

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.198



扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义

邱啸飞^{1,2}, 杨红梅^{1,2}, 赵小明², 卢山松^{1,2}, 江拓^{1,2}, 段瑞春^{1,2},
刘重芄^{1,2}, 彭练红², 魏运许²

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 同位素地球化学研究室, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局, 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北武汉 430205

摘要:以崆岭杂岩中新太古代花岗片麻岩为研究对象, 系统研究了其锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学特征, 并对其岩石成因和扬子陆核~3.0~2.6 Ga 构造演化过程进行了初步探讨。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果表明, 花岗片麻岩形成年龄为 $2\,673 \pm 39$ Ma, 且遭受了古元古代($2\,042 \pm 27$ Ma) 的高压麻粒岩相变质作用。地球化学研究表明, 该套花岗片麻岩富 Si, 贫 Mg、Cr、Ni, 具有 Eu、Sr 和高场强元素的负异常。花岗片麻岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 $-1.9 \sim -0.1$ 之间变化, 对应两阶段 Nd 同位素模式年龄为 3.15~3.01 Ga, 锆石饱和温度为 789~825 °C, 显示岩体可能形成于初生长英质地壳物质在后碰撞伸展构造背景高温条件下部分熔融。结合前人已有的研究成果, 认为以崆岭杂岩为代表的扬子陆核可能完整记录了~2.9~2.6 Ga 板块俯冲—碰撞—后碰撞与造山作用相关的完整过程。

关键词:新太古代; 花岗片麻岩; 崆岭杂岩; 岩石; 构造意义。

中图分类号: P588.1; P597

文章编号: 1000-2383(2019)02-0415-12

收稿日期: 2018-12-23

Neoproterozoic Granitic Gneisses in the Kongling Complex, Yangtze Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications

Qiu Xiaofei^{1,2}, Yang Hongmei^{1,2}, Zhao Xiaoming², Lu Shansong^{1,2}, Jiang Tuo^{1,2}, Duan Ruichun^{1,2},
Liu Chongpeng^{1,2}, Peng Lianhong², Wei Yunxu²

1. *Isotope Geochemistry Laboratory, Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China*

2. *Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China*

Abstract: This study carries out systematical geochronological and whole-rock geochemical investigations for the Neoproterozoic granitic gneisses of the Kongling complex, and discusses the petrogenesis and ~3.0–2.6 Ga tectonic evolution of the nucleus of the Yangtze craton. The zircon LA-ICP-MS U-Pb dating reveals that the gneisses were crystallized at $2\,673 \pm 39$ Ma, and experienced high-pressure granulite-facies metamorphism at $2\,042 \pm 27$ Ma. The geochemical study illustrates an enrichment of Si and depletions of Mg, Cr and Ni, as well as negative anomalies of high field strength elements, Eu and Sr. The $\epsilon_{Nd}(t)$ values of the gneisses vary between -1.9 to -0.1 and the corresponding two-stage Nd isotopic model ages range from 3.15–3.01 Ga, combined with their relatively high calculated zircon saturation temperature (789–825 °C), indicating that the Kongling Neoproterozoic gneisses might have formed by partial melting of juvenile felsic crustal materials under a high-temperature condition in the post-collisional extensional tectonic setting. Combined with the documented work, it is suggested that the nucleus of the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41303026, 41530104); 中国地质调查局地质调查项目 (Nos. 121201004000161412, 121201009000160902)。

作者简介: 邱啸飞 (1985–), 男, 副研究员, 博士, 主要从事同位素地球化学和岩石地球化学研究。ORCID: 0000-0001-8724-6318. E-mail: qiuxiaofei@geochemist.cn

引用格式: 邱啸飞, 杨红梅, 赵小明, 等, 2019. 扬子克拉通崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩成因及其构造意义. 地球科学, 44(2): 415–426.

Yangtze craton, represented by the Kongling complex, may fully record an $\sim 2.9-2.6$ Ga orogenic-related event including earlier stage of oceanic slab subduction, middle stage of arc (or continent)-continent collision, and later stage of post-collisional extension.

Key words: Neoproterozoic; granitic gneisses; Kongling complex; rock; tectonic implications.

0 引言

新太古代是克拉通固化、成形及陆壳生长的重要时期(Bradley, 2011). 扬子克拉通是我国东部最重要的前寒武纪块体之一, 了解其早期形成与构造演化对充分认识我国大陆地壳组成、构造格局演变乃至全球前寒武纪构造过程均具有重要意义. 然而, 由于新元古代以来巨厚沉积盖层以及植被覆盖, 使得太古宙地质体在扬子克拉通出露范围非常有限, 导致对扬子克拉通前寒武纪早期地质事件的研究程度远低于邻近的华北克拉通, 一些关键地质问题, 如其基底组成、规模以及大陆地壳增生过程等均未完全清楚.

目前, 扬子克拉通中最古老的太古宙结晶基底岩系为湖北宜昌地区的崆岭杂岩(例如 Zhang *et al.*, 2006b; Gao *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2014, 2015). 过去数十年间, 前人对崆岭杂岩中 TTG 岩浆作用开展了大量年代学工作, 认为 TTG 岩浆作用主要集中于 $3.4\sim 2.9$ Ga (Qiu *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2014, 2015). 近年来, 随着高精度同位素年代学资料的不断积累, 一些新太古代的岩浆记录在崆岭杂岩中也陆续得以发现. 例如, Chen *et al.* (2013) 和 Guo *et al.* (2015) 分别在崆岭杂岩中识别出 $\sim 2.7\sim 2.6$ Ga 的正片麻岩(原岩为 A 型花岗岩或 I 型花岗岩)以及 $\sim 2.8\sim 2.6$ Ga 的二云母花岗岩和黑云母花岗岩等. 这些新太古代花岗岩类成为了解扬子陆核大规模 TTG 岩浆作用之后另一期太古宙末期侵入岩浆事件的理想地质单元. 然而, 相比区域上更广泛出露的 $3.0\sim 2.9$ Ga TTG 岩浆作用, 目前关于该期岩浆岩的成因及其地球动力学意义等均未获得较好约束, 制约了对扬子陆核新太古代时期构造演化的全面认识.

本文在近年来对该地区开展的野外地质调查基础上, 对崆岭杂岩中一套新太古代花岗岩片麻岩开展了锆石 U-Pb 同位素年代学、元素地球化学和 Nd 同位素示踪分析, 以期加深对这些岩石源区和成因的进一步认识. 结合前人和作者在崆岭杂岩基底中 $3.0\sim 2.6$ Ga 岩浆-变质事件的研究积累, 对该时间段扬子

克拉通核部的构造演化过程进行了初步探讨.

1 区域地质概况

扬子克拉通基底大部分被元古宙以来地层覆盖. 到目前为止, 零星出露的太古宙岩石仅报道于克拉通北部的崆岭杂岩、杨坡杂岩、黄土岭麻粒岩、鱼洞子群、后河杂岩以及陡岭杂岩等有限地区(Gao *et al.*, 1999; Qiu *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006b; Liu *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008, 2012, 2014; Wang *et al.*, 2013a, 2013b; Guo *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2017).

崆岭杂岩作为目前已知的扬子克拉通最古老结晶基底, 其主要由太古宙-古元古代花岗片麻岩、古元古代变沉积岩(孔兹岩系)以及少量斜长角闪岩、基性麻粒岩构成(Gao *et al.*, 1999; 邱啸飞等, 2016). 前人研究表明, 崆岭杂岩中 TTG 片麻岩主要形成于 $\sim 3.4\sim 2.9$ Ga (Qiu *et al.*, 2000; Jiao *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2014, 2015), 斜长角闪岩则主要形成于 $\sim 3.0\sim 2.7$ Ga (Ling *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2009; 魏君奇和景明明, 2013; Li *et al.*, 2014). 崆岭杂岩随后被大量新太古代-新元古代花岗岩类和基性岩墙所侵入(Peng *et al.*, 2009; Xiong *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2012; Yin *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2013a, 2013b; Li *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2015; 邱啸飞等, 2015), 并经历了 $\sim 2.0\sim 1.9$ Ga 的麻粒岩相-角闪岩相变质作用(Ling *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2006a; Wu *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2013; 邱啸飞等, 2016) (图 1).

最近的研究表明, 崆岭杂岩中还侵入一系列新太古代花岗岩类, 多呈岩株状零星出露. 本文所研究样品为一套花岗片麻岩, 主要采自崆岭地区雾股公路剖面, 野外局部可见多条基性岩脉穿插侵入到该套片麻岩中(图 2a). 研究样品主要呈灰白色, 片麻状构造、中细粒结构(图 2b), 主要矿物组合为石英、斜长石、钾长石和黑云母, 副矿物包括磁铁矿、锆石和榍石等, 部分样品存在较为明显的变质变形特点.

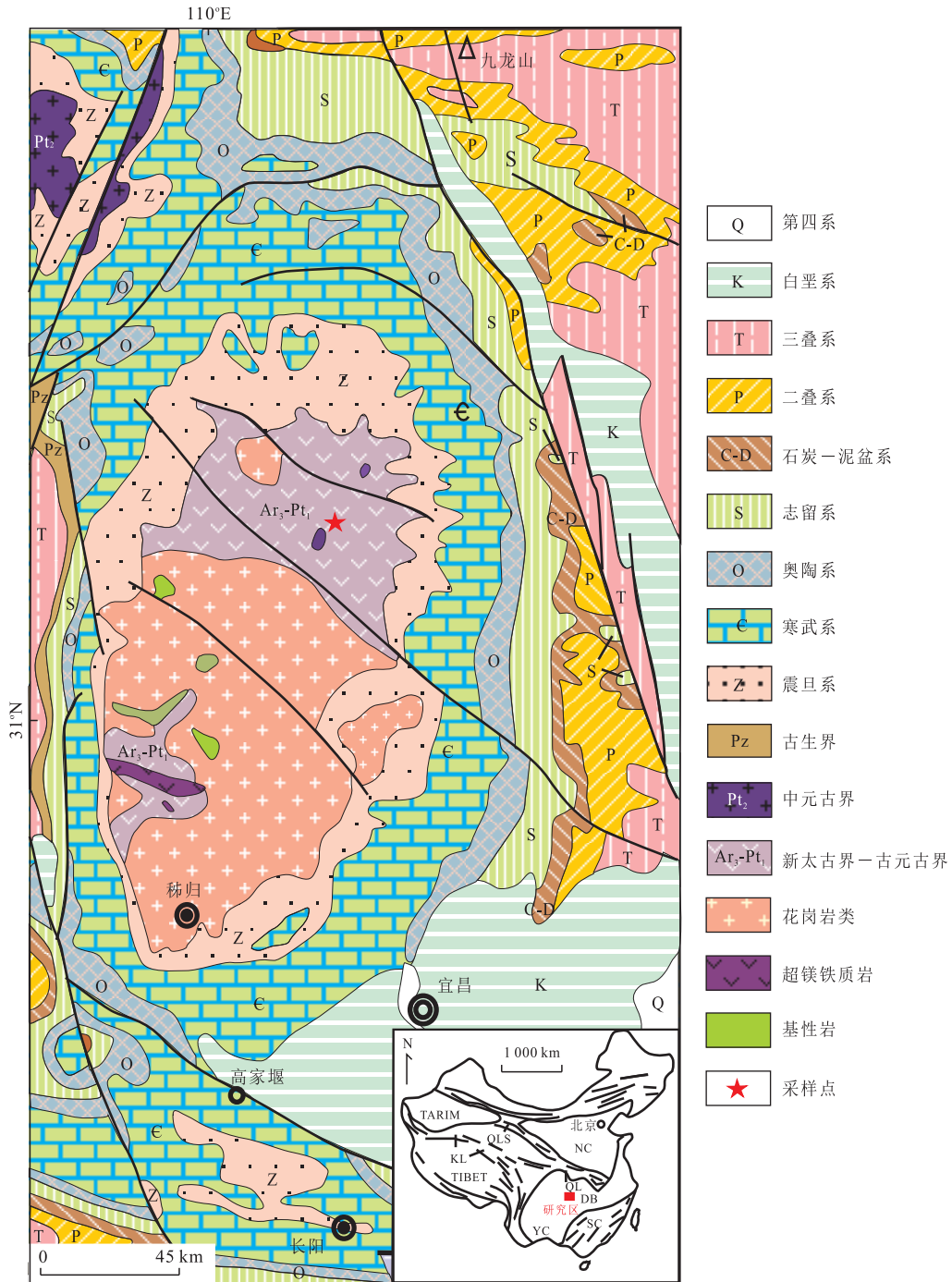


图 1 崮岭地区地质简图及采样位置

Fig.1 Sketch geological map of the study area in the Kongling region and sampling locations

据 Liu et al.(2008)修改

2 分析方法

样品的锆石分选由河北省地质矿产勘查局物化探区域地质调查院采用重磁法分选完成,样品经过破碎、淘洗和重液分离后再进行电磁分离,最后于双目镜下人工挑选出代表性锆石颗粒,将待测锆石颗

粒制成环氧树脂靶,磨至锆石颗粒中心部位后抛光和喷碳,进行阴极发光(CL)照相以确定锆石颗粒的内部结构来选择合适的锆石区域进行 U-Pb 锆石年龄测定.锆石的 CL 显微结构照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室配备有 Gatan CL3+型 CL 探头的 Quanta 400FEG 电子探针仪上完成.锆石的 U-Pb 年龄测定也在西北大学大陆动力学国家重点



图 2 崆岭地区新太古代花岗片麻岩(a)野外及(b)手标本照片

Fig.2 (a) Field outcrop of the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses; (b) Hand sample of the granitic gneisses showing foliated structure

实验室测定.测试仪器为装配 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 Agilent 7500a 型 ICP-MS 联机.实验中激光束斑直径为 $32\ \mu\text{m}$.详细的仪器参数与测试方法见 Yuan *et al.* (2004).锆石 U-Pb 同位素组成原始数据采用 ICPMSDataCal 软件(ver.7.2)进行处理(Liu *et al.*, 2010).国际锆石标样 91500 作为外部标准来分析 U-Pb 同位素,NIST SRM610 作为外部标准来测定元素含量.单个数据点误差为 1σ ,年龄加权平均值误差为 2σ .锆石加权平均年龄计算以及谐和图的绘制均采用 ISOPLOT 程序完成(Ludwig, 2003).

样品全岩的主量、微量元素和 Sm-Nd 同位素分析均在自然资源部中南矿产资源监督检测中心完成.主量元素用 X 荧光光谱法(XRF)测试,仪器为 PANalytical 公司生产的 AXIOS 型 X 荧光光谱仪,精度优于 5%.微量元素测试仪器为 ThermoFisher 公司生产的 X-Series II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS).数据质量通过国家标准物质 GSR-2、GSR-3、GSR-4、GSR-5、GSR-6 和 GSR-14 监测,多数元素分析精度优于 5%,部分过渡族元素精度优于 10%.样品 Sm-Nd 同位素测定采用稀释剂-热电离质谱(ID-TIMS)方法完成.分析过程中采用标准物质 GBW04419、BCR-2 以及 ZkbnNd (JMC) 分别对全流程和测试仪器进行监控.获得的国家标准物质 GBW04419、国际标准样品 BCR-2 以及溶液标准 ZkbnNd (JMC) 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm、Nd 含量值均与各自推荐值在误差范围内一致.Sm、Nd 含量以及 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值误差优于 5%, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值单次测量分析精度优于 10^{-5} ,全流程实验 Sm、Nd 本底分别为 7×10^{-11} 和 9×10^{-11} .全岩样品微量元素和 Sm-Nd 同位素测试方法流程均见 Qiu *et al.* (2015).

3 分析结果

3.1 崆岭地区新太古代花岗片麻岩中锆石的 U-Pb 年龄和稀土元素组成

用于定年的样品(12ZG-47)中代表性锆石的 CL 图像和 U-Pb 年龄图分别见图 3 和图 4,锆石 U-Pb 同位素分析数据见表 1.大多数锆石颗粒为自形到半自形,CL 图像显示样品中锆石可大致分为两类;其中第一类锆石具有较为明显的振荡环带,部分锆石还同时存在较窄的亮边;而另一类锆石则无振荡环带(图 3).

利用 LA-ICP-MS 选取两类代表性锆石进行了共计 13 个点的 U-Pb 同位素年龄分析,其中 8 个点位于第一类锆石区域,而另外 5 个点位于第二类锆

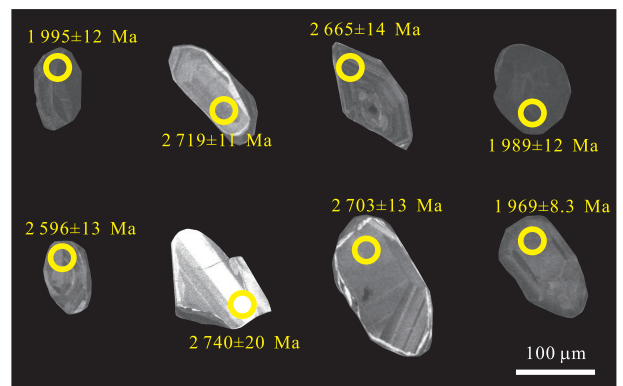


图 3 崆岭地区新太古代花岗片麻岩锆石阴极发光照片及代表性锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄

Fig.3 CL images of typical zircon grains from the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses showing grain size and locations of analytical spots with corresponding apparent $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages

表 2 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩锆石稀土元素组成

Table 2 LA-ICP-MS REE (10^{-6}) compositions of zircons crystals for the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
12ZG-47-6	1.01	39.40	1.83	14.4	14.30	2.73	55.5	19.6	243.0	94.3	431.0	89.40	798.0	148.00
12ZG-47-7	0.28	23.20	0.37	3.56	9.05	2.43	56.8	20.1	241.0	91.0	407.0	83.60	775.0	160.00
12ZG-47-8	0.09	23.00	0.22	2.63	8.61	3.48	53.6	18.7	217.0	82.4	351.0	70.00	624.0	125.00
12ZG-47-10	0.01	38.90	0.08	1.55	5.71	0.52	42.8	17.5	225.0	91.4	425.0	89.90	840.0	164.00
12ZG-47-12	0.07	39.80	0.21	4.54	10.40	3.56	63.1	23.8	274.0	106.0	479.0	103.00	963.0	196.00
12ZG-47-13	0.06	12.00	0.22	2.54	5.92	2.21	35.5	12.3	131.0	46.1	192.0	38.70	355.0	71.40
12ZG-47-16	0.00	45.90	0.07	2.31	7.01	0.96	53.0	20.7	262.0	103.0	491.0	102.00	971.0	193.00
12ZG-47-18	0.00	11.80	0.09	2.52	6.86	2.36	42.5	13.9	154.0	54.3	226.0	46.20	418.0	84.40
12ZG-47-14	0.01	2.27	0.07	0.79	5.62	0.10	44.3	12.1	73.7	14.1	33.7	4.80	34.6	7.55
12ZG-47-11	0.00	1.86	0.08	1.65	13.80	0.32	97.5	25.7	130.0	18.3	32.7	4.07	22.7	3.49
12ZG-47-15	0.49	1.54	0.05	1.45	7.98	0.34	68.6	19.1	106.0	15.2	25.5	2.28	11.8	1.95
12ZG-47-19	0.11	3.03	0.17	1.68	9.09	0.67	63.5	18.3	128.0	25.5	67.1	8.64	59.0	10.10
12ZG-47-20	0.06	1.51	0.04	0.23	4.69	0.28	43.6	16.2	123.0	24.8	68.3	9.58	66.2	11.20

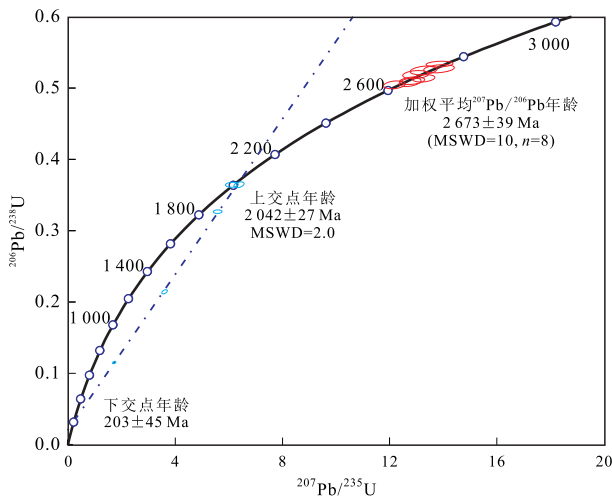


图 4 崆岭地区新太古代花岗片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagram for zircons from the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

石区域,所分析的第一类锆石均为谐和锆石,而第二类锆石则多为不谐和锆石.第一类锆石分析点的 Th、U 含量分别为 $(139\sim 558)\times 10^{-6}$ 和 $(285\sim 879)\times 10^{-6}$, 对应 Th/U 比值为 0.21~0.63, 表明其为岩浆成因锆石, 8 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围为 2 596~2 740 Ma, 加权平均年龄为 $2\ 673\pm 39$ Ma, 这一年龄值应代表了该套片麻岩的结晶年龄; 与第一类锆石明显不同, 第二类锆石具有明显相对较高的 U 含量 $(2\ 173\times 10^{-6}\sim 4\ 838\times 10^{-6})$ 和较低的 Th/U 比值 (0.01~0.06), 显示出变质锆石特点, 所分析的 5 颗代表性锆石多为不谐和锆石, 可能是由于其高 U 含量所致. 5 个点构成的不一致线上、下交点年龄分别为 $2\ 042\pm 27$ Ma 和 203 ± 45 Ma, 其

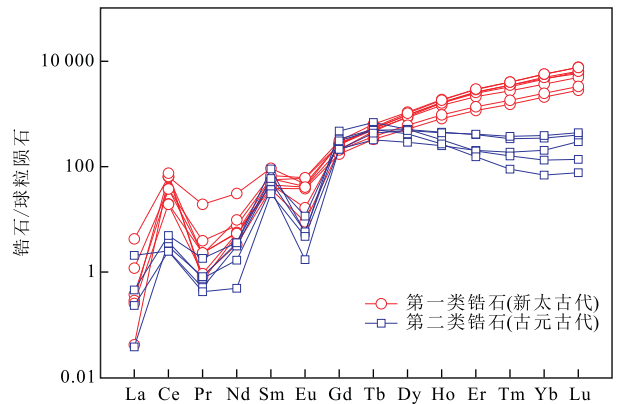


图 5 崆岭地区新太古代花岗片麻岩锆石稀土元素配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses
球粒陨石标准化数据 Sun and McDonough(1989)

不一致线上交点年龄应代表了变质锆石的形成年龄 (图 4).

花岗片麻岩中锆石的稀土元素含量组成见表 2. 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (图 5) 中, 两类锆石虽然都存在具有明显的正 Ce 异常和负 Eu 异常. 但第二类锆石相对于第一类锆石具有明显亏损的重稀土元素亏损特点, 这与在石榴子石和斜长石稳定共存的麻粒岩相变质条件下形成的锆石特点相一致 (Bingen *et al.*, 2004; 邱啸飞等, 2017), 揭示该套花岗片麻岩可能经历了古元古代高压麻粒岩相区域变质作用叠加.

3.2 崆岭地区新太古代花岗片麻岩的元素地球化学组成

新元古代花岗片麻岩的全岩地球化学特征见表 3. 花岗片麻岩具有高硅特点 (SiO_2 含量为 70.99%~

表 3 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩主量 (%) 及微量元素 (10^{-6}) 组成

Table 3 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

样品号	12ZG-47	12ZG-49	13SNJ111	13SNJ110	13SNJ104	13SNJ105
SiO ₂	72.97	72.35	70.99	71.68	71.00	71.67
TiO ₂	0.24	0.23	0.29	0.19	0.26	0.26
Al ₂ O ₃	13.57	14.28	14.74	15.35	14.02	14.28
Fe ₂ O ₃	3.60	3.12	3.78	2.10	2.95	3.42
MnO	0.03	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03
MgO	0.65	0.73	0.78	0.41	0.39	0.37
CaO	0.77	1.49	1.36	1.28	1.43	1.03
Na ₂ O	3.26	3.56	4.17	4.23	3.88	4.41
K ₂ O	4.70	4.13	3.56	4.25	4.74	3.98
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.05	0.13	0.06	0.07
LOI	0.02	-0.10	0.07	0.23	1.10	0.28
Total	99.84	99.84	99.85	99.85	99.86	99.80
Sc	4.56	4.75	5.89	3.60	2.19	2.32
V	8.94	12.5	13.9	8.17	14.9	19.3
Cr	33.7	12.7	13.9	11.8	25.0	16.6
Ni	6.67	15.6	4.59	3.92	5.81	4.85
Ga	46.6	46.1	19.4	22.5	23.1	24.7
Rb	130	86.8	83.8	108	119	68.0
Sr	214	204	376	247	243	289
Y	9.98	12.0	17.3	13.4	10.9	17.6
Zr	150	159	172	92.5	166	170
Nb	8.39	9.06	9.23	7.68	12.7	13.7
Cs	8.58	7.68	1.03	0.90	0.57	0.33
Ba	880	841	880	837	817	1 320
La	63.7	61.7	83.4	39.0	81.0	35.2
Ce	105	107	156	76.0	150	69.1
Pr	12.4	12.7	15.1	8.52	16.0	6.75
Nd	41.5	43.0	52.1	31.3	49.5	26.9
Sm	7.93	7.49	8.23	6.91	6.88	5.82
Eu	2.08	1.90	1.42	1.44	1.60	0.92
Gd	6.81	6.76	5.48	5.17	3.97	3.38
Tb	0.71	0.72	0.61	0.64	0.42	0.33
Dy	2.66	2.81	3.16	2.97	1.86	1.57
Ho	0.42	0.54	0.64	0.47	0.35	0.27
Er	1.05	1.59	1.74	1.01	0.90	0.71
Tm	0.16	0.23	0.26	0.14	0.11	0.10
Yb	0.94	1.49	1.70	0.76	0.77	0.60
Lu	0.13	0.19	0.24	0.11	0.12	0.09
Hf	5.00	5.26	5.59	2.68	5.82	6.06
Ta	0.55	0.73	0.67	0.50	0.96	1.03
Pb	46.2	15.9	47.0	42.9	22.9	24.6
Th	9.45	9.79	35.0	15.5	36.9	37.5
U	1.68	0.84	1.96	2.26	2.67	2.34

72.97%)、高碱(全碱含量 7.69%~8.62%)且低镁(MgO=0.37%~0.78%)特征.样品 ACNK 值介于 0.99 到 1.15 之间,总体显示出弱过铝质—强过铝质花岗岩特点.在 SiO₂—K₂O 图中,样品落入了高钾钙碱性—钾玄岩系列范畴(图 6a).在三长石分类图

解中,所有样品均落入花岗岩范围内(图 7).

微量元素上,片麻岩具有低 Cr ($11.9 \times 10^{-6} \sim 33.7 \times 10^{-6}$)、低 Ni ($3.92 \times 10^{-6} \sim 15.60 \times 10^{-6}$) 特点.所有样品 Nb/Ta 比值均小于原始地幔值 (~17.5).在稀土元素配分模式图中,所有样品均显示出轻重稀土元素明显分异特点,稀土元素配分模式整体呈右倾,并具有负 Eu 异常 ($Eu/Eu^* = 0.58 \sim 0.86$) (图 8a).在原始地幔标准化元素蛛网图中,片麻岩样品显示明显的 Sr、Ba、Ti 负异常且亏损高场强元素(Nb、Ta、P 等) (图 8b).

3.3 崆岭地区新太古代花岗片麻岩的 Sm-Nd 同位素组成

花岗片麻岩的 Sm-Nd 同位素组成列于表 4.采用其锆石年龄 2 673 Ma 来对样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和 Nd 同位素模式年龄进行计算.需要指出的是,由于所研究样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值(0.096 4~0.108 0),远低于大陆地壳平均值(0.118),故采用两阶段模式年龄来计算花岗片麻岩的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄 (T_{2DM}).计算结果显示,花岗片麻岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-1.9 \sim -0.1$,对应 T_{2DM} 年龄为 3.15~3.01 Ga.

4 岩石成因探讨及其构造背景

4.1 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩源区特点和岩石成因

崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩具有高 SiO₂ (70.99%~72.97%)、高 K₂O (3.56%~4.74%) 以及低 MgO (0.37%~0.78%)、Ni ($3.92 \times 10^{-6} \sim 15.60 \times 10^{-6}$) 和 Cr ($11.9 \times 10^{-6} \sim 33.7 \times 10^{-6}$) 特点,说明其不可能来自地幔岩石的直接熔融.此外,野外地质调查过程中在该套花岗片麻岩中并未发现变基性包体或斜长角闪岩团块,同时也未发现同时代斜长角闪岩与该套花岗片麻岩之间相互作用的证据,加之样品中极低的 MgO、Cr 和 Ni 含量,明显不同于壳幔混合成因花岗岩特点(曾认宇等, 2016; 曹正琦等, 2017),排除了花岗片麻岩的壳幔混合成因可能.花岗片麻岩样品的 ACNK 值相对较高,多数样品为强过铝质花岗岩,同样说明该套花岗片麻岩原岩应为壳源花岗岩体.值得注意的是,新太古代花岗片麻岩与崆岭杂岩基底岩系之间具有明显区别的 Nd 同位素特征,两者 T_{2DM} 分别为 ~3.2~3.0 Ga 和 ~3.9~3.5 Ga (Gao *et al.*, 1999),说明其源区可能为初生地壳物质而非古老基底.

花岗片麻岩样品具有相对高的 $(La/Yb)_N$

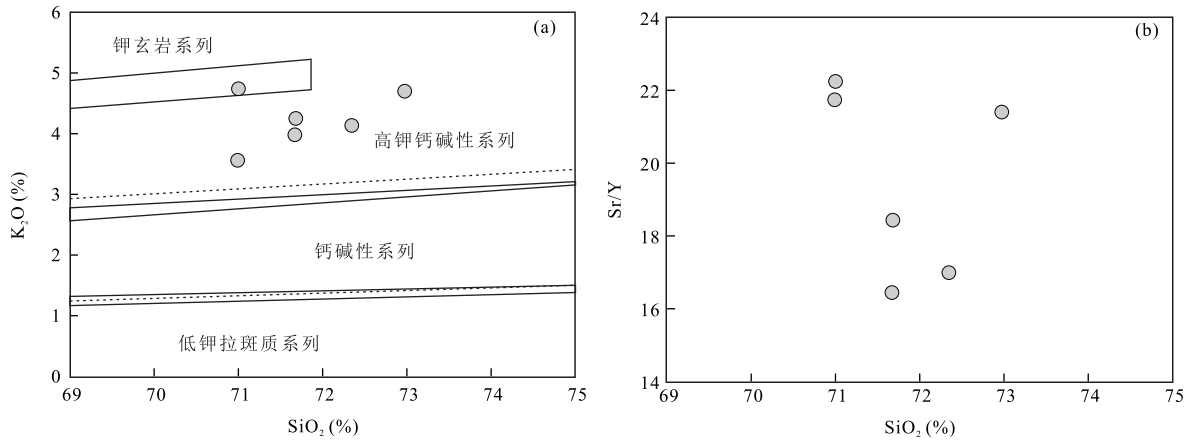


图 6 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩(a)SiO₂-K₂O 判别图;(b)SiO₂-Sr/Y 关系图

Fig.6 (a) K₂O and (b) Sr/Y versus SiO₂ diagram for the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

(29.7~75.5)、Sr/Y(16.4~22.2) 比值,表明熔体中可能存在石榴石和(或)角闪石的分离结晶作用,但其并非主要因素,因为角闪石或石榴石分离结晶过程均会导致熔体中 SiO₂ 值提高而使 SiO₂ 和 Sr/Y 比值之间呈明显正相关性 (Macpherson *et al.*, 2006),与花岗片麻岩样品 Sr/Y 与 SiO₂ 之间非负相关关系相矛盾(图 6b).同时,这些花岗片麻岩 SiO₂ 含量在较窄范围内变化,且样品之间具有相似的微量元素地球化学组成,同样排除了其地球化学特征主要为岩浆分异成因的可能.同时,在野外也未见同时代中一基性岩体与之共生.因此,崆岭地区新太古代花岗片麻岩的地球化学组成变化更可能主要继承自其地壳源区特点,而非岩浆混合和(或)分离结晶过程.

花岗岩类源区组成及熔融条件是解释其成因的两大关键因素.花岗片麻岩具有准铝质到强过铝质特点 (ACNK = 0.99 ~ 1.15),多数样品的 K₂O/Na₂O 比值 > 1,且具有较低的 P₂O₅ 含量,这种花岗岩特点的过铝质岩浆多被认为来自长英质变岩岩浆或杂砂岩部分熔融过程(例如 Förster *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2016).实验岩石学显示,过铝质花岗岩可通过地壳岩石在含水(或无水)条件下部分熔融形成(Conrad *et al.*, 1988; Watkins *et al.*, 2007).一般情况下,含水条件下形成的花岗质熔体在三长石分类图中更靠近英云闪长质和奥长花岗质端元,而无水条件下形成的花岗质熔体则更具富 K 趋势(图 7).此外,流体的加入往往容易使源区斜长石发生分解,因此在含水条件下形成的花岗质熔体通常不存在 Eu 的负异常或只具有较弱的 Eu 负异常(Weinberg and Hasalová, 2015).

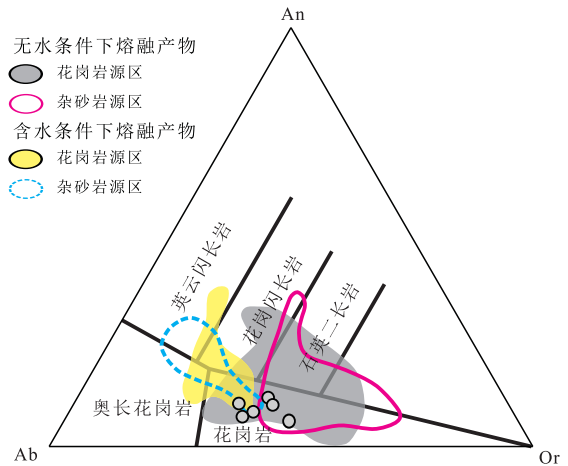


图 7 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩 CIPW 标准化三长石分类图

Fig.7 CIPW-normative An-Ab-Or diagram for the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses
实验研究得到的部分熔体经 Yang *et al.*(2016)修改

崆岭地区新太古代花岗片麻岩具有相对高的 K/Na 比值,且存在明显的负 Eu 异常,在三长石分类图解中主要落入由花岗岩类在无水条件下形成的熔体区域,区别于含水条件下部分熔融或无水条件下杂砂岩部分熔融产物.部分样品具有相对低的 ACNK 值,甚至显示出准铝质特点,同样不支持杂砂岩部分熔融作用过程.高 K₂O 含量和 K₂O/Na₂O 比值则表明无水熔融过程中可能由黑云母或白云母脱水熔融反应引起 (Weinberg and Hasalová, 2015).本文认为,黑云母在相对高温下的脱水熔融可能是产生崆岭地区新太古代 I-S 型花岗质岩浆作用的主导因素,原因包括:(1)锆石饱和温度计显示花岗片麻岩具有相对高的锆石饱和温度(789~

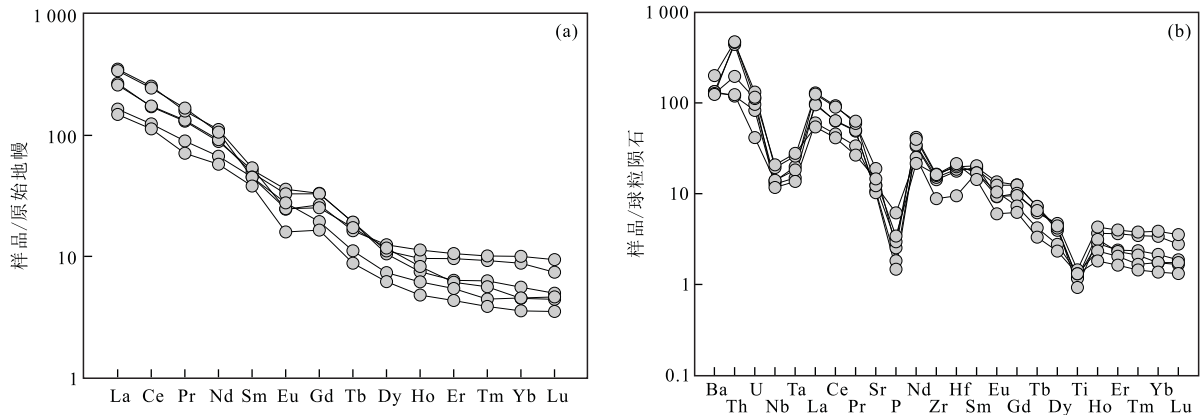


图 8 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩(a)稀土元素配分模式图;(b)微量元素蛛网图

Fig.8 (a) Chondrite-normalized rare earth element patterns and (b) primitive mantle-normalized spiderdiagram for the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

原始地幔归一化值据 McDonough and Sun(1995);球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough(1989)

表 4 崆岭地区新太古代花岗片麻岩 Sm-Nd 同位素组成

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions of the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

样品	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\varepsilon_{\text{m}}(10^{-6})$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$
12ZG-43	8.486	50.24	0.510 970	5	0.102 2	3.01	-0.1
12ZG-47	7.592	42.52	0.511 012	3	0.108 0	3.10	-1.2
12ZG-49	7.227	45.34	0.510 775	5	0.096 4	3.15	-1.9

注:(1).Sm、Nd 含量与 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值通过 ID-TIMS 法测量结果计算获得,误差 $\leq 5\%$;(2).计算 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $T_{2\text{DM}}$ 年龄时,年龄值 t 采用锆石年龄 2 673 Ma; $T_{2\text{DM}}$ 计算过程中参数($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.213 7$ 、($^{144}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.513 15$ 、($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CC}}=0.118$ (DM、CC 分别代表亏损地幔和大陆地壳), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值计算过程中参数($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CHUR}}=0.196 7$ 、($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{CHUR}}=0.512 638$.

825 °C) (Watson and Harrison, 1983), 在片麻岩中未发现古老继承锆石核, 说明早期熔体中 Zr 并未达到饱和, 显示出随温度增加 Zr 含量增加趋势, 随着结晶作用的持续进行, 熔体中 Zr 含量饱和, 锆石开始结晶而使岩浆体系中 Zr 含量迅速下降. 因此, 新太古代花岗片麻岩原岩的实际温度可能还要高于上述估算值. 而已有研究表明, 白云母脱水熔融的温度可能仅 650 ~ 750 °C (Weinberg and Hasalová, 2015); (2) 白云母在无水条件下部分熔融会产生低 Ba ($< 800 \times 10^{-6}$) 高 Pb ($> 40 \times 10^{-6}$) 的熔体 (Finger and Schiller, 2012). 所研究样品具有相对低的 Pb ($15.9 \times 10^{-6} \sim 47.0 \times 10^{-6}$) 以及相对高的 Ba 含量 ($817 \times 10^{-6} \sim 1 320 \times 10^{-6}$), 明显不同于白云母脱水熔融产生的低温过铝质花岗岩熔体.

依据上述探讨, 初步认为崆岭地区新太古代花岗片麻岩可能来自地壳变长英质岩浆岩中黑云母在无水、相对高温 (> 825 °C) 的条件下发生脱水熔融形成. 这些长英质岩浆岩不可能是区域上广泛存在的 2.9 ~ 2.8 Ga TTG 片麻岩, 因为其具有与本文花岗片麻岩完全不同的 Nd 同位素组成.

4.2 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩的构造意义

扬子陆核崆岭杂岩太古宙构造—岩浆事件长期被认为集中于 ~ 3.4 ~ 2.9 Ga (例如 Qiu *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2014, 2015). 然而, 随着近年来研究工作的逐步深入, 越来越多 ~ 2.7 ~ 2.6 Ga 的岩浆作用记录也得以报道. 最近, Han *et al.* (2017) 对崆岭地区河流河沙样品中碎屑锆石开展了 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析, 认为 ~ 2.7 ~ 2.6 Ga 构造—岩浆事件可能在扬子陆核大陆地壳形成过程中扮演了重要角色. 另外, 在崆岭地区古元古代变沉积岩中, 2.7 ~ 2.6 Ga 的碎屑锆石同样占据着相当高的比例 (Gao *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2016). 这些碎屑锆石结果表明, 2.7 ~ 2.6 Ga 的花岗质岩石可能是崆岭杂岩太古宙地壳的重要组成部分, 其规模甚至可能比区域上 ~ 3.4 ~ 2.9 Ga TTG 岩石还要广泛 (Han *et al.*, 2017). 本研究在崆岭杂岩中新识别出一套 ~ 2.67 Ga 的花岗质片麻岩, 在 (Nb+Y)—Rb 图解中, 大多数样品落入后碰撞花岗岩范围中 (图 9), 显示该套花岗片麻岩可能形成于后碰撞构造背景下. 该结论得到了近年来对崆岭

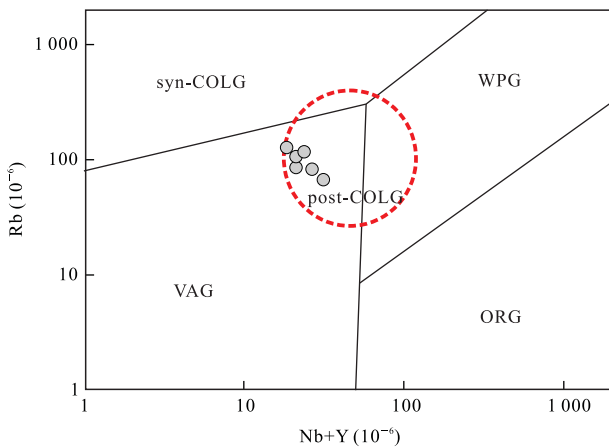


图 9 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩的(Nb+Y)-Rb 构造判别图解

Fig.9 Rb versus (Nb + Y) diagram for the Kongling Neoproterozoic granitic gneisses

修改自 Pearce *et al.* (1984); ORG.海洋山脊花岗岩; syn-COLG. syn-COLG 花岗岩; VAG.火山弧花岗岩; WPG.板内花岗岩

杂岩开展的新太古代构造—变质—岩浆事件研究证据的进一步支持.崆岭杂岩中 $\sim 3.0\sim 2.9$ Ga 的 TTG 片麻岩显示出地幔—熔体相互作用的特征,被认为可能与俯冲作用有关,形成于大陆弧构造背景下 (Guo *et al.*, 2015),而正片麻岩、斜长角闪岩以及变泥质岩中普遍记录的 $\sim 2.75\sim 2.72$ Ga 高级变质作用 (Ling *et al.*, 1998; Jiao *et al.*, 2009; 魏君奇和景明明, 2013)及 $\sim 2.671\sim 2.622$ Ma 的正片麻岩则揭示 $\sim 2.7\sim 2.6$ Ga 崆岭地区可能处于伸展背景之下 (Chen *et al.*, 2013).此外,花岗岩形成的温压条件同样支持后碰撞构造背景.锆石饱和温度计显示花岗片麻岩具有相对高的锆石饱和温度,同时稀土元素配分模式中 Eu 的负异常则说明其源区存在斜长石,可能形成于相对低的压力下,在后碰撞伸展构造背景下,构造减压过程以及地幔上涌带来的高热量诱发了先前形成的下地壳花岗片麻岩中黑云母发生脱水熔融能较为合理的解释崆岭地区新太古代花岗片麻岩的形成过程.

结合以上这些变质—岩浆事件来看,初步提出崆岭杂岩中—新太古代与碰撞造山相关的三阶段构造演化模型:(1)洋壳俯冲阶段($\sim 2.9\sim 2.8$ Ga),以出现大量 $\sim 2.9\sim 2.8$ Ga 的高 Cr、Ni 含量、高 Sr/Y 的花岗片麻岩为特征 (Guo *et al.*, 2015);(2)弧(陆)—陆碰撞阶段(~ 2.7 Ga),以该时期崆岭杂岩各类岩石中普遍记录的高级变质作用为标志 (Ling *et al.*, 1998; Jiao *et al.*, 2009);(3)后碰撞拉张阶段($2.7\sim 2.6$ Ga),这一阶段随着崆岭地区地壳持续

加厚,随后发生造山带垮塌以及大陆岩石圈的伸展过程,标志着造山过程的结束,软流圈地幔物质上涌提供大量热并致使不同源区岩石在不同深度(压力)条件发生高温熔融作用而分别形成 $\sim 2.71\sim 2.64$ Ga 的黑云母花岗岩、二云母花岗岩 (Guo *et al.*, 2015)、 $\sim 2.67\sim 2.62$ Ga 的 A 型花岗质片麻岩 (Chen *et al.*, 2013)以及本研究中 ~ 2.67 Ga 的花岗质片麻岩,且伴随有同时代的初生地壳增长过程 (Chen *et al.*, 2013).

5 结论

(1) 崆岭杂岩新太古代花岗片麻岩结晶年龄为 $2\ 673\pm 39$ Ma,且遭受了古元古代($2\ 042\pm 27$ Ma)的高压麻粒岩相变质作用.

(2) 该套花岗片麻岩兼具 I 型花岗岩和 S 型花岗岩的特点,主要由初生的长英质变岩浆岩地壳在后碰撞伸展构造背景下部分熔融形成.

(3) 扬子陆核在 $\sim 2.9\sim 2.6$ Ga 的中—新太古代可能存在洋壳俯冲—弧(或陆)陆碰撞—后碰撞拉张的三阶段造山作用相关过程.

致谢:野外工作期间得到了武汉地质调查中心蔡应雄高级工程师、张利国高级工程师、吴年文工程师以及张春红博士的大力协助;锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年得到了西北大学柳小明教授的热情帮助;锆石制靶和阴极发光照相得到西北大学弓虎军老师的帮助,在此一并表示感谢.

表 1 见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

References

- Bingen, B., Austrheim, H., Whitehouse, M. J., et al., 2004. Trace Element Signature and U-Pb Geochronology of Eclogite-Facies Zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 671–683. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0585-z>
- Bradley, D. C., 2011. Secular Trends in the Geologic Record and the Supercontinent Cycle. *Earth-Science Reviews*, 108(1–2): 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.05.003>
- Cao, Z. Q., Cai, Y. T., Zeng, Z. X., et al., 2017. Discovery of Neoproterozoic A-Type Granite in Northern Yangtze Craton and Its Tectonic Significance. *Earth Science*, 42(6): 957–973 (in Chinese with English abstract).
- Chen, K., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2013. 2.6–2.7 Ga Crustal

- Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472 – 490. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.10.017>
- Conrad, W. K., Nicholls, I. A., Wall, V. J., 1988. Water-Saturated and -Undersaturated Melting of Metaluminous and Peraluminous Crustal Compositions at 10 Kb: Evidence for the Origin of Silicic Magmas in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, and other Occurrences. *Journal of Petrology*, 29(4): 765 – 803. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.4.765>
- Finger, F., Schiller, D., 2012. Lead Contents of S-Type Granites and their Petrogenetic Significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164(5): 747 – 755. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0771-3>
- Förster, H. J., Tischendorf, G., Trumbull, R. B., et al., 1999. Late-Collisional Granites in the Variscan Erzgebirge, Germany. *Journal of Petrology*, 40(11): 1613 – 1645. <https://doi.org/10.1093/petroj/40.11.1613>
- Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y. M., et al., 1999. Contrasting Geochemical and Sm-Nd Isotopic Compositions of Archean Metasediments from the Kongling High-Grade Terrain of the Yangtze Craton: Evidence for Cratonic Evolution and Redistribution of REE during Crustal Anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13–14): 2071 – 2088. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00153-2)
- Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses. *American Journal of Science*, 311(2): 153 – 182. <https://doi.org/10.2475/02.2011.03>
- Guo, J. L., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2014. 3.45 Ga Granitic Gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean Crustal Growth. *Precambrian Research*, 242: 82 – 95. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.018>
- Guo, J. L., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3–2.0 Ga) Granitoid Magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for Late Archean Tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246 – 266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.007>
- Han, P. Y., Guo, J. L., Chen, K., et al., 2017. Widespread Neoproterozoic (~2.7–2.6 Ga) Magmatism of the Yangtze Craton, South China, as Revealed by Modern River Detrital Zircons. *Gondwana Research*, 42: 1 – 12. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.006>
- Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1393 – 1399. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0135-7>
- Li, L. M., Lin, S. F., Davis, D. W., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks from the Kongling Terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 255: 30 – 47. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.009>
- Li, Y. H., Zheng, J. P., Xiong, Q., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implications of Paleoproterozoic Metapelitic Rocks in the Archean Kongling Complex from the Northern Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 276: 158 – 177. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.01.028>
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2001. The Recognizing of ca. 1.95 Ga Tectono-Thermal Event in Kongling Nucleus and Its Significance for the Evolution of Yangtze Block, South China. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 326 – 329. <https://doi.org/10.1007/bf03187196>
- Ling, W. L., Gao, S., Zheng, H. F., et al., 1998. An Sm-Nd Isotopic Dating Study of the Archean Kongling Complex in the Huangling Area of the Yangtze Craton. *Chinese Science Bulletin*, 43(14): 1187 – 1191. <https://doi.org/10.1007/bf02883222>
- Liu, X. M., Gao, S., Diwu, C., et al., 2008. Precambrian Crustal Growth of Yangtze Craton as Revealed by Detrital Zircon Studies. *American Journal of Science*, 308(4): 421 – 468. <https://doi.org/10.2475/04.2008.02>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537 – 571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1 – 56.
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T., Thirlwall, M. F., 2006. Adakites without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581 – 593. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.12.034>
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223 – 253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of

- Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peng, M., Wu, Y. B., Wang, J., et al., 2009. Paleoproterozoic Mafic Dyke from Kongling Terrain in the Yangtze Craton and its Implication. *Science Bulletin*, 54(6): 1098—1104. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0558-0>
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Lu, S. S., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Grenville-Aged ($1\ 063 \pm 16$ Ma) Metabasalts in the Shennongjia District, Yangtze Block: Implications for Tectonic Evolution of the South China Craton. *International Geology Review*, 57(1): 76—96. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.991949>
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Lu, S. S., et al., 2016. Geochronology of the Khondalite Series in the Kongling Complex, Yangtze Craton and Its Geological Implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(3): 549—558 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Zhang, L. G., et al., 2015. Geochronology of Serpentinized Harzburgite in Miaowan Ophiolite, Yangtze Block and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 40(7): 1121—1128 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Zhao, X. M., Yang, H. M., et al., 2017. Paleoproterozoic Metamorphic Event in the Nucleus of the Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Geochronology of the Metamorphic Zircons from the Khondalite. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 706—714 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First Evidence of > 3.2 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of South China and its Implications for Archean Crustal Evolution and Phanerozoic Tectonics. *Geology*, 28(1): 11—14. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)028<0011:feogcc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)028<0011:feogcc>2.3.co;2)
- 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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Wang, Z. J., Wang, J., Du, Q. D., et al., 2013a. The Evolution of the Central Yangtze Block during Early Neoproterozoic Time: Evidence from Geochronology and Geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77: 31—44. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.08.013>
- Wang, Z. J., Wang, J., Du, Q. D., et al., 2013b. Mature Archean Continental Crust in the Yangtze Craton: Evidence from Petrology, Geochronology and Geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 58(19): 2360—2369. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5668-7>
- Watkins, J. M., Clemens, J. D., Treloar, P. J., 2007. Archean TTGs as Sources of Younger Granitic Magmas: Melting of Sodic Metatonalites at 0.6—1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(1): 91—110. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0181-0>
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295—304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Wei, J. Q., Jing, M. M., 2013. Chronology and Geochemistry of Amphibolites from the Kongling Complex. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 48(4): 970—983 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Y. X., Peng, S. B., Jiang, X. F., et al., 2012. SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Neoproterozoic Granitoids in the Huangling Anticline and Its Tectonic Setting. *Journal of Earth Science*, 23(5): 659—676. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0284-z>
- Weinberg, R. F., Hasalová, P., 2015. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: A Review. *Lithos*, 212—215: 158—188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021>
- Wu, Y. B., Gao, S., Gong, H. J., et al., 2009. Zircon U-Pb Age, Trace Element and Hf Isotope Composition of Kongling Terrane in the Yangtze Craton: Refining the Timing of Palaeoproterozoic High-Grade Metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(6): 461—477. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00826.x>
- Wu, Y. B., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2012. Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Paleoproterozoic Arc Related Granitoid in the Northwestern Yangtze Block and its Geological Implications. *Precambrian Research*, 200—203: 26—37. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.12.015>
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Gao, S., et al., 2008. Zircon U-Pb Age and Trace Element Evidence for Paleoproterozoic Granulite-Facies Metamorphism and Archean Crustal Rocks in the Dabie Orogen. *Lithos*, 101(3—4): 308—322. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.008>
- Wu, Y. B., Zhou, G. Y., Gao, S., et al., 2014. Petrogenesis of Neoproterozoic TTG Rocks in the Yangtze Craton and its Implication for the Formation of Archean TTGs. *Precambrian Research*, 254: 73—86. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Xiong, Q., Zheng, J. P., Yu, C. M., et al., 2009. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of Quanyishang A-Type Granite in Yichang: Signification for the Yangtze Continental Cratonization in Paleoproterozoic. *Science Bulletin*, 54(3): 436—446. <https://doi.org/10.1007/s11434-008->

0401-7

- Yang, H., Zhang, H. F., Luo, B. J., et al., 2016. Generation of Peraluminous Granitic Magma in a Post-Collisional Setting: A Case Study from the Eastern Qilian Orogen, NE Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 36: 28 – 45. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.04.006>
- Yin, C. Q., Lin, S. F., Davis, D. W., et al., 2013. 2.1 – 1.85 Ga Tectonic Events in the Yangtze Block, South China: Petrological and Geochronological Evidence from the Kongling Complex and Implications for the Reconstruction of Supercontinent Columbia. *Lithos*, 182 – 183: 200 – 210. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.012>
- 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. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28 (3): 353 – 370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Zeng, R. Y., Lai, J. Q., Zhang, L. J., et al., 2016. Petrogenesis of Mafic Microgranular Enclaves: Evidence from Petrography, Whole-Rock and Mineral Chemistry of Ziyunshan Pluton, Central Hunan. *Earth Science*, 41 (9): 1461 – 1481 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006a. Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Evidence for Paleoproterozoic Metamorphic Event in South China. *Precambrian Research*, 151(3–4): 265 – 288. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.08.009>
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006b. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1–2): 56 – 71. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.027>
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Zheng, J. P., 2013a. Neoproterozoic High-K Granites Produced by Melting of Newly Formed Mafic Crust in the Huangling Region, South China. *Precambrian Research*, 233: 93 – 107. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.04.011>
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Zheng, J. P., et al., 2013b. Neoproterozoic Tonalite and Trondhjemite in the Huangling Complex, South China: Crustal Growth and Reworking in a Continental Arc Environment. *American Journal of Science*, 313 (6): 540 – 583. <https://doi.org/10.2475/06.2013.02>

附中文参考文献

- 曹正琦, 蔡逸涛, 曾佐勋, 等, 2017. 扬子克拉通北缘新元古代 A 型花岗岩的发现及大地构造意义. *地球科学*, 42(6): 957 – 973.
- 邱啸飞, 杨红梅, 卢山松, 等, 2016. 扬子克拉通崆岭杂岩孔兹岩系同位素年代学研究及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 40(3): 549 – 558.
- 邱啸飞, 杨红梅, 张利国, 等, 2015. 扬子陆块庙湾蛇岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义. *地球科学*, 40(7): 1121 – 1128.
- 邱啸飞, 赵小明, 杨红梅, 等, 2017. 扬子陆核古元古代变质事件—来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据. *地质通报*, 36(5): 706 – 714.
- 魏君奇, 景明明, 2013. 崆岭杂岩中角闪岩类的年代学和地球化学. *地质科学*, 48(4): 970 – 983.
- 曾认宇, 赖健清, 张利军, 等, 2016. 湘中紫云山岩体暗色微粒包体的成因: 岩相学、全岩及矿物地球化学证据. *地球科学*, 41(9): 1461 – 1481.