱(ICP-MS)进行测量, 激光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ 。锆石

LA-ICP-MS U-Pb 测年依据 Horn *et al.* (2000) 提出的分析方法, Ballard *et al.* (2001) 对这个方法的流程进行过详细的叙述, 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化. 锆石年龄采用哈佛大学国际标准锆石 91 500 作为外标准物质. 采样方式为单点剥蚀, 每完成 5 个锆石点的测定, 加测 91 500 一次; 每完成 10 个锆石点的测定, 加测一次 NIST SRM610. 详细的测试方法及仪器参数参考 Yuan *et al.* (2004). 每个锆石微区原位测试点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和元素含量计算采用 GLITTER 程序, 加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Ludwig(1991) 的方法.

### 3.3 结果分析

斜长角闪岩样品 (PM704TW13-1) 中选取的锆石大多具有次圆状和浑圆状外形, 粒度多介于 100~200  $\mu\text{m}$  之间, 长宽比为 1:0.8~2:1. 锆石 CL 图 (图 5) 揭示大部分锆石具有典型岩浆锆石的环带特征, Th 和 U 含量分别介于  $75.1 \times 10^{-6} \sim 608 \times 10^{-6}$  之间和  $115 \times 10^{-6} \sim 2 179 \times 10^{-6}$  之间, 具有很好的正相关性; 锆石颗粒的 Th/U 比值具有稳定的范围, Th/U 比值均大于 0.1, 介于 0.13~1.01 之间, 显示出所有测年锆石颗粒应为岩浆结晶的产物. 部分锆石受热液作用影响, 在锆石的边部出现晶棱圆化、港湾状结构等外形特征, 且这些区域阴极发光强度较强, 无明显分带, 为热液溶蚀作用形成的变质锆石, 当热液蚀变作用进一步增强时, 在锆石的周围会出现较宽的白色蚀变边 (吴元保和郑永飞, 2004).

表 2 列出了样品 PM704TW13-1、PM204TW17-1 和 PM311TW1-1 中所测锆石颗粒的 U-Pb 同位素定年结果. 由于所测样品具有较为古老的年龄 (>2 400 Ma), 本文采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄进行加权平均计算 (徐旺春等, 2007).

对样品 PM704TW13-1 进行了 20 个锆石点的分析, 剔除  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄较小的 3 个点 (点 1、10、17) 之后, 所有这些锆石的测定点可以构成一条很好的不一致曲线, 上交年龄为 2 520 Ma (MSWD=3.0), 它们的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄主要集中于 2 451~2 533 Ma 之间, 加权平均年龄为 2 514.0 $\pm$ 4 Ma (MSWD=2.6), 两者在误差范围内一致 (图 6). 因此, 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄 2 514 Ma 应该代表了物源区岩浆结晶的年龄.

对片麻状二长花岗岩样品 (PM311TW1-1) 进行了 21 个锆石点的分析, 剔除 1 个  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面

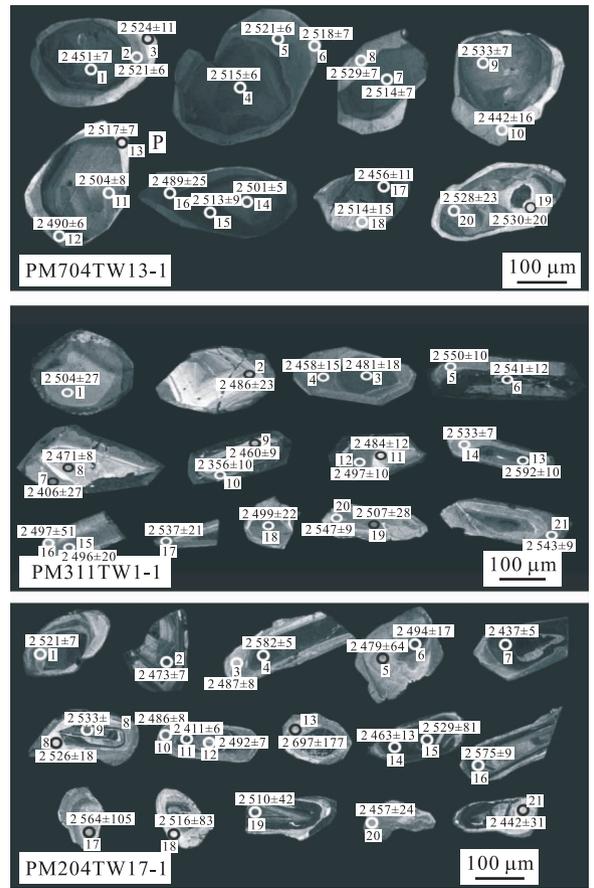


图 5 固阳地区新太古代变质侵入岩锆石阴极发光 (CL) 图像特征

Fig. 5 CL imagines for zircons from the Neoarchean intrusive rocks in Guyang area

圆圈示激光束斑的剥蚀范围; 数字为该点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 单位为 Ma

年龄最大值 2 592 Ma (13) 和 3 个最小值 (4、7、10) 之后, 其余 17 个锆石测定点可以构成一条较好的不一致线, 上交点年龄为 2 519 Ma (MSWD=10.4), 下交点年龄为 567 Ma, 它们的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为 2 512 $\pm$ 13 Ma (MSWD=8.2), 在误差范围内与所有点获得的不一致线的上交点年龄一致 (图 6). 因此, 该岩石岩浆结晶年龄约为 2 512 Ma.

二长花岗岩样品 (PM204TW17-1) 中的 Th 和 U 含量分别介于  $152 \times 10^{-6} \sim 2 172 \times 10^{-6}$  之间和  $133 \times 10^{-6} \sim 3 003 \times 10^{-6}$  之间, 锆石颗粒的 Th/U 比值介于 0.06~3.04 之间, 变化范围较大. 对样品 PM204TW17-1 进行了 21 个锆石点的分析, 剔除 3 个  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄最大值 (4、13、16) 和 3 个最小值 (6、7、11), 其余 15 个锆石测定点可以构成一条较好的不一致线, 上交点年龄为 2 513 Ma (MSWD=5.4), 下交点年龄为 410 Ma, 它们的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加

表 2 固阳地区新太古代变质侵入岩锆石 LA-ICP-MS 同位素测年结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb analytical data of zircon from the Neoproterozoic intrusive rocks in Guyang area

分析点	U <sup>238</sup>		Th <sup>232</sup>		Th/U		206Pb/238U		207Pb/235U		pr		238U/232Th		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	
	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s
PM704-01	325	201.0	0.62	9.885 22	0.087 79	0.448 64	0.002 84	0.90	1.62	0.02	2.451	7	2.424	8	2.389	13				
PM704-02	637	341.0	0.53	10.844 20	0.081 12	0.471 96	0.002 99	0.90	1.87	0.02	2.521	6	2.510	7	2.492	13				
PM704-03	115	94.1	0.82	10.870 12	0.144 78	0.474 06	0.004 60	0.90	1.23	0.01	2.524	11	2.512	12	2.501	20				
PM704-04	459	381.0	0.83	11.352 42	0.091 18	0.496 40	0.003 16	0.90	1.21	0.01	2.515	6	2.553	7	2.598	14				
PM704-05	602	467.0	0.78	10.980 09	0.079 95	0.478 50	0.002 91	0.90	1.29	0.01	2.521	6	2.521	7	2.521	13				
PM704-06	404	406.0	1.01	9.655 20	0.079 83	0.421 11	0.002 57	0.90	0.99	0.01	2.518	7	2.402	8	2.266	12				
PM704-07	299	205.0	0.69	10.938 32	0.095 74	0.477 88	0.003 02	0.90	1.46	0.01	2.514	7	2.518	8	2.518	13				
PM704-08	311	200.0	0.64	10.202 07	0.092 27	0.441 60	0.002 83	0.90	1.55	0.02	2.529	7	2.453	8	2.358	13				
PM704-09	315	162.0	0.52	10.854 60	0.096 50	0.469 00	0.003 22	0.90	1.94	0.02	2.533	7	2.511	8	2.479	14				
PM704-10	118	75.1	0.63	10.230 95	0.115 80	0.460 55	0.003 55	0.90	1.57	0.02	2.464	10	2.456	10	2.442	16				
PM704-11	302	176.0	0.58	10.681 51	0.099 31	0.468 81	0.003 08	0.90	1.72	0.02	2.504	8	2.496	9	2.478	14				
PM704-12	1 613	209.0	0.13	9.576 43	0.073 73	0.423 60	0.002 96	0.90	7.72	0.08	2.490	6	2.395	7	2.277	13				
PM704-13	305	126.0	0.41	10.170 94	0.098 30	0.442 93	0.003 48	0.90	2.42	0.02	2.517	7	2.450	9	2.364	16				
PM704-14	570	434.0	0.76	10.784 66	0.075 50	0.474 07	0.002 86	0.90	1.31	0.01	2.501	5	2.505	7	2.501	13				
PM704-15	2 067	595.0	0.29	10.880 39	0.123 66	0.475 02	0.005 38	0.90	3.48	0.03	2.513	9	2.513	11	2.506	23				
PM704-16	2 179	608.0	0.28	10.103 19	0.115 94	0.449 00	0.004 01	0.91	3.59	0.04	2.489	25	2.444	11	2.391	18				
PM704-17	334	186.0	0.56	10.163 77	0.113 56	0.459 33	0.002 94	0.90	1.80	0.02	2.456	11	2.450	10	2.437	13				
PM704-18	313	200.0	0.64	10.169 59	0.149 37	0.444 06	0.003 20	0.90	1.56	0.02	2.514	15	2.450	14	2.369	14				
PM704-19	479	293.0	0.61	10.942 03	0.184 44	0.473 76	0.003 04	0.90	1.63	0.02	2.530	20	2.518	16	2.500	13				
PM704-20	456	192.0	0.42	9.888 82	0.203 43	0.429 28	0.003 52	0.90	2.37	0.02	2.528	23	2.424	19	2.302	16				
PM311-01	397	347.0	0.87	10.765 41	0.238 36	0.472 80	0.003 40	0.90	1.14	0.01	2.504	27	2.503	21	2.496	15				
PM311-02	399	562.0	1.41	10.277 59	0.197 03	0.455 97	0.003 17	0.90	0.71	0.01	2.486	23	2.460	18	2.422	14				
PM311-03	607	705.0	1.16	11.031 67	0.171 90	0.491 11	0.003 12	0.90	0.86	0.01	2.481	18	2.526	15	2.575	13				
PM311-04	366	302.0	0.82	10.860 13	0.159 56	0.490 81	0.003 78	0.90	1.21	0.01	2.458	15	2.511	14	2.574	16				
PM311-05	547	239.0	0.44	11.495 95	0.134 42	0.491 43	0.003 74	0.90	2.29	0.02	2.550	10	2.564	11	2.577	16				
PM311-06	448	827.0	1.84	11.388 67	0.170 79	0.490 56	0.005 83	0.90	0.54	0.01	2.541	12	2.555	14	2.573	25				
PM311-07	538	370.0	0.69	8.525 99	0.114 01	0.397 91	0.002 98	0.90	1.45	0.01	2.406	27	2.289	12	2.159	14				
PM311-08	360	307.0	0.85	10.596 79	0.106 16	0.475 26	0.003 33	0.90	1.17	0.01	2.471	8	2.488	9	2.507	15				
PM311-09	407	278.0	0.68	10.093 25	0.120 32	0.455 98	0.005 47	0.90	1.46	0.01	2.460	9	2.443	11	2.422	24				
PM311-10	588	316.0	0.54	9.296 99	0.114 30	0.445 80	0.003 95	0.90	1.86	0.02	2.356	10	2.368	11	2.377	18				
PM311-11	180	169.0	0.94	10.665 30	0.141 45	0.474 15	0.003 71	0.90	1.06	0.01	2.484	12	2.494	12	2.502	16				

续表 2

分析点	U <sup>238</sup>		Th <sup>232</sup>		Th/U		206Pb/238U		207Pb/235U		pr	238U/232Th		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U	
	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s	值	1s		值	1s	值	1s	值	1s	值	1s
PM311-12	218	184.0	184.0	0.84	10.770 43	0.128 15	0.475 74	0.004 19	0.90	1.18	0.01	2.497	10	2.504	11	2.509	18		
PM311-13	677	942.0	942.0	1.39	11.782 85	0.148 38	0.490 46	0.004 24	0.90	0.72	0.01	2.592	10	2.587	12	2.573	18		
PM311-14	449	325.0	325.0	0.72	11.353 13	0.103 56	0.490 81	0.004 01	0.90	1.38	0.01	2.533	7	2.553	9	2.574	17		
PM311-15	1 282	342.0	342.0	0.27	10.494 86	0.101 67	0.464 39	0.002 83	0.85	3.74	0.04	2.496	20	2.479	9	2.459	12		
PM311-16	411	291.0	291.0	0.71	9.559 09	0.261 69	0.422 80	0.004 78	0.89	1.41	0.01	2.497	51	2.393	25	2.273	22		
PM311-17	588	235.0	235.0	0.40	10.666 22	0.105 60	0.460 67	0.003 18	0.89	2.51	0.03	2.537	21	2.494	9	2.443	14		
PM311-18	609	278.0	278.0	0.46	9.953 40	0.104 88	0.439 86	0.003 28	0.89	2.19	0.02	2.499	22	2.430	10	2.350	15		
PM311-19	529	242.0	242.0	0.46	9.521 61	0.133 41	0.418 76	0.003 61	0.90	2.19	0.02	2.507	28	2.390	13	2.255	16		
PM311-20	271	264.0	264.0	0.98	10.653 06	0.117 40	0.455 18	0.003 59	0.90	1.02	0.01	2.547	9	2.493	10	2.418	16		
PM311-21	311	266.0	266.0	0.86	11.109 76	0.116 93	0.475 07	0.003 53	0.90	1.17	0.01	2.543	9	2.532	10	2.506	15		
PM204-1	367	231.0	231.0	0.63	11.573 99	0.100 89	0.500 69	0.003 93	0.90	1.59	0.02	2.521	7	2.571	8	2.617	17		
PM204-2	400	247.0	247.0	0.62	10.919 37	0.096 72	0.486 12	0.003 26	0.90	1.62	0.02	2.473	7	2.516	8	2.554	14		
PM204-3	420	343.0	343.0	0.82	10.443 39	0.104 31	0.462 63	0.004 57	0.90	1.22	0.01	2.487	8	2.475	9	2.451	20		
PM204-4	1 689	1 438.0	1 438.0	0.85	12.623 01	0.087 10	0.526 85	0.003 23	0.90	1.18	0.01	2.582	5	2.652	6	2.728	14		
PM204-5	192	420.0	420.0	2.18	9.800 47	0.331 45	0.438 14	0.006 44	0.95	0.46	0.01	2.479	64	2.416	31	2.342	29		
PM204-6	2 025	2 172.0	2 172.0	1.07	7.355 68	0.163 64	0.323 36	0.006 51	0.90	0.93	0.01	2.494	17	2.156	20	1.806	32		
PM204-7	3 003	173.0	173.0	0.06	10.989 70	0.070 58	0.501 15	0.003 04	0.90	17.35	0.17	2.437	5	2.522	6	2.619	13		
PM204-8	1 189	361.0	361.0	0.30	10.630 89	0.087 43	0.462 24	0.002 92	0.90	3.29	0.03	2.526	18	2.491	8	2.449	13		
PM204-9	693	358.0	358.0	0.52	11.135 07	0.115 31	0.480 80	0.004 58	0.90	1.93	0.02	2.533	8	2.534	10	2.531	20		
PM204-10	551	534.0	534.0	0.97	9.550 39	0.105 52	0.424 72	0.003 84	0.90	1.03	0.01	2.486	8	2.392	10	2.282	17		
PM204-11	2 465	1 124.0	1 124.0	0.46	6.979 45	0.054 74	0.323 98	0.002 27	0.90	2.19	0.02	2.411	6	2.109	7	1.809	11		
PM204-12	899	156.0	156.0	0.17	9.961 12	0.089 19	0.440 85	0.003 78	0.90	5.76	0.06	2.492	7	2.431	8	2.354	17		
PM204-13	182	379.0	379.0	2.09	10.766 34	1.066 06	0.422 41	0.012 81	0.94	0.48	0.01	2.697	177	2.503	92	2.271	58		
PM204-14	2 852	171.0	171.0	0.06	9.903 23	0.171 89	0.445 29	0.007 17	0.9	16.65	0.17	2.463	13	2.426	16	2.374	32		
PM204-15	2 597	567.0	567.0	0.22	10.642 16	0.115 77	0.460 69	0.004 76	0.9	4.58	0.05	2.529	8	2.492	10	2.443	21		
PM204-16	578	248.0	248.0	0.43	13.314 90	0.151 76	0.560 86	0.005 58	0.9	2.33	0.02	2.575	9	2.702	11	2.870	23		
PM204-17	133	405.0	405.0	3.04	10.255 24	0.587 58	0.435 89	0.009 08	0.95	0.33	0.01	2.564	105	2.458	53	2.332	41		
PM204-18	229	322.0	322.0	1.41	9.412 29	0.435 52	0.411 69	0.005 11	0.92	0.71	0.01	2.516	83	2.379	42	2.223	23		
PM204-19	844	637.0	637.0	0.75	10.069 90	0.225 27	0.442 03	0.004 50	0.91	1.33	0.01	2.510	42	2.441	21	2.360	20		
PM204-20	197	316.0	316.0	1.60	9.963 15	0.203 50	0.449 56	0.003 57	0.90	0.62	0.01	2.457	24	2.431	19	2.393	16		
PM204-21	372	152.0	152.0	0.41	10.173 18	0.248 11	0.462 81	0.003 50	0.90	2.46	0.02	2.442	31	2.451	23	2.452	15		

注:测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室,2008年。

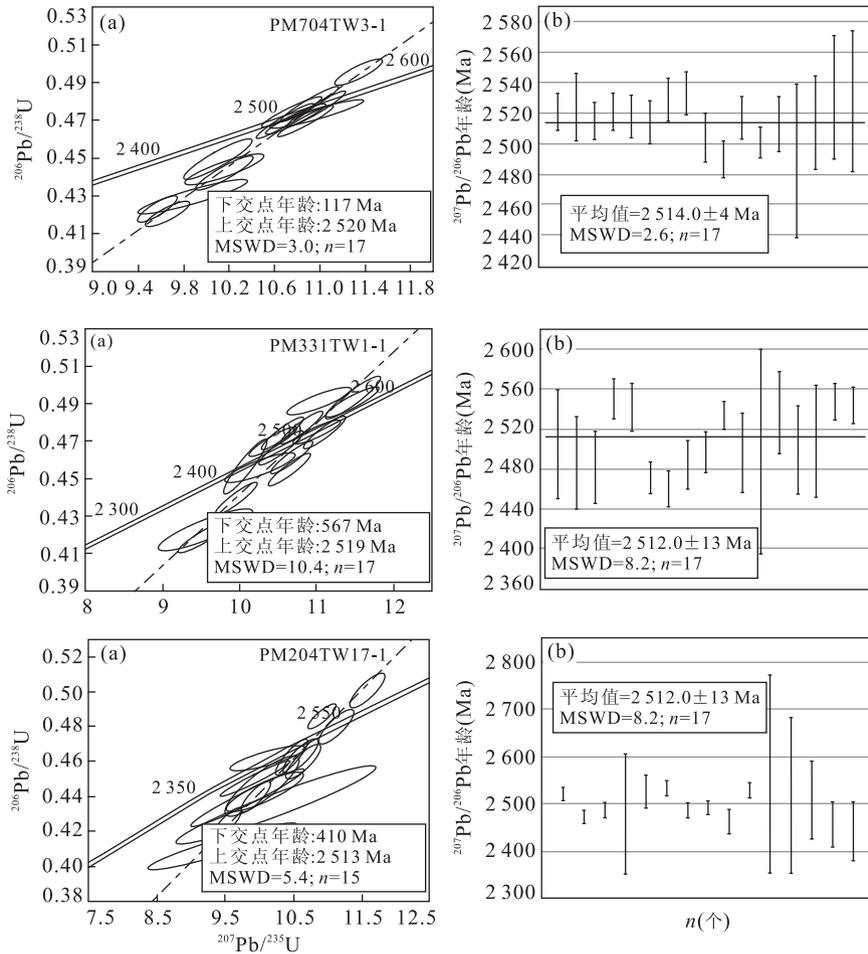


图 6 固阳地区变质侵入岩锆石 U-Pb 一致曲线(a)及年龄分布(b)

Fig. 6 U-Pb concordia diagram for zircons from the metamorphic intrusive rocks in Guyang area (a) and weighted average of U-Pb isotopic age (b)

权平均年龄为  $2500 \pm 19$  Ma (MSWD=5.6), 在误差范围内与所有点获得的非一致线的上交点年龄一致(图 6). 因此, 该岩石岩浆结晶年龄约为 2500 Ma.

## 4 讨论及结论

研究区所处大地构造背景在太古宙—古元古代漫长的地质历史中, 经历了由初始陆核—陆核增长扩大—陆核固结的全过程, 即华北地块结晶基底的形成过程. 新太古代晚期, 构造应力场发生逆转, 由伸展变为挤压, 可能的洋壳俯冲消亡, 色尔腾山岩群褶皱回返, 大量的以英云闪长质成分为主的 TTG 岩浆侵位, 即在本区发现大量新太古代变质侵入岩(代芳华, 2009). 这与新太古代变质侵入岩于特殊构造背景下形成, 为古老地块裂解、焊接活动的产物(陶继雄, 2003)的观点相一致, 主要依据如下:

(1) 新太古代变质侵入岩总体是由斜长角闪岩—闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩组成的从基性到中酸性的较完整演化系列, 为富钠高铝钙碱性系列岩石, 属新太古代 TTG 岩系(套)的一部分.

(2) 在  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别图解上(图 7), 大多数样品投点位于板块碰撞前与同碰撞花岗岩区, 且从早到晚有由碰撞前向同碰撞花岗岩过渡的趋势.

(3) 本区太古代 TTG 岩套的地质特征及地球化学特征更支持了铁镁质地壳(斜长角闪岩、石榴斜长角闪岩或榴辉岩)不同程度的熔融. 闪长岩、石英闪长岩和英云闪长岩均落入太古代 TTG 岩套稀土分布范围, 为石榴斜长角闪岩和榴辉岩部分熔融产物. 太古宙地壳具有高的热流值, 铁镁质地壳的部分熔融, 具温度、压力条件下产生 TTG 岩浆并上侵就位, 并携带少量深部包体.

(4) 区域上, 新太古代变质侵入岩与新太古代色

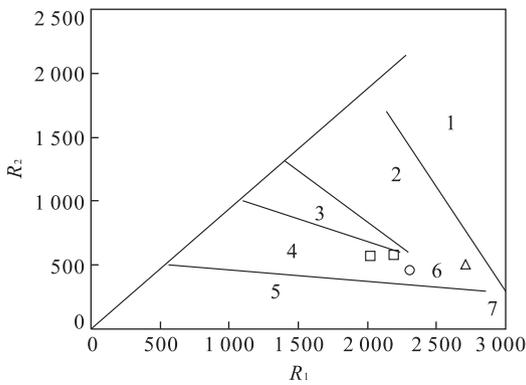


图7 固阳地区变质侵入岩  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别

Fig. 7  $R_1$ - $R_2$  from metamorphic intrusion in Guyang area

1. 幔源花岗岩; 2. 板块碰撞前的; 3. 碰撞后的抬升; 4. 造山晚期的; 5. 非造山的; 6. 同碰撞期的; 7. 造山期后的; ○为花岗闪长岩; □为石英闪长岩; △为二长花岗岩

尔腾山岩群共同构成呈带状展布的花岗—绿岩带。以该侵入岩带为界, 南北两侧变质岩石中的构造线方向明显不一致, 证实了该侵入岩带所处的构造位置的特殊性, 为本区古陆核裂解时下地壳部分熔融而形成(陶继雄, 2003)。新太古代变质侵入岩为古老地块裂解、焊接活动的产物, 对其确定对研究华北地块北缘太古宙地壳演化有重要意义。

研究区野外资料显示, 新太古代变质侵入岩与新太古代色尔腾山岩群相伴而生, 并有前者侵入后者的特点, 故利用激光等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行锆石 U-Pb 定年, 获得斜长角闪岩的加权平均年龄为  $2\ 514 \pm 6.5$  Ma (MSWD=2.6); 片麻状二长花岗岩的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2\ 512 \pm 13$  Ma (MSWD=8.2); 二长花岗岩的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2\ 500 \pm 19$  Ma (MSWD=5.6)。上述年龄较好地限制了该变质岩系的形成时代(2 500~2 520 Ma), 属于新太古代晚期。由于 25 Ga 末的大规模花岗岩侵位是太古宙与元古宙分界的主要岩相学和年代学标志(翟明国, 2006), 因此该区变质侵入岩也成为该区地层划分的一个重要依据。

另外, 一些前人的研究资料表明: 研究区中新元古代华北地块北缘发生强烈造山运动和岩浆活动, 北缘存在一条巨大的新元古代陆缘碰撞造山带, 是新元古代时期 Rodinia 超大陆拼合的主要事件。华北地块北部在古生代大陆边缘增生, 早古生代是板块活动的一个非常重要的时期, 它记录了研究区早古生代古板块活动的历史(代芳华, 2009)。李景春等(2003, 2004)认为形成年龄为 2 400~2 500 Ma 的色尔腾地区白彦花斜长花岗岩岩体出现表明色尔腾

地区在华北古陆块初始地壳发展的基础上, 于新太古代沿古陆块边缘深部出现了热点, 新太古代侵入岩可能正是在这种背景下由热点处底侵熔融而形成, 同时也可能代表了华北古陆增生的一种方式。本次测试获得 U-Pb 不一致曲线的下交年龄(410~576 Ma), 代表着引起 Pb 从矿物中丢失的热事件的时间, 即在早古生代, 华北地台应祁连山褶皱带的闭合而向南增生。这也从年代学方面证实了华北地台增生对本区新太古代侵入岩的热力学影响。

致谢: 本次研究能够得以顺利完成, 得到甘肃省地矿局第三地质勘察院地质工程师曾俊杰和齐建宏提供的大力支持, 在此表示由衷的感谢。

## References

- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S., et al., 2001. Two Ages of Porphyry Intrusion Resolved for the Super-Giant Chuquibambilla Copper Deposit of Northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, 29 (5): 383-386.
- Condie, K. C., 1989. Plate Tectonics and Crustal Evolution. Pergamon, Oxford.
- Dai, F. H., 2009. Geochemistry Characteristics and Geochronology of Neoproterozoic Metamorphic Intrusives in Guyang Region, Inner Mongolia (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Didier, J., Duthou, J. L., Lameyre, J., 1982. Mantle and Crustal Granites: Genetic Classification of Orogenic Granites and the Nature of Their Enclaves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14 (1-2): 125-132. doi:10.1016/0377-0273(82)90045-2
- He, Y. K., Wu, T. R., Luo, H. L., et al., 2010. Late Archean Continent-Continent Collision Event of Middle Segment of North Margin of North China Plate: Evidence from S-Type Granite of Hejiao Area. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(4): 571-580 (in Chinese with English abstract).
- Horn, I., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., 2000. Precise Elemental and Isotope Ratio Determination by Simultaneous Solution Nebulization and Laser Ablation-ICP-MS: Application to U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 164 (3-4): 281-301. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00168-0
- Jian, P., Zhang, Q., Liu, D. Y., et al., 2005. SHRIMP Dating and Geological Significance of Late Achaean High-Mg Diorite (Sanukite) and Hornblende-Granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1):

- 151—157 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. C., Zhao, A. L., Wang, L., et al., 2003. U-Pb Isotope Zircon Age of Baiyanhua Plagiogranite in Seerteng Area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 225—228 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. C., Zhao, A. L., Wang, L., et al., 2004. Disintegration of Seertengshan Group and Characteristics of the Protholith. *Northwestern Geology*, 37(1): 74—80 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 1991. ISOPLOT: a Plotting and Regression Program for Radiogenic-Isotope Data. *US Geological Survey Open-File Report*, 39: 91—445.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid; Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1—2): 1—24. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345.
- Tao, J. X., 2003. Characteristics of Neoarchean Metamorphic Intrusives and the Relationship with the Mineralization of Gold in Guyang Region, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 26(1): 21—26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. M., Li, M. J., Cheng, S. H., 2012. Gelingyao High-Cr Granite (Closepet-Like) in Shangyi: New Evidence of Late-Archean Suture Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1037—1043 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircons and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1605 (in Chinese).
- Xu, W. C., Zhang, H. F., Liu, X. M., 2007. U-Pb Dating and Geological Significance of Metamorphic Rock Series in Qilian Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 52(10): 1174—1181 (in Chinese).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Geostan. Geoanal. Res.*, 28(3): 353—370.
- Zhai, M. G., 2006. Geological Significance of the Neoarchean Global Cratonization Event and the Boundary between Archean and Proterozoic. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 419—421 (in Chinese).
- Zhang, W. J., Li, L., Geng, M. S., 2000. Petrology and Dating of Neo-Archean Intrusive Rocks from Guyang Area, Inner Mongolia. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 221—226 (in Chinese with English abstract).

## 附中中文参考文献

- 代芳华, 2009. 内蒙固阳地区变质侵入岩地球化学特征及年代学研究. 武汉: 中国地质大学.
- 贺元凯, 吴泰然, 罗红玲, 等, 2010. 华北板块北缘中段新太古代的陆—陆碰撞事件: 来自合教 S 型花岗岩的证据. 北京大学学报(自然科学版), 46(4): 571—580.
- 简平, 张旗, 刘敦一, 等, 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩(Sanukite)一角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. 岩石学报, 21(1): 151—157.
- 李景春, 赵爱林, 王力, 等, 2003. 内蒙古色尔腾地区白彦花斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄. 岩石矿物学杂志, 22(3): 225—228.
- 李景春, 赵爱林, 王力, 等, 2004. “色尔腾山群”的解体及其原岩特征. 西北地质, 37(1): 74—80.
- 陶继雄, 2003. 内蒙固阳地区新太古代变质侵入岩特征及与成矿关系. 地质调查与研究, 26(1): 21—26.
- 王仁民, 李孟江, 程素华, 2012. 尚义葛令天高铬花岗岩(Closepet-Like)一新太古代古缝合带的新证据. 岩石学报, 28(4): 1037—1043.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1605.
- 徐旺春, 张宏飞, 柳小明, 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. 科学通报, 52(10): 1174—1181.
- 翟明国, 2006. 新太古代全球克拉通事件与太古宙—元古宙分界的地质涵义. 大地构造与成矿学, 30(4): 419—421.
- 张维杰, 李龙, 耿明山, 2000. 内蒙古固阳地区新太古代侵入岩的岩石特征及时代. 地球科学——中国地质大学学报, 25(3): 221—226.