

朝鲜 ~19 亿年侵入岩的岩石类型与构造背景初探^{*}

彭澎^{1,2} 王冲^{1,2} 杨正赫^{1,3} 金正男³PENG Peng^{1,2}, WANG Chong^{1,2}, YANG JongHyok^{1,3} and KIM JongNam³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院大学地球科学学院,北京 100049

3. 朝鲜国家科学院地质研究所,平壤 3812100

1. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*2. *School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*3. *Institute of Geology, State Academy of Sciences, Pyongyang 3812100, DPRK*

2016-05-20 收稿, 2016-09-01 改回.

Peng P, Wang C, Yang JH and Kim JN. 2016. A preliminary study on the rock series and tectonic environment of the ~1.9Ga plutonic rocks in DPR Korea. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10):2993–3018

Abstract There are widespread ~1.9Ga plutonic rocks in DPR Korea, which can be subdivided into three series, a porphyritic granite series (I-type granites, e. g., the Myohyangsan pluton, 1900 ~ 1840Ma), S-type granite series (e. g., the Gasan pluton, a 1862 ± 5 Ma zircon U-Pb age is obtained) and the syenite series (the Ryongpo pluton as an example, a 1857 ± 2 Ma zircon U-Pb age is obtained). The I-type granite series is called the Myohyangsan Complex by local geologists, and is characterized by megacrysts of K-feldspar and is closely occurred with the granulite facies meta-volcanics/sediments; whereas the S-type granite series is called the Ryonhwasan Complex, and is characterized by containing garnet and cordierite and is distributed in the high-grade paragneisses. This indicates that the S-type granites could be originated from paragneisses; while the porphyritic granite series (I-type granite) could be associated with the volcanic-containing supracrustal rocks. The syenite series is called as the Sakju Complex by local geologists, and is limitedly distributed in Sakju and Tokchong-Chongju and the neighbouring Liaodong Peninsula, and appears as stocks. These plutons are slightly older or basically coeval with the metamorphism timing of the regional amphibolite-granulite facies metamorphism (a 1844 ± 2 Ma zircon U-Pb age is obtained from paragneiss of the Jungsan 'Group'). The syenite series could be originated from high-pressure melting of crustal materials. There are also similar series of plutons in the neighboring Liaodong-Jinan and Jiaodong areas, where the ~2.1Ga igneous rocks are more prominent. There are also widespread ~1.9Ga plutons in southern Korean Peninsula; however, these are dominantly porphyritic granites with a few charnockite and anorthosite. It may indicate different basements for the north and south part of the peninsula, i. e., they may belong to different paleo-continent (North and South China blocks). The widespread ~1.9Ga I-type and S-type granites with locally syenites and some mantle-derived igneous rocks in northern Korean Peninsula are coeval with the regional high-grade metamorphism. Considering the existence of Archean basement, we suggest that the region was possibly similar to modern continent marginal arc at the Paleoproterozoic.

Key words North China block; Korean Peninsula; Paleoproterozoic; S-type granite; Porphyritic granite (I-type granite); Syenite

摘 要 朝鲜半岛北部广泛发育 ~19 亿年侵入岩,这些岩浆岩可以分为三个系列,分别为似斑状花岗岩系列(多为 I 型,以妙香山岩体为代表,年龄 1900 ~ 1840Ma)、S 型花岗岩系列(以嘉山岩体为代表,本文获得 1862 ± 5 Ma 锆石 U-Pb 年龄)和正长岩系列(以龙浦岩体为代表,本文获得 1857 ± 2 Ma 锆石 U-Pb 年龄)。似斑状花岗岩系列(I 型花岗岩)大致对应朝鲜地质学家定义的 Myohyangsan(妙香山)杂岩,以发育钾长石巨斑为特征,与麻粒岩相变质的火山岩-沉积岩系关系密切;S 型花岗岩系列大致对应 Ryonhwasan(莲花山)杂岩,以发育石榴石和堇青石等矿物为特征,与麻粒岩相变质的副变质岩共生:这说明前者可能与变质火山岩系相关,而后者可能和副变质岩相关。正长岩系列,朝鲜地质学家称为 Sakju(朔州)杂岩,分布较为局限,仅

* 本文受国家自然科学基金项目(41210003,41322018)和中组部青年拔尖人才项目联合资助。

第一作者简介: 彭澎,男,1978 年生,研究员,岩石学专业,E-mail: pengpengwj@mail.iggcas.ac.cn

见于朔州以及博川-定州之间,也见于邻区辽东,多为岩株。这三个系列岩浆岩稍早或者同期于角闪岩相-麻粒岩相变质(本文获得甌山“群”变质锆石 U-Pb 年龄 $1844 \pm 2\text{Ma}$)。邻区辽东-吉南及胶东地区也发育这三个系列岩浆岩,但这两个地区 ~21 亿年岩浆作用更为广泛。朝鲜半岛南部发育大量同期岩浆岩,但岩石类型以似斑状花岗岩为主,并发育紫苏花岗岩和斜长岩。我们推测,朝鲜半岛南北两侧基底属性存在差异,可能对应不同的古陆(华北与华南古陆)。综合分析表明,朝鲜 ~19 亿年前广泛发育 I 型和 S 型花岗岩,并有慢源岩浆作用,同时发育正长岩类,并且这些岩浆活动与区域高级变质作用时代接近。考虑到本区存在太古宙基底,我们推测本区在古元古代可能处于类似现今活动大陆边缘弧背景。

关键词 华北古陆;朝鲜半岛;古元古代;S 型花岗岩;似斑状花岗岩(I 型花岗岩);正长岩

中图法分类号 P534.1; P588.12; P597.3

1 引言

朝鲜半岛可以划分成数个构造单元,从北至南依次为冠帽地块、狼林地块、平南盆地、临津江带、京畿地块、沃川带、太白盆地、岭南地块和庆尚盆地(Paek *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000)。传统上认为,华北陆块东部边界为临津江带(Yin and Nie, 1993; 徐嘉炜和朱光, 1995; Ree *et al.*, 1996)。随着三叠纪早期退变榴辉岩的发现,一般认为,华北陆块东部边界穿过京畿地块(Oh *et al.*, 2006, 2015; Zhai *et al.*, 2007a; Oh and Kusky, 2007; Kim *et al.*, 2011a)。但是,部分学者认为,整个朝鲜半岛主体上和华北更具亲缘性(Chang and Park, 2001; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Zhai *et al.*, 2007a),三叠纪退变榴辉岩为标志的造山带可能只是代表华南陆块呈楔形嵌入朝鲜半岛(Zhai *et al.*, 2007a)。但是,无论哪种模式,都认为狼林地块和冠帽地块与邻近的辽宁和吉林东部相似(吴福元等, 2016),而平南盆地与大连盆地类似(Peng *et al.*, 2011)。

吴福元等(2016)根据发源并流经狼林地块河流中河沙的碎屑锆石年龄数据,提出狼林地块的主体岩石可能是 ca. 19 ~ 18 亿年的花岗质岩石。这与一系列已发表的数据是吻合的(Zhao *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2007b)。然而,邻区辽宁和吉林东部地区岩浆岩以 ~21.8 亿年的 A 型花岗岩和 ~21.2 亿年的基性岩床/火山岩等为特征(Lu *et al.*, 2006; 董春艳等, 2012; Li and Chen, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016), ca. 18 ~ 19 亿年的岩浆岩报道较少(杨进辉等, 2007);南部毗邻的山东半岛 29 ~ 25 亿年的胶东杂岩中虽然有一些 19 ~ 18 亿年的岩浆岩,但其分布并不广泛(图 1)。朝鲜(狼林地块)内部是否以 ~19 亿年岩浆岩为主? 这些岩浆岩有哪些主要类型? 与朝鲜半岛南部(京畿地块、岭南地块)内部同时期岩浆岩有何异同? 它们形成于何种构造背景? 这些问题对进一步揭示朝鲜半岛构造格局,理解华北陆块东部构造演化有重要意义。结合我们目前所获得的朝鲜的数据,本文将探讨以上问题。

2 研究背景

朝鲜基底出露区研究程度较低,Zhao *et al.* (2006)报道 2

个太古宙岩石出露点,分别位于开城和高城附近,岩性为英云闪长质-花岗闪长质片麻岩。这 2 个露头点与 Cho *et al.* (2008b)报道的朝鲜半岛南部目前仅有的 1 个太古宙岩石年龄(Daeijak 岛; ~25 亿年)基本一致。这 3 个出露点均位于京畿地块北缘或者狼林地块南缘。

已经获得的古元古代岩浆岩年龄包括 ~19 亿年的 S 型花岗岩(Zhao *et al.*, 2006)、~18.5 亿年的斑状二长花岗岩(Zhao *et al.*, 2006)、ca. 1895 ~ 1839Ma 环斑花岗岩(Han *et al.*, 1998, 2004; Han, 2011; Zhai *et al.*, 2007b)、~18.5 亿年的花岗闪长岩(Wu *et al.*, 2007)、~20.9 亿年和 ~16.5 亿年的黑云母花岗岩(Wu *et al.*, 2007)等。其中, ~20.9 亿年和 ~16.5 亿年的黑云母花岗岩分布在鸭绿江沿岸。另外,表壳岩系以狼林群、甌山群、摩天岭群等为主,这些岩石都经历了古元古代晚期麻粒岩相-角闪岩相变质作用(李秋立等, 2016; 赵磊等, 2016)。

朝鲜半岛南部基底主体为 ca. 18 ~ 19 亿年花岗质岩石和一系列记录 ~18.5 亿年变质的副片麻岩,也见斜长岩类(Kim *et al.*, 2012, 2014)。花岗质岩石多为似斑状花岗岩-花岗质片麻岩,形成时代多为 ~18.5 亿年。另外,京畿地块北缘德积岛报道了 ~25 亿年花岗质片麻岩(Cho *et al.*, 2008b)。

邻区辽宁和吉林东部地区基底岩石包括 ca. 38 ~ 30 亿年鞍山 TTG 质片麻岩以及 ~25 亿年 TTG 质岩石和表壳岩系为主的鞍山-本溪、清原和辽南太古宙基底。古元古代岩浆岩,主要包括 ~21.8 亿年的 A 型花岗岩(Lu *et al.*, 2004a, b; Li and Zhao, 2007)、~21.2 亿年海城基性岩床(董春艳等, 2012; Yuan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016)和同时期火山岩系和少量 ~18.5 亿年正长岩(杨进辉等, 2007)。古元古代地层主体为辽河群,经历 ca. 19 ~ 18 亿年角闪岩相变质(Lu *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008)。

邻区山东半岛基底主体为 29 ~ 25 亿年的胶东杂岩。古元古代地层包括荆山群和粉子山群。荆山群为一套变质火山沉积岩系,粉子山群则是一套变质沉积岩系,两者都发生 19.5 ~ 18 亿年麻粒岩相变质(Wu *et al.*, 2014a)。本区还有高压基性麻粒岩出露(Zhao *et al.*, 2015)。古元古代岩浆岩主体活跃时代为 ~18.5 亿年,岩性包括正长花岗岩、花岗片麻岩和混合岩;另外,也见报道有 ~21.8 亿年的二长花岗片麻岩(Liu *et al.*, 2014b)和基性岩(Wang *et al.*, 2014)。

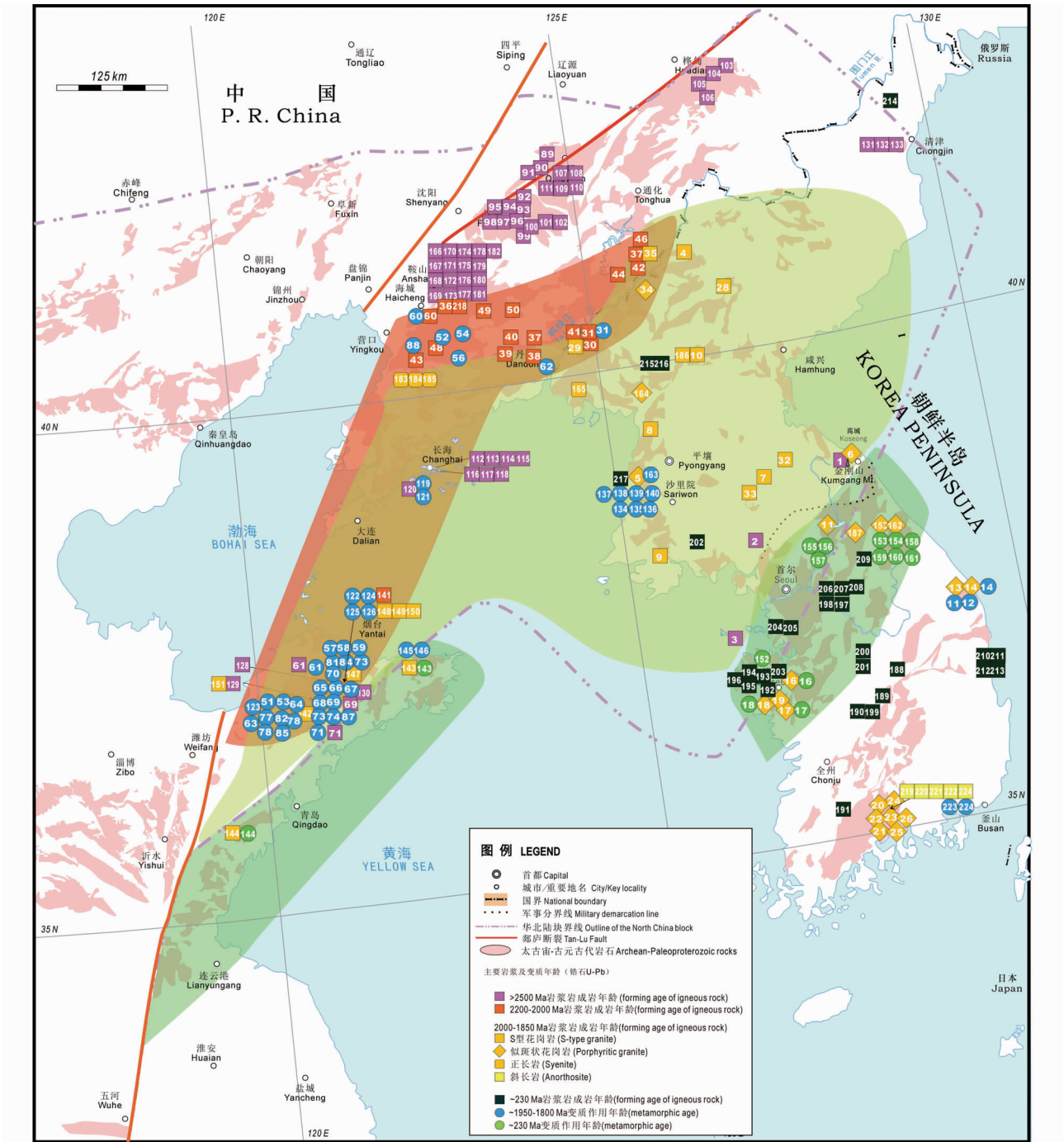


图1 郏庐断裂以东朝鲜及邻区基底(太古宙-古元古代)和三叠纪年龄数据分布简图(数据见表1)

Fig.1 Published ages for Archean-Paleoproterozoic and Triassic rocks in Korea and the adjacent areas east to the Tan-Lu fault (see Table 1 for data sources)

已经发表的朝鲜及邻区基底岩浆岩部分年龄数据见表1。样品采样位置见图2。

3 朝鲜古元古代岩浆岩类型

朝鲜地质学家将朝鲜古元古代岩浆岩称为 Ryonhwasan

(莲花山)杂岩体和 Sakju(朔州)杂岩体(Paek *et al.* ,1996)。

莲花山杂岩体分为三类岩体群(Paek *et al.* ,1996),或者分成 Na-K 质系列、K 质系列和 Na 质系列(Han and Em, 2002; Han *et al.* ,2004; Han, 2011)。第一类岩体群主要分布在狼林地块中部,西部、东部、平原-安岳隆起带、安边隆起带等均有分布,主体为石榴石-堇青石-黑云母花岗岩/二长岩

表 1 朝鲜半岛及邻区太古宙-古元古代及三叠纪年龄数据表
Table 1 Archean-Paleoproterozoic and Triassic ages from Korean Peninsula and the adjacent areas

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄(Ma)	方法	文献
1	英云闪长质片麻岩	开城	2636 ± 49	岩浆年龄	2435 ± 27	变质年龄	~3100、~3350	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
2	花岗闪长质片麻岩	高城	2538 ± 18	岩浆年龄	2462 ± 12	变质年龄	~2730、~2705、~2606	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
3	英云闪长质片麻岩	大移作岛	2508 ± 18	岩浆年龄				SHRIMP	Cho <i>et al.</i> , 2008b
4	灰色片麻岩	江界	1933 ± 12	岩浆年龄			~3135、~2685、~2320、~2185	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
5	S 型花岗岩	南浦	1908 ± 12	岩浆年龄			~2520、~2160	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
6	石榴二长花岗岩	高城	1903 ± 49	岩浆年龄				SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
7	似斑状二长花岗岩	仁川	1868 ± 10	岩浆年龄			~2050	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
8	似斑状二长花岗岩	甌山	1866 ± 21	岩浆年龄			~2540	SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
9	似斑状二长花岗岩	海州	1854 ± 12	岩浆年龄				SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
10	似斑状二长花岗岩	妙香山	1843 ± 11	岩浆年龄				SHRIMP	Zhao <i>et al.</i> , 2006
11	混合岩化片麻岩	富川	1848 ± 5	岩浆年龄			2385 ~ 2044	SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2012
12	糜棱岩化变质砂质岩	富川	1892 ± 27	变质年龄			3499 ~ 2022	SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2012
13	花岗岩片麻岩	富川	1965 ± 14	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2012
14	花岗岩片麻岩(糜棱岩)	富川	1990 ± 5	岩浆年龄	1861 ± 4	变质年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2012
15	麻粒岩	华川	1872 ± 7	变质年龄			~2300、2450、2650、2900	SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2000
16	斑状变晶正片麻岩	洪城	1881 ± 11	岩浆年龄	236 ± 6	变质年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2008
17	斑状变晶正片麻岩	洪城	1875 ± 13	岩浆年龄	237 ± 5	变质年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2008
18	斑状变晶正片麻岩	洪城	1873 ± 9	岩浆年龄	262 ± 76	变质年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2008
19	斑状变晶正片麻岩	洪城	1880 ± 10	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2008
20	石英长石质正片麻岩	地理山	1867 ± 7	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
21	石英长石质变质花岗岩	地理山	1868 ± 4	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
22	钾长石巨晶变花岗岩	地理山	1871 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
23	混合岩化花岗岩	地理山	1866 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
24	紫苏花岗岩	地理山	1863 ± 5	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
25	斜长岩	地理山	1866 ± 7	捕虏体年龄	904 ± 15	岩浆年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
26	斜长伟晶岩	地理山	1879 ± 40	捕虏体年龄	233 ± 6	捕虏体年龄		SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2014
28	花岗闪长岩	狼林	1812 ± 4	岩浆年龄	1809 ± 6	变质年龄	ca. 1881 ~ 1943	LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007
29	黑云母花岗岩	义州	1654 ± 79	岩浆年龄				LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007
30	黑云母花岗岩	义州	2086 ± 59	岩浆年龄				LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007
31	黑云母花岗岩	义州	2093 ± 55	岩浆年龄	1854 ± 7	变质年龄		LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007
32	变形黑云母花岗岩	高山	1885 ± 9	岩浆年龄			~2210、~2590	LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007
33	变形黑云母花岗岩	仁川	1898 ± 9	岩浆年龄				LA-ICPMS	Wu <i>et al.</i> , 2007

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
34	集安群含石榴石片麻岩(变火山岩)	通化	1981 ± 13	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
35	光华群变玄武岩	通化	1978 ± 40	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
36	基性岩床	海城	2110 ± 31	岩浆年龄				SHRIMP	董春艳等, 2012
37	辽河群电气石岩	后仙峪	2176 ± 5	岩浆年龄				SHRIMP	张艳飞等, 2010
38	辽河群电气石岩	后仙峪	2176 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	张艳飞等, 2010
39	二长花岗岩片麻岩	鸡冠山	2175 ± 15	岩浆年龄				SHRIMP	Li and Zhao, 2007
40	辽河群电气石岩	后仙峪	2171 ± 9	岩浆年龄				SHRIMP	张艳飞等, 2010
41	二长花岗岩片麻岩	老黑山	2166 ± 14	岩浆年龄				SHRIMP	Li and Zhao, 2007
42	A 型花岗岩	通化	2164 ± 8	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2004b
43	花岗岩	海城	2160 ± 12	岩浆年龄				LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2004a
44	A 型花岗岩	通化	2158 ± 13	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2004b
45	二长花岗岩片麻岩	辽东	2143 ± 17	岩浆年龄				SHRIMP	Li and Zhao, 2007
46	光华群变玄武岩	通化	2123 ± 16	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
47	集安群含透闪石片麻岩(变中性火山岩)	通化	2103 ± 18	岩浆年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
48	花岗岩	海城	2102 ± 32	岩浆年龄				LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2004a
49	辽河群里尔峪组变火山岩	辽东	2093 ± 22	岩浆年龄				ID-TIMS	姜春潮, 1987
50	辽河群里尔峪组变火山岩	辽东	2053 + 69/- 67	岩浆年龄				ID-TIMS	姜春潮, 1987
51	高压基性麻粒岩	莱西	1956 ± 41	变质年龄			2638 ± 22	SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
52	黑云母斜长片麻岩	胶东	1955 ± 20	变质年龄				LA-ICP MS	Luo <i>et al.</i> , 2008
53	含石墨石榴夕线片麻岩	莱西	1939 ± 15	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
54	长英质片麻岩	大石桥	1930 ± 34	变质年龄				LA-ICP MS	Luo <i>et al.</i> , 2008
55	含石榴石斜长角闪岩	胶东	1929 ± 60	变质年龄			2559 ± 10	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
56	斜长石英片岩	胶东	1929 ± 26	变质年龄				LA-ICP MS	Luo <i>et al.</i> , 2004
57	含石榴石斜长角闪岩	胶东	1921 ± 74	变质年龄			2559 ± 10	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
58	斜长角闪岩	胶东	1917 ± 26	变质年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
59	含石榴石斜长角闪岩	栖霞	1916 ± 27	变质年龄			2546 ± 12	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
60	二长花岗岩片麻岩	马风	1914 ± 13	变质年龄	2176 ± 11	形成年龄		SHRIMP	Li and Zhao, 2007
61	黑云母斜长片麻岩	栖霞	1893 ± 11	变质年龄	2618 ± 24	形成年龄		LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2013a
62	变质砂岩	丹东	1886 ± 16	变质年龄				SHRIMP	Lu <i>et al.</i> , 2006
63	高压麻粒岩	平度	1884 ± 22	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
64	二云母夕线榴片麻岩	烟台	1882 ± 12	变质年龄				SRHIMP	Wan <i>et al.</i> , 2006

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
65	基性麻粒岩	莱阳	1872 ± 12	变质年龄				SHRIMP	Liu <i>et al.</i> , 2012
66	基性麻粒岩	莱阳	1871 ± 8	变质年龄				SHRIMP	Liu <i>et al.</i> , 2012
67	含辉石斜长角闪岩	莱阳	1866 ± 11	变质年龄				SHRIMP	Liu <i>et al.</i> , 2012
68	泥质麻粒岩	太平庄	1864 ± 9	变质年龄				SHRIMP	Zhou <i>et al.</i> , 2008
69	英云闪长质片麻岩	栖霞	1863 ± 41	变质年龄	2548 ± 12	形成年龄		LA-ICP MS	Liu <i>et al.</i> , 2013
70	斜长角闪岩	大刘家	1854 ± 12	变质年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
71	奥长花岗岩质片麻岩	胶东	1849 ± 12	变质年龄	2526 ± 23	形成年龄		LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
72	斜长角闪岩	通化	1847 ± 8	变质年龄				LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2006
73	石榴石紫苏辉石麻粒岩	莱阳	1839 ± 3	变质年龄				SHRIMP	Liu <i>et al.</i> , 2012
74	含石榴石斜长角闪岩	莱阳	1838 ± 5	变质年龄				SHRIMP	Liu <i>et al.</i> , 2012
75	石墨片麻岩	通化	1838 ± 35	变质年龄			<2144	LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2006
76	含石榴石斜长角闪岩	上刘家	1838 ± 25	变质年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
77	高压泥质麻粒岩	莱西	1837 ± 8	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
78	石榴石堇青石黑云母片麻岩	莱西	1836 ± 8	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
79	含石榴石斜长角闪岩	胶东	1836 ± 73	变质年龄			2559 ± 10	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
80	石墨片麻岩	通化	1829 ± 28	变质年龄				LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2006
81	含石榴石斜长角闪岩	栖霞	1823 ± 41	变质年龄			2546 ± 12	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
82	高压石墨石榴夕线石片麻岩	莱西	1821 ± 8	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
83	单斜辉石大理岩	莱西	1817 ± 9	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
84	含石榴石斜长角闪岩	栖霞	1808 ± 27	变质年龄			2546 ± 12	LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2014b
85	钙硅质大理岩	莱西	1790 ± 6	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
86	含透辉石大理岩	通化	1827 ± 20	变质年龄				SHRIMP	Tam <i>et al.</i> , 2011
87	泥质麻粒岩	太平庄	1803 ± 26	变质年龄	2103 ± 18	形成年龄		LA-ICP MS	Lu <i>et al.</i> , 2006
88	黑云母斜长片麻岩	大石桥	1850 ± 9	变质年龄				SHRIMP	Zhou <i>et al.</i> , 2008
89	钾质花岗岩	清原	2505 ± 14	岩浆年龄				SRHIMP	Wan <i>et al.</i> , 2006
90	英云闪长岩	清原	2521 ± 14	岩浆年龄				ID-TIMS	李俊建和沈保丰, 2000
91	片麻岩	清原	2520 ± 16	岩浆年龄				ID-TIMS	李俊建和沈保丰, 2000
92	TTG 花岗岩	清原-抚顺	2556 ± 18	岩浆年龄	2489 ± 19	变质年龄		SHRIMP	万渝生等, 2005
93	角闪变粒岩	清原-抚顺	2515 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	万渝生等, 2005
94	角闪变粒岩	清原-抚顺	2510 ± 7	岩浆年龄				SHRIMP	万渝生等, 2005
95	深熔片麻状 TTG 花岗岩	清原-抚顺	2528 ± 27	岩浆年龄	2477 ± 13	变质年龄		SHRIMP	万渝生等, 2005
96	英云闪长质片麻岩	抚顺	2544 ± 4	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014
97	奥长花岗岩质片麻岩	抚顺	2550 ± 10	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
98	正长花岗岩	抚顺	2522 ± 4	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014
99	石英闪长质片麻岩	抚顺	2571 ± 7	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014
100	斜长角闪岩	抚顺	2530 ± 5	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014
101	石英闪长岩	抚顺	2496 ± 18	岩浆年龄				LA-ICP MS	白翔等, 2014
102	奥长花岗岩质片麻岩	抚顺	2517 ± 23	岩浆年龄	2473 ± 30	变质年龄		LA-ICP MS	白翔等, 2014
103	变质营运闪长岩	桦甸	2540 ± 17	岩浆年龄	2519 ± 15	变质年龄		LA-ICP MS	路孝平, 2009
104	紫苏花岗岩	桦甸	2532 ± 11	岩浆年龄	2518 ± 13	变质年龄		LA-ICP MS	路孝平, 2009
105	角闪斜长片麻岩	桦甸	2540 ± 9	岩浆年龄				LA-ICP MS	路孝平, 2009
106	变质二长花岗岩	桦甸	2558 ± 15	岩浆年龄	2520 ± 17	变质年龄		LA-ICP MS	路孝平, 2009
107	石英闪长岩	新宾	2523 ± 6	岩浆年龄	2478 ± 18	变质年龄		CAMECA	Peng <i>et al.</i> , 2015
108	英云闪长岩	新宾	2528 ± 6	岩浆年龄				CAMECA	Peng <i>et al.</i> , 2015
109	英云闪长岩	新宾	2520 ± 12	岩浆年龄				CAMECA	Peng <i>et al.</i> , 2015
110	石英二长闪长岩	新宾	2504 ± 5	岩浆年龄				CAMECA	Peng <i>et al.</i> , 2015
111	斜长角闪岩	新宾	2474 ± 5	变质年龄				CAMECA	Peng <i>et al.</i> , 2015
112	黑云母二长片麻岩	长海	2541 ± 9	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
113	花岗质片麻岩	长海	2537 ± 16	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
114	二长花岗岩片麻岩	长海	2544 ± 14	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
115	花岗闪长质片麻岩	长海	2541 ± 10	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
116	花岗质片麻岩	长海	2516 ± 11	岩浆年龄	2721 ± 28			LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
117	二长花岗岩片麻岩	长海	2514 ± 15	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
118	花岗质片麻岩	长海	2517 ± 17	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
119	白云母片岩	长海	1887 ± 29	变质年龄			~2520、~2670、~2770、~2830	LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
120	花岗闪长质片麻岩	长海	2544 ± 9	岩浆年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
121	白云母片岩	长海	1885 ± 36	变质年龄				LA-ICP MS	Meng <i>et al.</i> , 2013
122	基性麻粒岩	栖霞	1854 ± 10	变质年龄			~2450	CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
123	泥质麻粒岩	平度	1859 ± 5	变质年龄				CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
124	斜长角闪岩	栖霞	1869 ± 10	变质年龄			~2500	CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
125	斜长角闪岩	栖霞	1833 ± 28	变质年龄			~2380、~2479、~2613	CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
126	泥质麻粒岩	栖霞	1864 ± 22	变质年龄				CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
127	基性麻粒岩	莱西	1852 ± 17	变质年龄				CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
128	英云闪长质片麻岩	栖霞	2909 ± 19	岩浆年龄	2513 ± 32	变质年龄		CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
129	黑云母二长花岗片麻岩	栖霞	2702 ± 51	岩浆年龄				CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
130	英云闪长质片麻岩	栖霞	2738 ± 23	岩浆年龄				CAMECA	Zhao <i>et al.</i> , 2015
131	花岗质片麻岩	清津	2528 ± 3	岩浆年龄				CAMECA	张晓辉等, 2016
132	花岗质片麻岩	清津	2539 ± 38	岩浆年龄				CAMECA	张晓辉等, 2016
133	花岗质片麻岩	清津	2514 ± 9	岩浆年龄				CAMECA	张晓辉等, 2016
134	副片麻岩	南浦	1833 ± 15	变质年龄			~ 1870、1920、~ 2020、 ~ 2150、~ 2200、~ 2360	LA-ICPMS	赵磊等, 2016
135	副片麻岩	南浦	1877 ± 10	变质年龄			~ 1980、~ 2130、~ 2190	LA-ICPMS	赵磊等, 2016
136	副片麻岩	南浦	1855 ± 7	变质年龄			~ 2020、~ 2140、~ 2300、 ~ 2550	LA-ICPMS	赵磊等, 2016
137	副片麻岩	南浦	1842 ± 6	变质年龄				LA-ICPMS	赵磊等, 2016
138	副片麻岩	南浦	1785 ± 9	变质年龄				LA-ICPMS	赵磊等, 2016
139	副片麻岩	南浦	1830 ± 11	变质年龄			~ 2000	LA-ICPMS	赵磊等, 2016
140	副片麻岩	南浦	1841 ± 12	变质年龄				LA-ICPMS	赵磊等, 2016
141	二长花岗片麻岩	栖霞	2181 ± 12	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014b
142	正长花岗岩	莱阳	1801 ± 21	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014b
143	正片麻岩	威海	1825 ± 6	岩浆年龄	215 ± 33	变质年龄		SHRIMP	孔庆波, 2009
144	正片麻岩	五莲	1838 ± 3	岩浆年龄	227 ± 35	变质年龄		SHRIMP	孔庆波, 2009
145	泥质麻粒岩	威海	1854 ± 9	变质年龄				LA-ICPMS	Xiang <i>et al.</i> , 2014
146	泥质麻粒岩	威海	1818 ± 4	变质年龄				LA-ICPMS	Xiang <i>et al.</i> , 2014
147	混合岩(浅色体)	桃村	1859.6 ± 2.2	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014a
148	混合岩(浅色体)	栖霞	1856.8 ± 4.9	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014a
149	混合岩(浅色体)	栖霞	1856.1 ± 3.1	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014a
150	混合岩(浅色体)	栖霞	1857.2 ± 4.6	岩浆年龄	1837.8 ± 6.8	岩浆年龄		LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014a
151	混合岩(浅色体)	莱阳	1858.2 ± 2.8	岩浆年龄				LA-ICPMS	Liu <i>et al.</i> , 2014a
152	堇青石混合岩	阳平	235 ± 6	变质年龄				SHRIMP	Oh <i>et al.</i> , 2015
153	尖晶石麻粒岩	五台山	245 ± 10	变质年龄	1852 ± 14	岩浆年龄		SHRIMP	Oh <i>et al.</i> , 2006
154	混合岩化片麻岩	五台山	248 ± 18	变质年龄			~ 2028	SHRIMP	Oh <i>et al.</i> , 2006
155	糜棱岩麻粒岩	华川	246.5 ± 15.5	变质年龄				CHIME	Suzuki, 2009
156	糜棱岩麻粒岩	华川	239.3 ± 10.8	变质年龄				CHIME	Suzuki, 2009
157	糜棱岩麻粒岩	华川	241.3 ± 13.3	变质年龄				CHIME	Suzuki, 2009
158	石榴方辉条带状片麻岩	五台山	272 ± 58	变质年龄	1886 ± 26	变质年龄	~ 1890	SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2016
159	石榴黑云条带状片麻岩	五台山	247.3 ± 8.2	变质年龄			~ 1940	SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2016
160	混合岩化片麻岩	五台山	227.7 ± 3.6	变质年龄			~ 1980	SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2016

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
161	斜长角闪岩	五台山	234.2 ± 0.87	变质年龄	374 ± 3.1	变质年龄	ca. 2270 ~ 1896	SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2016
162	似斑状花岗岩	五台山	1847 ± 14	岩浆年龄				SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2016
163	夕线石麻粒岩	鞍山郡	1844 ± 2	变质年龄				Cameca	本文
164	正长岩	龙浦里	1857 ± 2	岩浆年龄				Cameca	本文
165	S 型花岗岩	嘉山里	1862 ± 5	岩浆年龄				Cameca	本文
166	条带状片麻岩	鞍山	3773 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
167	伟晶花岗岩	鞍山	3647 ± 20	岩浆年龄				SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
168	片麻状二长花岗岩	鞍山	3129 ± 6	岩浆年龄			~ 3250	SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
169	变基性岩墙	鞍山	3332 ± 6	岩浆年龄				SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
170	条带状片麻岩	鞍山	3458 ± 9	岩浆年龄				SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
171	片麻状奥长花岗岩	鞍山	3453 ± 7	岩浆年龄				SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
172	变基性岩墙	鞍山	3331 ± 8	岩浆年龄			~ 3600	SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
173	奥长花岗岩包体	鞍山	3311 ± 4	岩浆年龄	3643 ± 5	继承		SHRIMP	Wan <i>et al.</i> , 2012
174	奥长花岗岩	鞍山	3151 ± 23	岩浆年龄				Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
175	奥长花岗岩	鞍山	3156 ± 36	岩浆年龄			~ 3351	Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
176	淡色体	鞍山	3296 ± 12	岩浆年龄				Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
177	黑云母片岩	鞍山	3304 ± 9	变质年龄				Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
178	奥长花岗岩	鞍山	3814 ± 2	岩浆年龄				Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
179	奥长质片麻岩	鞍山	3299 ± 36	岩浆年龄			~ 3798	Cameca	Wang <i>et al.</i> , 2015
180	奥长质片麻岩	鞍山	3320 ± 9	岩浆年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2008
181	奥长质片麻岩	鞍山	3624 ± 7	岩浆年龄	3802 ± 11	继承		LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2008
182	奥长质片麻岩	鞍山	3115 ± 48	岩浆年龄	3316 ± 52	继承		LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2008
183	正长岩	矿洞沟	1879 ± 17	岩浆年龄				LA-ICP MS	杨进辉等, 2007
184	正长岩	矿洞沟	1872 ± 14	岩浆年龄				LA-ICP MS	杨进辉等, 2007
185	闪长岩	矿洞沟	1870 ± 18	岩浆年龄				LA-ICP MS	杨进辉等, 2007
186	环斑花岗岩	妙香山	1861 ± 7	岩浆年龄				SHRIMP	Zhai <i>et al.</i> , 2007 ^a
187	环斑花岗岩	阳洋	1839 ± 10	岩浆年龄				SHRIMP	Zhai <i>et al.</i> , 2005
188	花岗岩	易安	219.3 ± 3.3	岩浆年龄				SHRIMP	Cho <i>et al.</i> , 2008 ^a
189	花岗岩	青山	225.7 ± 3.7	岩浆年龄				SHRIMP	Cho <i>et al.</i> , 2008 ^a
190	花岗岩	白鹿	225.1 ± 2.1	岩浆年龄				SHRIMP	Cho <i>et al.</i> , 2008 ^a
191	花岗岩	大港	219.6 ± 1.9	岩浆年龄				SHRIMP	Cho <i>et al.</i> , 2008 ^a
192	纹长二长岩	杈川	232.0 ± 3.2	岩浆年龄				SHRIMP	Seo <i>et al.</i> , 2010
193	正长岩包体	海美	230.3 ± 2.7	岩浆年龄				SHRIMP	Seo <i>et al.</i> , 2010

续表 1
Continued Table 1

序号	岩性	位置	年龄 1 (Ma)	年龄含义	年龄 2 (Ma)	年龄含义	继承/碎屑锆石年龄 (Ma)	方法	文献
194	花岗岩	洪城	226.0 ± 2.2	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
195	花岗岩	洪城	227.0 ± 2.4	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
196	石英正长岩	洪城	227.3 ± 2.4	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
197	石英二长岩	阳平	231.8 ± 2.9	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
198	角闪辉石岩	阳平	231.1 ± 2.8	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
199	花岗岩	青山	224.8 ± 1.7	岩浆年龄				SHRIMP	Williams <i>et al.</i> , 2009
200	花岗岩	怪山	231.0 ± 1.3	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011c
201	花岗岩	怪山	228.2 ± 1.6	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011c
202	正长岩	德达	224 ± 4	岩浆年龄				SHRIMP	Peng <i>et al.</i> , 2008
203	似斑状花岗岩	洪城	225.7 ± 3.0	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
204	似斑状花岗岩	南阳	228.4 ± 1.2	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
205	似斑状花岗岩	南阳	227.5 ± 1.0	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
206	辉长岩	阳平	232.6 ± 4.0	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
207	闪长岩	阳平	231.9 ± 4.1	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
208	似斑状 花岗岩	阳平	232.2 ± 3.2	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
209	二长闪长岩	五台山	227.2 ± 1.9	岩浆年龄				SHRIMP	Kim <i>et al.</i> , 2011a
210	辉长岩	长沙里	255.7 ± 1.4	岩浆年龄				SHRIMP	Yi <i>et al.</i> , 2012
211	花岗岩	长沙里	257.3 ± 2.0	岩浆年龄				SHRIMP	Yi <i>et al.</i> , 2012
212	花岗岩	英德	252.9 ± 2.5	岩浆年龄				SHRIMP	Yi <i>et al.</i> , 2012
213	花岗岩	英德	250.0 ± 2.3	岩浆年龄				SHRIMP	Yi <i>et al.</i> , 2012
214	花岗闪长岩	富岭	246 ± 1	岩浆年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2007
215	正长岩	云山	234 ± 2	岩浆年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2007
216	黑云母花岗岩	太平里	213 ± 1	岩浆年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2007
217	二长花岗岩 (变形)	江西	215 ± 1	岩浆年龄				LA-ICP MS	Wu <i>et al.</i> , 2007
218	基性岩床	海城	2115 ± 6	岩浆年龄				CAMECA	Wang <i>et al.</i> , 2016
219	斜长岩	山青-下洞	1862 ± 2	岩浆年龄				SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014
220	斜长岩	山青-下洞	1861 ± 4	岩浆年龄				SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014
221	角闪辉石岩	山青-下洞	1873 ± 4	岩浆年龄				SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014
222	花岗质片麻岩	山青-下洞	1875 ± 5	岩浆年龄				SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014
223	混合岩化基性麻粒岩	山青-下洞	1862 ± 6	变质年龄	1860 ± 5	变质年龄		SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014
224	富石榴石混合岩	山青-下洞	1872 ± 7	岩浆年龄	1858 ± 4	变质年龄		SHRIMP	Lee <i>et al.</i> , 2014

注: U-Pb 年龄分析仪器/方法 (锆石/独居石); SHRIMP = SHRIMP 二次离子探针 (锆石); LA-ICP MS = 激光等离子质谱 (锆石); ID-TIMS = 同位素稀释等离子质谱 (锆石); CAMECA = CAMECA 二次离子探针 (锆石); CHIME = Th-U-Pb 等时线方法 (chemical Th-U-total Pb isochron method)

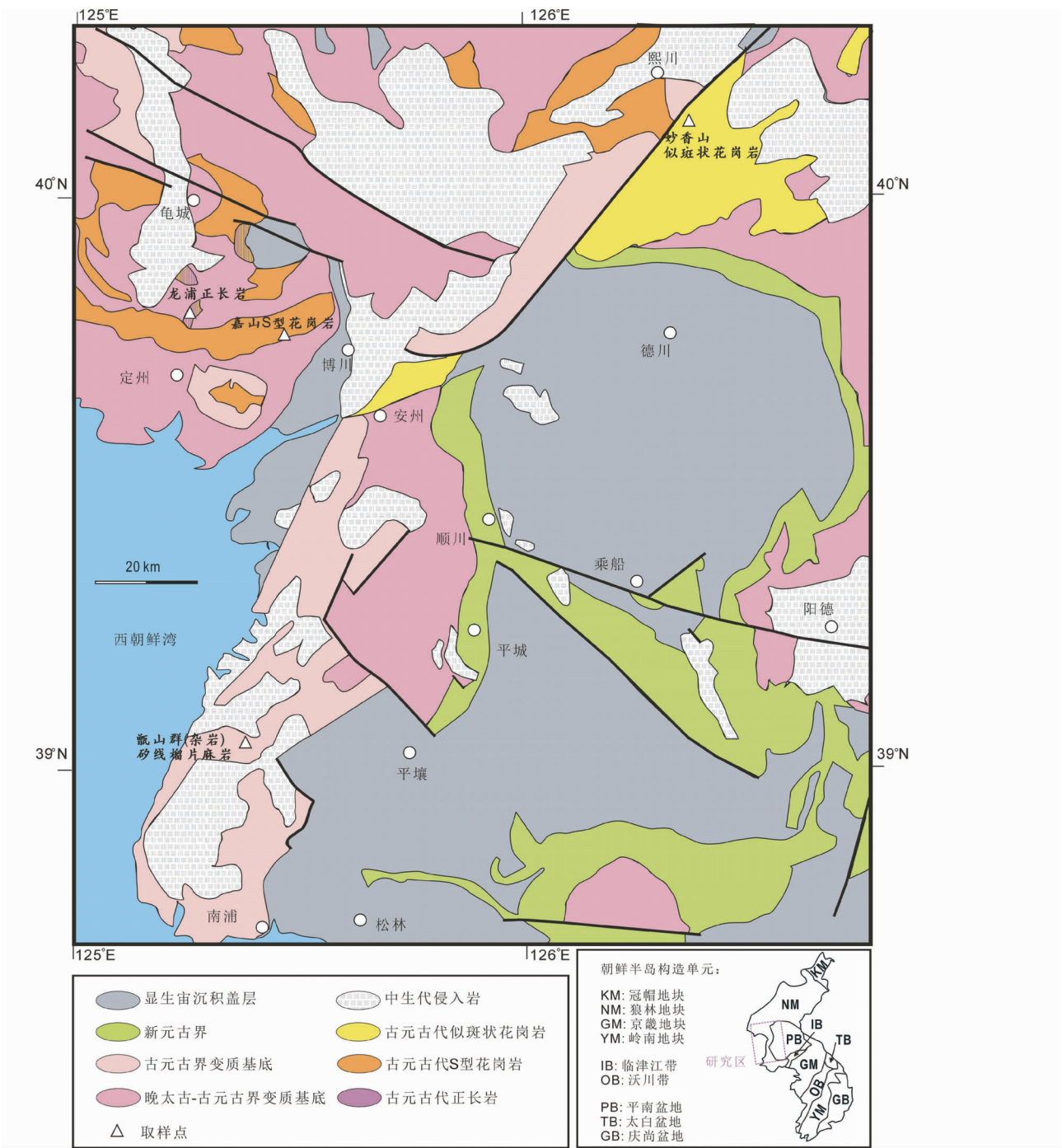


图2 朝鲜半岛平安南道-平安北道地质简图(据 Paek *et al.* ,1996 修改)
插图示朝鲜半岛主要构造单元
Fig. 2 Simplified geological map of the South and North Pyong'an provinces in Korean Peninsula (revised after Paek *et al.* , 1996)

以及一些片麻状花岗岩、片麻状花岗闪长岩等,以过铝为特征,K和Na的含量接近(Na-K质系列)。岩体整体上不规则,狼林群基底变质表壳岩系呈残余块状出露于这些岩体中,狼林“群”残片和该类岩体比例大致为18:82,因此被朝鲜地质学家认为是沉积岩部分熔融的产物(Paek *et al.* , 1996)。本文归为S型花岗岩系列。

第二类岩体群主要分布在狼林地块周缘,主要岩石类型以似斑状花岗岩为主;成分以过碱为特征,K的含量一般都大于Na(K质系列);有时与第一类岩群(S型花岗岩系列)边界不明显,并且,该类岩体常侵位于甑山“群”中,部分边界不清楚(Paek *et al.* , 1996)。后来,Han *et al.* (1998,2004)、Han (2011) 将其从莲花山杂岩中分离,单独建立

Myohayngsan(妙香山)杂岩。由于这一类岩体群以似斑状花岗岩和眼球状片麻岩为主,本文称为似斑状花岗岩(I型花岗岩)系列。第三类岩体群规模较小,多呈岩床和岩墙等产出,岩性主要为淡色花岗岩,尚不清楚其与前两者的关系;因其以过铝和钠质为特征,本文暂且将其归于S型花岗岩系列。

朔州杂岩主体为正长岩,本文称为正长岩系列。该类岩体主要分布在朔州、博川和定州等地,呈岩株状产出,出露面积为50km²或稍大,主要由正长辉石岩、霓辉正长岩、碱性正长岩、霞石岩、辉石霞石岩、微斜正长岩、钠长正长岩、碱性伟晶岩、钠长斑岩、石英正长岩、碱性煌斑岩等组成(Paek *et al.*, 1996;金正男等, 2016)。除了如石英正长岩和煌斑岩等以岩墙状产出的岩相,其他岩相为过渡关系,岩相边界不明显;岩体边部多为石英正长岩和正长辉石岩,而岩体中心部位多为霞石正长岩和霞石岩(Paek *et al.*, 1996)。

另外,甌山“群”/杂岩(Jungsan Group, Paek *et al.*, 1996)分布于平南盆地周缘及狼林地块北西缘,变质级别高达麻粒岩相(Paek *et al.*, 1996;李秋立等, 2016),可以分为4个“组”/单元,包括石榴石夕线石片麻岩单元(富铝片麻岩为主)、斜长角闪岩单元(斜长角闪岩及角闪斜长片麻岩为主;基性火山岩?)、长英质片麻岩单元(黑云母片麻岩、黑云斜长片麻岩及混合岩等;酸性火山岩?)以及变质碎屑岩单元(黑云斜长片麻岩、石榴石夕线石片麻岩、石英岩等)。

4 样品描述

本文样品分别来自嘉山岩体、妙香山岩体、龙浦岩体和甌山群/杂岩副片麻岩。

嘉山岩体位于狼林地块西部博川郡以西(图2),属于莲花山杂岩(Paek *et al.*, 1996),本文归属S型花岗岩系列。岩体近东西向延长,岩体大小约10×60km²。本次采集样品两件,岩性为石榴石堇青石二长岩和透辉石花岗岩(露头及岩石外貌见图3a,b)。前者为斑状结构,含有大小粒径不等的石榴石斑晶(直径达~1cm),含量约10%~20%;基质斜长石和钾长石含量基本相当(钾长石稍多),石英含量变化大,见堇青石(图3i)。透辉石花岗岩采自岩体脉状均匀细粒部分,等粒结构,石英含量多(45%),含粒状透辉石(15%)(图3j)。用于定年的样品(P14NK23)为石榴石堇青石二长岩(图3i)。

妙香山岩体属于莲花山杂岩体中的第二类岩体群(Paek *et al.*, 1996),或者Han *et al.* (1998, 2004)、Han (2011)定义的妙香山杂岩,本文归属似斑状花岗岩(I型花岗岩)系列。妙香山岩体是妙香山杂岩的代表岩体(Han *et al.*, 1998)。该岩体位于妙香山附近,呈三角形,面积约600 km²。岩性以似斑状花岗岩为主(图3c, k),岩体边部糜棱岩化(图3d), Zhai *et al.* (2007b)称其为环斑花岗岩。本次分析了 Zhai *et al.* (2007b)中样品的微量元素含量。

龙浦岩体属于Sakju(朔州)杂岩(Paek *et al.*, 1996),本

文归属正长岩系列。龙浦岩体侵入到S型花岗岩之中(图2; Paek *et al.*, 1996),岩体大小~20km²。岩性以正长岩为主,以含萤石和独居石等矿物为特征。本次采集的样品,岩性包括正长辉石岩(图3l)、含萤石霓辉正长岩(图3m)、辉石正长岩及其晚期的石英正长斑岩脉(图3n)。用于定年的样品(P14NK11)为正长辉石岩,含有普通辉石和正长石(图3l),并有萤石和独居石副矿物。

另外,本次工作还采集甌山群副片麻岩样品,用于测定变质作用时代。样品采自甌山郡附近(图3g, h),属于石榴石夕线石片麻岩单元,岩性为黑云母夕线石榴片麻岩(图3o)。

5 分析测试方法

锆石年代学分析使用Cameca IMS-1280 双离子源多接受器二次离子质谱仪。O²⁻离子束通过13kV加速电压,使用常规束斑(20×30μm)轰击样品表面。普通Pb采用现代地壳的平均Pb同位素组成(Stacey and Kramers, 1975),用测量的²⁰⁴Pb进行校正。分析结果如表2。全岩主量元素分析使用X-射线荧光光谱仪(XRF-1500),采用标准曲线法(经验系数法),基体效应采用数学模型校正。分析精度为~1%(含量>10%)到~10%(含量<1.0%)。通过湿化学滴定法测定FeO含量。全岩微量元素分析通过ICP-MS ELEMENT质谱计分析,相对标准偏差RSD≤2.5%。标样为GSR1、GSR2和GSR3。全岩主量微量元素分析结果见表3。以上测试均在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。

6 分析结果

6.1 代表性样品的年龄

样品P14NK23为石榴石堇青石花岗岩。锆石浑圆状,见冷杉叶状结构,直径多为100μm,见非常弱的环带结构(图4a)。锆石U、Th和Pb含量分别为393×10⁻⁶~1657×10⁻⁶、34×10⁻⁶~210×10⁻⁶(2号点为1079×10⁻⁶)和157×10⁻⁶~720×10⁻⁶,Th/U比为0.04~0.34(2号点为1.15)(表2)。19个数据点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄为1838~1878Ma,1个点(2号点)为2137Ma(表2)。所有点的谐和度均在95%以上。19个数据点构成一条不一致线,给出1869±82/-13Ma的上交点年龄和~950Ma的下交点年龄,MSWD=1.18。上交点年龄与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄一致(图4a);去掉3个点(点2、12、15),计算得到其他17个数据点²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄为1862±5Ma(MSWD=7.6)(图4a)。岩石为S型花岗岩,锆石年龄保留有~21亿年的信息,代表原岩中的碎屑锆石,由于锆石多为浑圆状,与麻粒岩相变质锆石类似,推测~1860Ma的年龄代表S型花岗岩的形

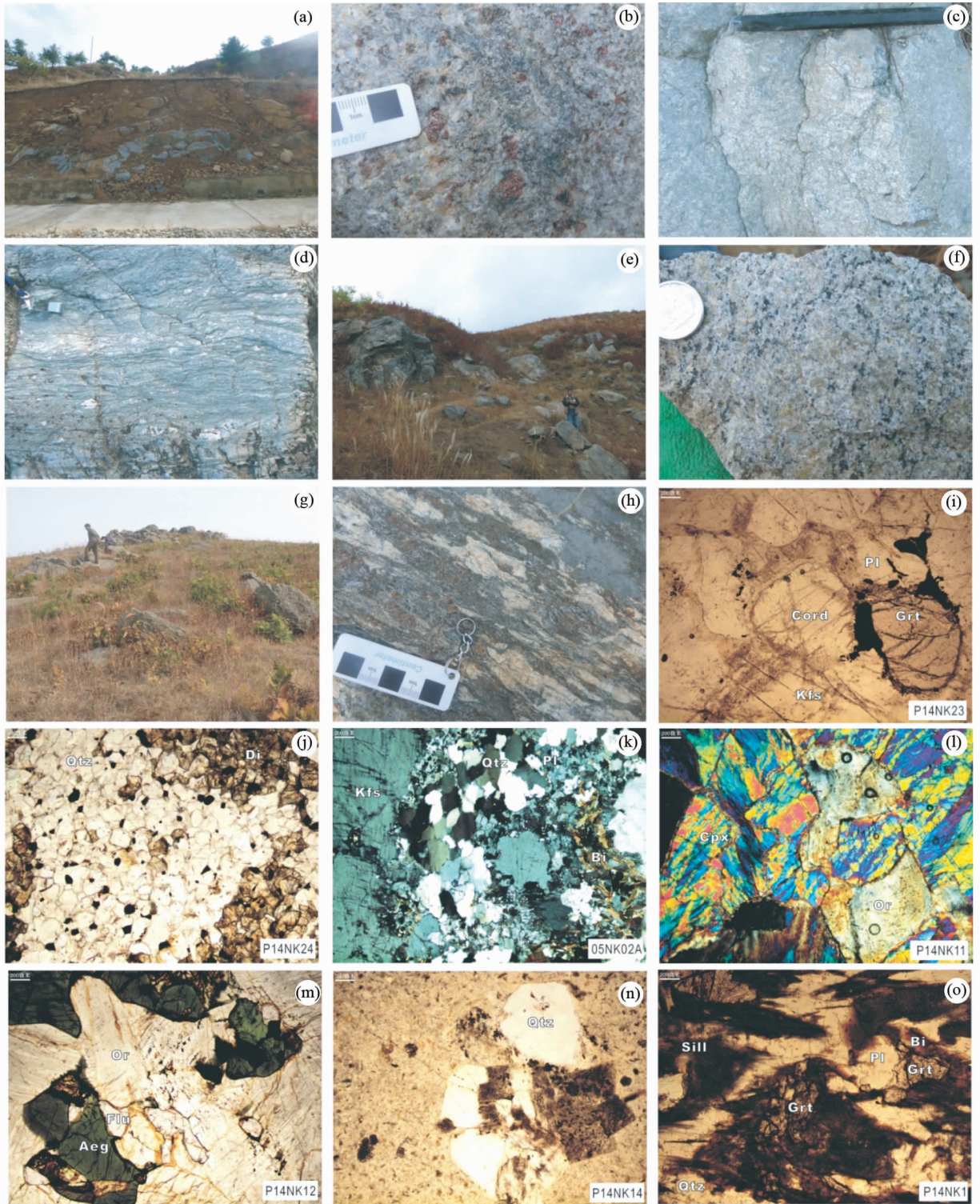


图3 代表性露头野外照片及代表性样品显微结构照片

(a) 石榴石堇青石花岗岩露头, 可见弱的片麻理; (b) 石榴石堇青石花岗岩近照; (c) 似斑状花岗岩, 长石有弱的定向; (d) 糜棱岩化似斑状花岗岩; (e) 正长岩露头; (f) 正长岩近照; (g) 甌山群夕线榴片麻岩露头; (h) 夕线榴片麻岩近照; (i) 石榴石堇青石二长岩 (单偏光, 样品号: P14NK23); (j) 透辉石花岗岩 (单偏光, 样品号 P14NK24); (k) 似斑状花岗岩显微照片 (正交光, 样品号 05NK02A); (l) 正长辉石岩 (正交光, 样品号 P14NK11); (m) 含萤石霓辉正长岩 (单偏光, 样品号 P14NK12); (n) 石英正长斑岩 (单偏光, 样品号 P14NK14); (o) 黑云石榴夕线片麻岩 (单偏光, 样品号 P14NK1). (j - o) 比例尺为 200 μ m. Kfs-钾长石; Qtz-石英; Pl-斜长石; Bi-黑云母; Sill-夕线石; Grt-石榴石; Cpx-单斜辉石; Or-正长石; Aeg-霓辉石; Flu-萤石; Cord-堇青石; Di-透辉石

Fig. 3 Photos of the representative outcrops and micro-images of selected samples

表 2 锆石 U-Pb SIMS 数据表

Spot No.	U		Th	Pb	Th/U ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma$ (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma$ (%)	误差相 关性	不谐和度 (%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
	U	Th	Th	Pb									年龄 (Ma)	$\pm\sigma$	年龄 (Ma)	$\pm\sigma$	年龄 (Ma)	$\pm\sigma$
PI4NK23 石榴石-堇青石二长岩 (嘉山 S 型花岗岩)																		
1	792	147	316	0.19	30589	5.11631	1.54	0.3255	1.54	0.99548	-2.95	1838.8	13.2	1816.4	24.4	1864.3	2.6	
2	941	1079	458	1.15	60836	7.04799	1.51	0.3845	1.50	0.99662	-2.21	2117.5	13.5	2097.1	27.0	2137.4	2.2	
3	519	107	207	0.21	19199	5.07612	1.55	0.3251	1.54	0.99147	-2.31	1832.1	13.2	1814.7	24.3	1852.0	3.6	
4	1143	45	471	0.04	44029	5.30503	1.51	0.3353	1.50	0.99526	-0.72	1869.7	13.0	1864.1	24.4	1875.8	2.6	
5	556	151	221	0.27	22845	5.06855	1.55	0.3247	1.53	0.99103	-2.43	1830.9	13.2	1812.5	24.3	1851.7	3.7	
6	663	95	266	0.14	33659	5.10998	1.51	0.3272	1.50	0.99410	-1.70	1837.8	12.9	1824.9	23.9	1852.3	3.0	
7	482	115	195	0.24	25669	5.15856	1.52	0.3303	1.50	0.98965	-0.78	1845.8	13.0	1839.9	24.1	1852.5	3.9	
8	449	69	180	0.15	24606	5.09137	1.62	0.3262	1.61	0.99116	-1.97	1834.7	13.8	1819.8	25.5	1851.6	3.9	
9	393	132	157	0.34	18369	5.08703	1.52	0.3259	1.51	0.98826	-2.04	1833.9	13.0	1818.6	23.9	1851.5	4.2	
10	635	34	254	0.05	30289	5.13323	1.51	0.3258	1.50	0.99524	-3.09	1841.6	12.9	1818.1	23.8	1868.3	2.6	
11	596	120	239	0.20	22076	5.11108	1.59	0.3268	1.58	0.99410	-2.02	1837.9	13.6	1822.6	25.2	1855.3	3.1	
12	1657	210	720	0.13	54544	5.59978	1.56	0.3535	1.55	0.99787	4.53	1916.1	13.5	1951.4	26.2	1878.0	1.8	
13	557	56	221	0.10	15056	5.05654	1.66	0.3245	1.64	0.98813	-2.26	1828.8	14.2	1811.8	26.0	1848.3	4.6	
14	550	142	227	0.26	20143	5.27552	1.53	0.3361	1.51	0.98780	0.40	1864.9	13.2	1867.9	24.6	1861.5	4.3	
15	439	131	177	0.30	12987	5.11972	1.55	0.3304	1.53	0.98395	0.14	1839.4	13.3	1840.4	24.5	1838.2	5.0	
16	620	142	257	0.23	16790	5.28585	1.55	0.3372	1.52	0.98046	0.87	1866.6	13.3	1873.2	24.7	1859.2	5.5	
17	857	49	360	0.06	24485	5.39208	1.51	0.3424	1.50	0.99585	1.87	1883.6	13.0	1898.0	24.7	1867.7	2.5	
18	624	42	252	0.07	15596	5.15829	1.54	0.3305	1.51	0.98333	-0.63	1845.8	13.2	1841.0	24.3	1851.2	5.1	
19	405	55	166	0.14	12240	5.24413	1.53	0.3329	1.52	0.99108	-0.94	1859.8	13.2	1852.7	24.5	1867.8	3.7	
20	998	59	415	0.06	34633	5.34029	1.63	0.3381	1.62	0.99597	0.29	1875.3	14.0	1877.6	26.5	1872.9	2.6	
PI4NK11 正长辉石岩 (龙浦正长岩)																		
1	456	140	180	0.31	28526	5.04005	1.53	0.3223	1.52	0.99241	-3.32	1826.1	13.0	1801.1	23.9	1854.7	3.4	
2	308	80	122	0.26	21171	5.02930	1.55	0.3224	1.53	0.98735	-3.01	1824.3	13.2	1801.6	24.0	1850.2	4.4	
3	431	134	174	0.31	30354	5.14190	1.52	0.3287	1.50	0.98917	-1.46	1843.1	13.0	1832.0	24.0	1855.6	4.0	
4	447	145	179	0.33	29149	5.10263	1.55	0.3269	1.53	0.98561	-1.74	1836.5	13.2	1823.4	24.3	1851.5	4.7	
5	506	182	202	0.36	32268	5.08216	1.51	0.3251	1.50	0.99477	-2.45	1833.1	12.9	1814.6	23.8	1854.3	2.8	
6	415	124	167	0.30	20972	5.12524	1.52	0.3287	1.50	0.99193	-1.12	1840.3	13.0	1831.9	24.0	1849.9	3.5	
7	370	118	150	0.32	27964	5.14921	1.56	0.3300	1.52	0.97744	-0.77	1844.3	13.3	1838.5	24.4	1850.8	5.9	
8	592	283	241	0.48	41660	5.20689	1.51	0.3319	1.50	0.99440	-0.80	1853.7	12.9	1847.6	24.2	1860.6	2.9	
9	423	141	170	0.33	28503	5.13070	1.52	0.3282	1.51	0.99198	-1.54	1841.2	13.0	1829.5	24.1	1854.4	3.5	
10	296	85	120	0.29	18679	5.15653	1.53	0.3308	1.50	0.98178	-0.40	1845.5	13.1	1842.4	24.1	1848.9	5.2	

彭澎等: 朝鲜~19 亿年侵入岩的岩石类型与构造背景初探

注: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为测量值, 其它比值为将 ^{204}Pb 视为普通 Pb 校正后的值

表 3 全岩主量(wt%)和微量(×10⁻⁶)数据表

Table 3 Whole-rock major (wt%) and trace element (×10⁻⁶) data

样品号	05NK02A	05NK02B	P14NK10	P14NK11	P14NK12	P14NK13	P14NK14	P14NK15	P14NK16	P14NK17	P14NK18	P14NK20	P14NK23	P14NK24
岩性	似斑状花岗岩	似斑状花岗岩	辉石正长岩	正长辉石岩	含萤石霓辉正长岩	辉石正长岩	石英正长斑岩	霓辉正长岩	霓辉正长岩	辉石正长岩	辉石正长岩	石榴二长岩	石榴二长岩	透辉石花岗岩
岩体	妙香山岩体			龙浦岩体										
SiO ₂	66.0	68.4	60.3	58.8	65.5	59.6	74.9	58.8	59.9	58.7	55.3	54.5	55.7	73.0
TiO ₂	0.28	0.33	0.20	0.19	0.04	0.36	0.01	0.07	0.08	0.07	1.35	0.91	0.85	0.46
Al ₂ O ₃	15.8	15.8	13.6	14.9	19.3	15.2	14.3	15.3	14.8	15.3	15.0	22.4	20.9	11.1
Fe ₂ O ₃ ^T	1.8	2.5	8.3	11.0	1.1	8.6	0.9	3.6	5.1	3.6	10.0	11.1	10.8	5.7
MnO	0.02	0.04	0.22	0.34	0.03	0.22	0.10	0.10	0.14	0.10	0.16	0.11	0.14	0.63
MgO	0.30	0.41	0.63	0.33	0.00	0.54	0.05	0.25	0.35	0.25	1.75	4.36	3.65	2.74
CaO	1.16	1.77	5.70	3.01	0.05	2.75	0.30	7.23	6.31	7.21	4.13	2.50	0.88	6.18
Na ₂ O	2.13	2.86	5.27	5.45	6.21	5.63	5.11	5.45	5.29	5.41	4.14	2.68	1.66	0.37
K ₂ O	8.43	5.81	4.40	4.93	7.12	5.28	4.06	5.41	5.50	5.47	5.55	0.88	4.68	0.07
P ₂ O ₅	0.21	0.10	0.26	0.09	0.03	0.52	0.04	0.68	0.48	0.67	0.73	0.09	0.07	0.19
LOI	0.67	0.73	0.60	0.34	0.68	0.68	0.36	1.90	1.30	1.96	1.12	0.94	0.66	0.28
Total	96.7	98.7	99.5	99.4	100.1	99.4	100.1	98.7	99.3	98.7	99.2	100.4	100.0	100.8
K ₂ O/Na ₂ O	4.0	2.0	0.8	0.9	1.1	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.3	0.3	2.8	0.2
Mg [#]	24	23	12	5	0	10	9	11	11	11	25	42	39	47
Rb	252	206	25.4	56.2	228	45	181	176	342	18.9	64.4	50.8	92.1	1
Sr	203	182	122	389	773	209	348	634	620	147	599	148	189	227
Ba	1593	1155	36.6	120	832	88.2	62.2	441	538	43.3	844	199.4	959	20.6
Th	29.6	110	15.1	36.0	10.7	26.3	9.95	29.0	19.8	115	40.8	40.9	27.4	12.7
U	1.30	2.19	16.8	19.6	1.46	14.9	4.64	4.59	2.51	15.1	13.6	3.81	1.88	2.72
Pb	53.5	56.4	39.6	50.8	21.8	33.4	22.0	48.6	31.5	25.0	48.5	18.8	31.9	8.76
Zr	180	316	49.4	79.4	50.9	274	35.3	245	415	51.6	345	181	191	216
Hf	4.90	8.81	8.15	1.99	1.25	15.7	8.00	9.06	13.7	16.2	20.8	5.79	5.81	6.28
Nb	8.76	11.4	4.90	5.30	1.56	27.8	12.7	0.88	0.82	1.37	58.2	20.3	20.0	10.1
Ta	0.54	0.58	0.23	0.23	0.06	1.25	2.27	0.05	0.05	0.13	2.92	1.36	1.33	0.96
Sc	2.68	4.72	7.91	1.48	1.11	4.32	2.81	2.70	2.97	5.46	9.00	9.91	21.0	7.22
V	19.7	23.2	12.6	6.91	6.25	10.5	6.15	7.50	8.23	13.1	30.7	223	174	41.3

续表 3
Continued Table 3

样品号	05NK02A	05NK02B	P14NK10	P14NK11	P14NK12	P14NK13	P14NK14	P14NK15	P14NK16	P14NK17	P14NK18	P14NK20	P14NK23	P14NK24
岩性	似斑状花 岗岩	似斑状花 岗岩	辉石正 长岩	正长辉 石岩	含萤石霓 辉正长岩	辉石正 长岩	石英正长 斑岩	霓辉正 长岩	霓辉正 长岩	辉石正 长岩	辉石正 长岩	石榴二 长岩	石榴二 长岩	透辉石花 岗岩
岩体	妙香山岩体			龙浦岩体										
岩体	妙香山岩体			龙浦岩体										
Cr	7.04	8.21	43.1	67.7	39.6	45.5	133	66.8	51.5	55.8	41.0	398	399	318
Co	3.81	4.50	4.26	6.07	0.50	4.73	0.62	2.23	2.62	5.88	11.8	48.1	32.7	13.5
Ni	1.58	4.40	14.5	8.12	9.92	49.5	19.7	7.30	10.7	7.11	10.2	71.3	46.9	39.7
Cu	1.78	4.13	11.7	8.38	14.3	26.1	23.5	14.8	9.13	5.15	13.2	97.8	54.9	7.10
Be	0.85	1.63	10.9	4.47	0.98	4.70	2.88	4.36	5.54	11.3	15.3	11.7	19.6	8.91
Ga	19.0	22.7	40.8	35.3	31.4	37.2	21.2	34.8	32.4	115	37.4	30.2	23.7	12.2
Cs	1.63	1.91	1.80	0.50	0.71	1.52	2.09	1.07	2.17	1.22	2.26	4.72	3.78	0.13
Li	16.3	30.2	11.7	4.79	1.05	5.03	3.08	4.67	5.93	12.1	16.4	12.5	21.0	9.53
La	59.8	171	141	153	83.9	150	9.3	239	335	529	157	91.0	57.9	31.9
Ce	129	359	349	523	169	513	14.6	706	755	1634	571	191	115	66.3
Pr	14.1	39.0	68.2	54.7	18.4	49.8	2.39	79.6	90.2	150	58.1	20.3	12.8	7.87
Nd	50.6	130	208	196	56.6	190	8.74	289	297	999	223	74.7	48.3	30.1
Sm	9.13	19.0	133	58.1	6.63	60.3	2.54	51.6	35.4	112	60.8	12.0	8.08	5.58
Eu	1.36	1.27	20.5	9.54	1.75	9.54	0.07	8.44	6.22	56.7	8.56	1.33	1.60	0.84
Gd	7.42	13.5	102	46.8	4.40	48.8	2.52	34.0	23.2	71.2	42.47	9.48	7.38	5.01
Tb	1.05	1.78	10.8	4.69	0.49	4.86	0.49	3.44	2.42	28.8	4.17	1.39	1.38	0.78
Dy	5.81	10.4	45.3	19.7	2.22	20.2	3.36	13.9	9.88	106.4	16.4	7.92	8.98	4.29
Ho	1.19	2.25	8.34	3.66	0.39	3.70	0.75	2.33	1.74	18.4	2.82	1.63	1.96	0.86
Er	3.14	6.80	19.1	9.21	1.01	9.09	2.27	5.83	4.36	44.8	7.17	4.40	5.29	2.30
Tm	0.45	1.08	2.25	1.18	0.15	1.16	0.37	0.77	0.62	4.92	0.93	0.65	0.79	0.35
Yb	2.72	7.17	12.9	7.00	0.98	7.04	2.65	5.08	4.63	28.5	5.71	4.24	5.24	2.35
Lu	0.40	1.12	1.94	1.03	0.16	1.06	0.41	0.87	0.90	4.13	0.84	0.64	0.78	0.35
Y	29.6	54.4	38.1	34.5	9.55	33.3	20.7	58.6	43.4	37.9	39.7	38.4	45.6	21.5
Eu*	0.51	0.24	0.54	0.56	0.99	0.54	0.09	0.62	0.66	1.94	0.51	0.38	0.63	0.49
(La/Yb) _N	15.7	17.1	7.83	15.7	61.5	15.2	2.53	33.8	51.9	13.3	19.8	15.4	7.94	9.76
(Gd/Yb) _N	2.25	1.56	6.56	5.53	3.72	5.74	0.79	5.54	4.14	2.06	6.16	1.85	1.17	1.77
RFE + Y	315	818	1160	1122	356	1102	71.1	1498	1609	3825	1199	459	321	180

注: Eu* = (Eu_N)/(Sm_N × Gd_N)^{1/2}; Eu_N, Sm_N, Gd_N, (La/Yb)_N 和 (Gd/Yb)_N 均为球粒陨石标准化后的值(球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

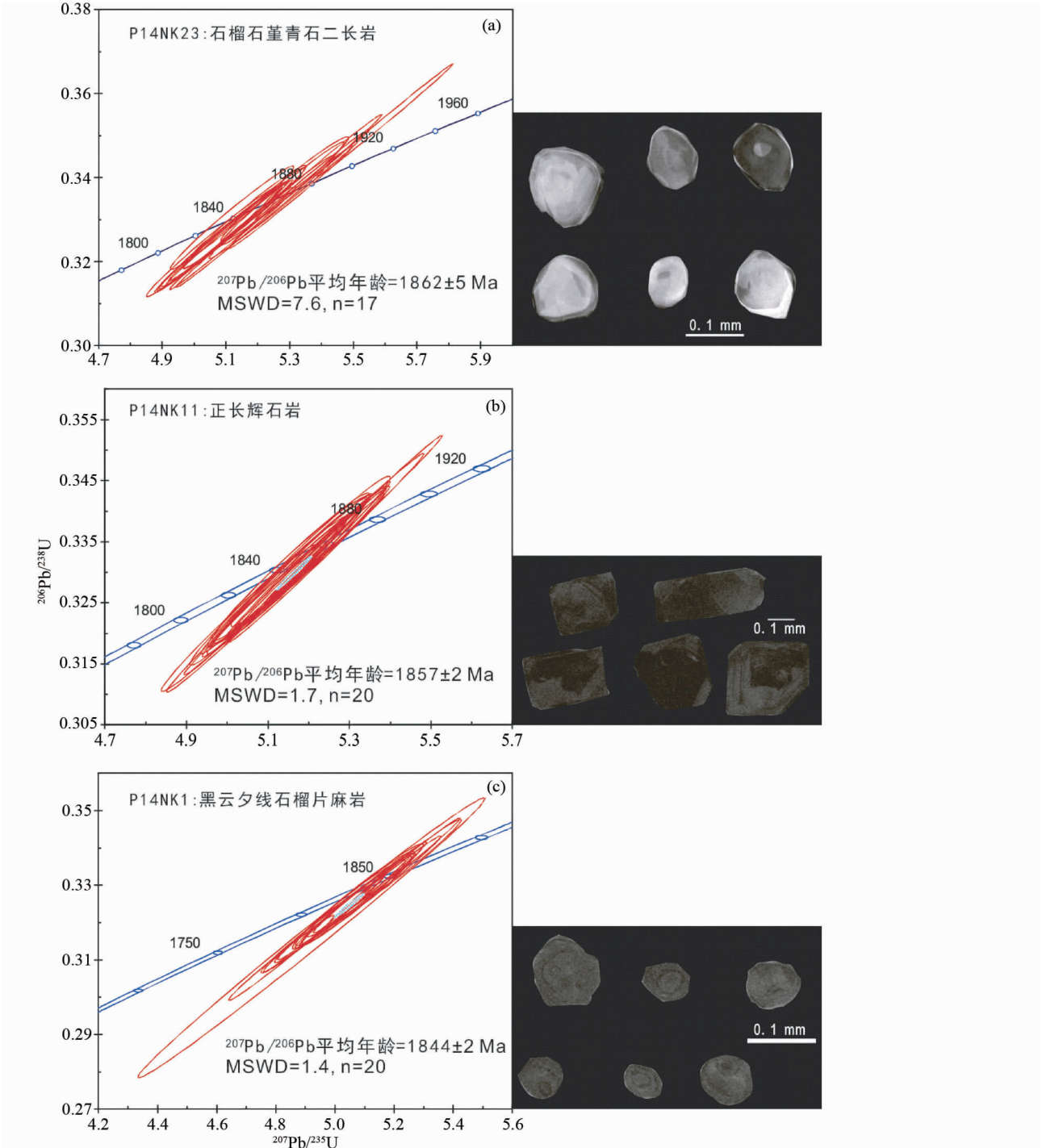


图4 U-Pb 年龄谐和图

(a) 石榴石堇青石二长岩 (P14NK23, 嘉山岩体); (b) 正长辉石岩 (P14NK11, 龙浦岩体); (c) 黑云夕线石榴片麻岩 (P14NK1, 甌山“群”)。插图示年龄样品代表性锆石阴极发光照片

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of the representative samples

Insets are selected cathodoluminescence (CL) images of representative zircons

成时代,同时也近似为本区麻粒岩相变质时代。

样品 P14NK11 为正长辉石岩。锆石多为短柱状(长宽比接近 1 : 1),少数为长柱状,短柱的边长约 ~0.2mm。锆石阴极发光较弱,但部分颗粒仍可见韵律环带(图 4b)。锆石

U、Th 和 Pb 含量分别为 $295 \times 10^{-6} \sim 931 \times 10^{-6}$ 、 $66 \times 10^{-6} \sim 323 \times 10^{-6}$ 和 $120 \times 10^{-6} \sim 378 \times 10^{-6}$, Th/U 比为 0.14 ~ 0.48 (表 2)。20 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1849 ~ 1864Ma,比较集中,且所有点的谐和度均在 95% 以上(表 2)。

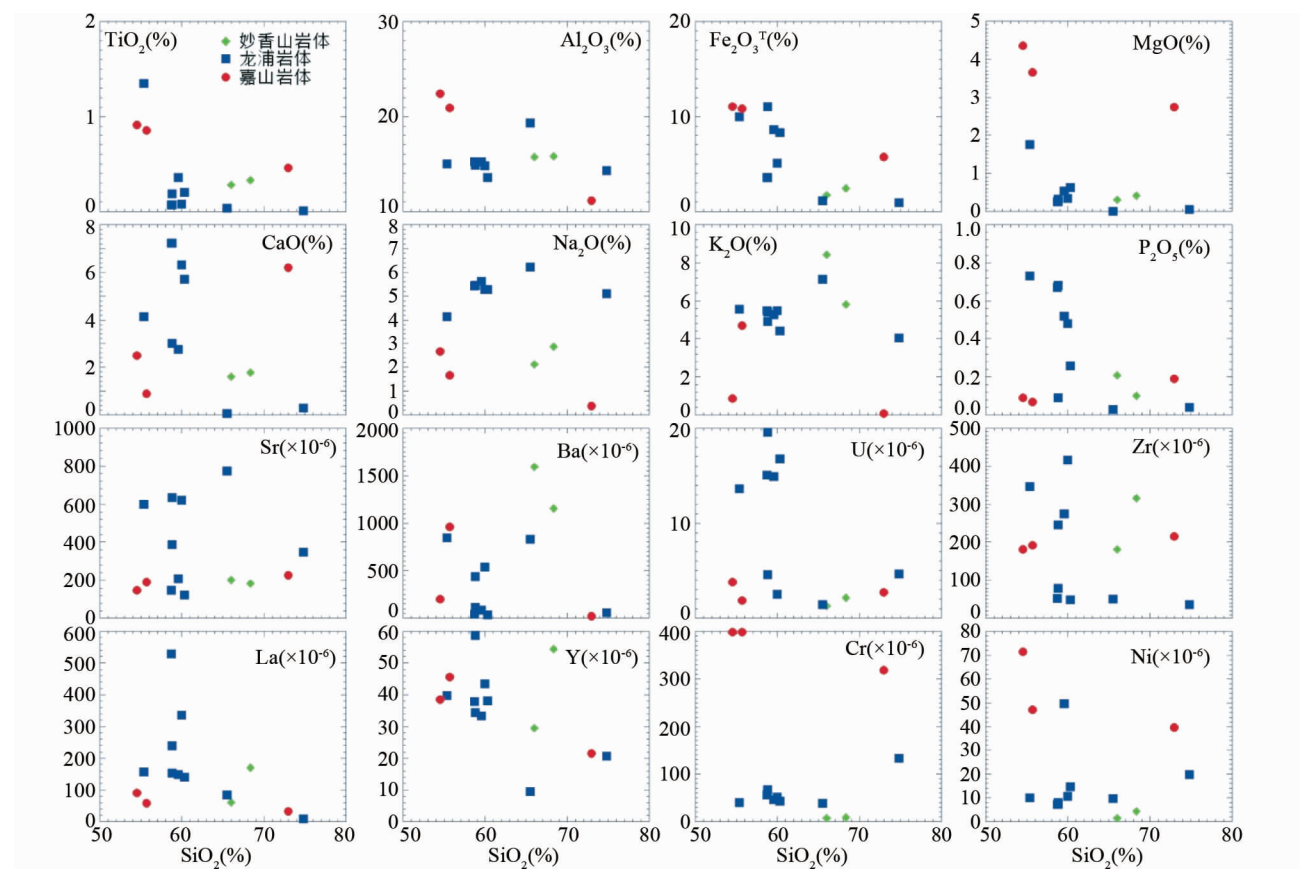


图5 代表性样品部分主量、微量元素与 SiO₂ 含量相关图解

Fig. 5 Selected major/trace elements vs. SiO₂ covariation plots

计算得到 20 个点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1857 ± 2Ma (MSWD = 1.7), 与谐和年龄基本一致(图 4b)。由于锆石多为柱状且成分韵律环带发育, 加上岩石为岩浆岩, 确定其年龄代表结晶时代。

样品 P14NK1 为甌山“群”黑云夕线石榴片麻岩。锆石多为浑圆状, 直径 50 ~ 100 μm, 环带结构不发育, 阴极发光颜色较暗(图 4c)。锆石 U、Th 和 Pb 含量分别为 174 × 10⁻⁶ ~ 659 × 10⁻⁶ (3 号点为 1278 × 10⁻⁶)、54 × 10⁻⁶ ~ 419 × 10⁻⁶ 和 70 × 10⁻⁶ ~ 529 × 10⁻⁶, Th/U 比为 0.12 ~ 1.11 (表 2)。20 个数据点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄为 1823 ~ 1852Ma (表 2)。所有点的谐和度均在 95% 以上。计算得到 20 个数据点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1844 ± 2Ma (MSWD = 1.4; 图 4c)。岩石属于变质岩(见本期关于甌山“群”的研究, 李秋立等, 2016), 锆石具有变质锆石特征, 推测 ~ 1840Ma 的年龄代表岩石的变质年龄。

6.2 代表性岩体的岩石化学特征

嘉山岩体主体岩性为石榴石堇青石花岗岩系列(S 型花岗岩)。2 件石榴石堇青石二长岩样品, SiO₂ 含量为 ~ 55%、TiO₂ 为 ~ 0.9%、Al₂O₃ 为 ~ 22%、Fe₂O₃^T 为 ~ 11%、MgO 为

~ 4%、CaO、Na₂O 和 K₂O 含量变化较大, 分别为 0.9% ~ 2.5%、1.7% ~ 2.7% 和 0.9% ~ 4.7%; 1 件样品为透辉石花岗岩(岩体中的细粒部分), SiO₂ 含量 73%、TiO₂ 为 0.5%、Al₂O₃ 为 11.1%、Fe₂O₃^T 为 5.7%、MgO 为 2.7%、CaO 为 6.2%、Na₂O 为 0.4%、K₂O 为 0.1%、P₂O₅ 为 0.2% (图 5、表 3)。这些岩石的微量元素变化较小, 总稀土元素含量 180 × 10⁻⁶ ~ 459 × 10⁻⁶, 球粒陨石标准化稀土元素配分图上, 显示明显的轻稀土富集 ((La/Yb)_N = 8 ~ 15), Eu 明显负异常 (Eu* = 0.4 ~ 0.6) (图 6); 原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 样品显示明显的高场强元素负异常(如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti), 并且显示明显的 Sr 和 Ti 等元素的负异常(图 6)。

妙香山岩体岩性为似斑状花岗岩, 本文 2 件样品 SiO₂ 含量 66% ~ 68%、TiO₂ 为 ~ 0.3%、Al₂O₃ 为 ~ 15.8%、Fe₂O₃^T 为 1.8% ~ 2.5%、MgO 为 0.3% ~ 0.4%、CaO 为 1.2% ~ 1.8%、Na₂O 为 2.1% ~ 2.9%、K₂O 为 5.8% ~ 8.4%、P₂O₅ 为 0.1% ~ 0.2% (图 5、表 3)。总稀土元素含量 315 × 10⁻⁶ ~ 818 × 10⁻⁶, 球粒陨石标准化稀土元素配分图上, 显示明显的轻稀土富集 ((La/Yb)_N = 16 ~ 17), Eu 明显负异常 (Eu* = 0.2 ~ 0.5) (图 6); 原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 样品显示明显的高场强元素负异常(如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti), 并且显示

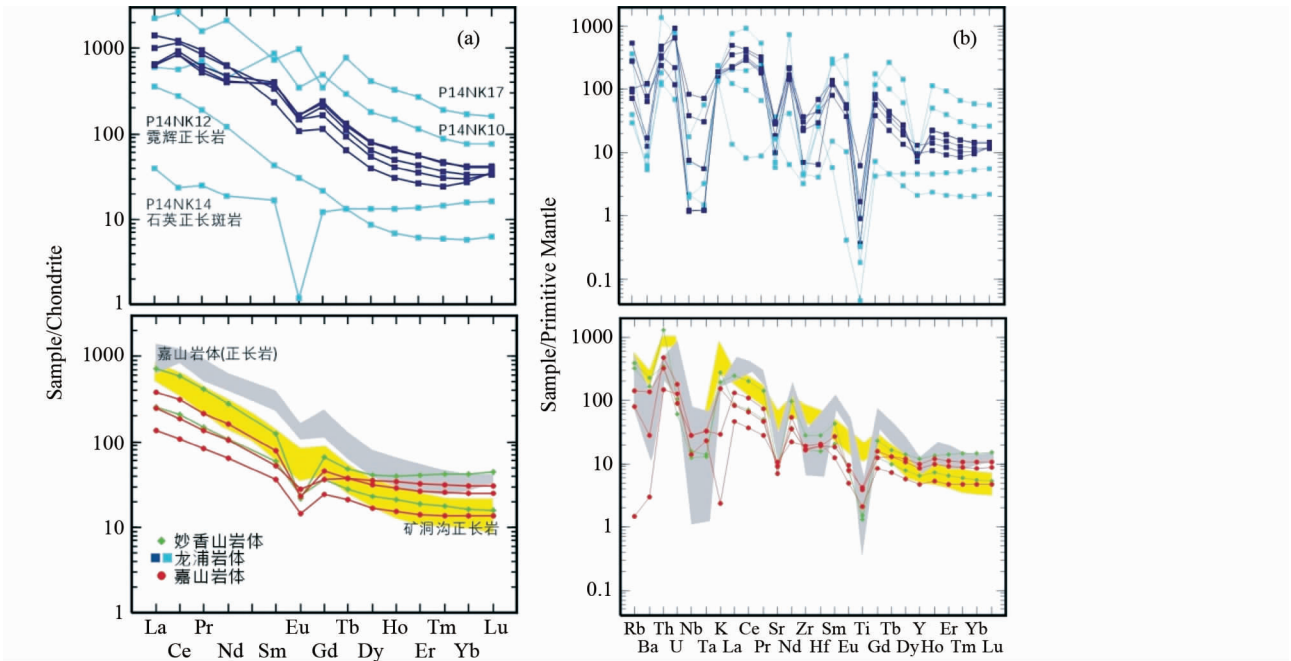


图6 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
矿洞沟岩体数据引自杨进辉等(2007)

Fig. 6 Chondrite-normalized trace element diagram (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b)
(normalization values after Sun and McDonough, 1989)

明显的 Sr 和 Ti 等元素的负异常(图6)。

龙浦岩体主体为正长岩(正长辉石岩、辉石正长岩、霓辉正长岩等),晚期脉体岩性为石英正长斑岩。主体岩石(正长岩)SiO₂ 含量为 55.3% ~ 59.9%、TiO₂ 含量多小于 0.4(样品 P14NK18 为 1.35%)、Al₂O₃ 为 14.8% ~ 15.3%、Fe₂O₃^T 为 3.6% ~ 11%、MgO 为 0.1% ~ 0.3% (样品 P14NK18 为 1.75%)、CaO 为 2.7% ~ 7.2%、Na₂O 为 4.1% ~ 5.6%、K₂O 为 4.9% ~ 5.6%、P₂O₅ 为 0.1% ~ 0.7%、Sr 为 209 × 10⁻⁶ ~ 634 × 10⁻⁶、Ba 为 43 × 10⁻⁶ ~ 844 × 10⁻⁶、U 为 2.5 × 10⁻⁶ ~ 20 × 10⁻⁶、Zr 为 51 × 10⁻⁶ ~ 415 × 10⁻⁶、La 为 150 × 10⁻⁶ ~ 529 × 10⁻⁶、Y 为 33 × 10⁻⁶ ~ 58 × 10⁻⁶、Cr 为 41 × 10⁻⁶ ~ 68 × 10⁻⁶、Ni 为 7.1 × 10⁻⁶ ~ 50 × 10⁻⁶(图5、表3)。总稀土元素含量高(1100 × 10⁻⁶ ~ 3800 × 10⁻⁶),球粒陨石标准化稀土元素配分图上,显示明显的轻稀土富集(La/Yb)_N = 13 ~ 51),Eu 中度负异常(Eu* = 0.5 ~ 0.7),个别样品正异常(P14NK17)(图6);原始地幔标准化微量元素蛛网图上,样品显示明显的高场强元素负异常(如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti),并且显示明显的 Sr 和 Ti 等元素的负异常(图6)。花岗斑岩-石英斑岩与石英正长岩相比, SiO₂ (65% ~ 75%) 较高, TFe₂O₃ (~1%), Zr(35 × 10⁻⁶ ~ 51 × 10⁻⁶)、La(9 × 10⁻⁶ ~ 84 × 10⁻⁶)和 Y(10 × 10⁻⁶ ~ 21 × 10⁻⁶)等均明显要低(图5、表3);总轻稀土含量明显低(71 × 10⁻⁶ ~ 356 × 10⁻⁶),其中石英斑岩样品显示强烈的 Eu 负异常(Eu* = 0.1)(图6)。

7 讨论

7.1 朝鲜 ~19 亿年岩浆岩的岩石系列及其与邻区岩浆岩类型比较

综合前人研究,我们将朝鲜 ~19 亿年的岩浆岩分为三类,分别为 S 型花岗岩系列(以嘉山岩体为代表,对应 Han (2011)划分的 Myohyangsan(妙香山)杂岩体,或者 Paek *et al.* (1996)划分的 Ryonhwasan(莲花山)杂岩体第一和第三类岩群)、似斑状花岗岩系列(I 型花岗岩)(以妙香山岩体为代表,对应 Paek *et al.* (1996)划分的 Ryonhwasan(莲花山)杂岩体第二类岩群)和正长岩系列(以龙浦岩体为代表,对应 Paek *et al.* (1996)划分的 Sakju(朔州)杂岩体)。其中, S 型花岗岩主要分布在狼林地块和主要隆起带中,与麻粒岩相变质的甑山“群”、狼林“群”副变质岩共生。也见报道于朝鲜东海岸高城一带(Zhao *et al.*, 2006)。另外,我们考察了咸兴-端川一带,这里的岩石产状与南浦一带 S 型花岗岩类似,产出于狼林“群”或摩天岭群之中,但还需要进一步工作。S 型花岗岩系列的岩石类型以(黑云母)石榴石堇青石二长岩和(黑云母)石榴石堇青石花岗岩、石榴石花岗岩为主;部分样品石榴石和堇青石含量很高(达 20%),富石英部分与富石榴石部分分离,因此全岩成分偏中性(~55%),本文仍称为 S 型花岗岩系列。似斑状花岗岩(I 型花岗岩)系列分布较

广,见于主要基底岩石出露区(图1),岩石以发育钾长石巨斑为特征,主要矿物组合为钾长石、斜长石、石英和黑云母。与麻粒岩相变质的甌山“群”关系密切。正长岩系列主要分布在朔州、博川和定州等地,呈岩株状产出,主要由正长辉石岩、霓辉正长岩、碱性正长岩、霞石岩、辉石霞石岩、微斜正长岩、钠长正长岩、碱性伟晶岩、钠长斑岩、石英正长岩、碱性煌斑岩等组成。

辽宁和吉林东部与朝鲜相比,最大的不同是,这些地区以发育~21.8 亿年 A 型花岗岩和~21.2 亿年基性岩床为主,ca. 18~19 亿年的岩石较少,只有个别岩体时代接近,如矿洞沟正长岩(~1870Ma;杨进辉等,2007)等;S-型花岗岩不发育。显示这两个地区岩浆岩类型存在整体差异。不过,辽宁和吉林东部地区同样经历了 ca. 19~18 亿年变质作用(表1及文献),变质级别多为角闪岩相。显示两个相邻地区~21 亿年时构造背景不同,而 ca. 18~19 亿年期间,可能属于同样的构造背景,只是深熔作用程度不同。辽东-吉南地区变质作用较低可能是导致由沉积岩系部分熔融形成的花岗岩并不发育的原因。

山东半岛与朝鲜相比,岩浆岩类型同样不发育 S 型花岗岩,但发育其他类型的花岗岩,这些花岗岩,可能和混合岩化有一定关系(Liu *et al.*, 2014a)。另外,山东半岛同样发育~21 亿年岩浆岩(Liu *et al.*, 2014b; Wang *et al.*, 2014)。从变质作用的角度来看,山东半岛经历较强的 ca. 19.5~18 亿年变质作用(表1及文献),该地区变质时代延续较长,但是否是同一期变质,还是属于两期不同变质,尚不清楚(Peng *et al.*, 2014)。山东半岛和辽东-吉南一样,都经历了不同程度的 ca. 18~19 亿年的变质作用的影响:辽东-吉南地区变质作用的古元古代建造主要是辽河群火山沉积岩(Lu *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008; Li and Zhao, 2007); 山东半岛记录变质作用的古元古代建造主要是荆山群(火山沉积岩系)和粉子山群(沉积岩系)(Tam *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2014b; Zhao *et al.*, 2015)。朝鲜的古元古代建造如甌山“群”(变质火山沉积岩系:李秋立等,2016)和摩天岭群(变质火山沉积岩系:廖鑫等,2016); 狼林“群”被认为属于太古宙(Paek *et al.*, 1996),但新的年代学数据显示其可能为古元古代沉积建造(赵磊等,2016)。由此看来,山东半岛与朝鲜半岛北部可能更具有可对比性。

朝鲜半岛南部同样发育~19 亿年岩浆岩,然而,从目前的数据来看,其岩石类型以似斑状花岗岩为主,并有少量紫苏花岗岩, Kim *et al.* (2014)认为这些岩浆岩发育于岛弧背景,与陆块聚合过程有关。长期以来,华北和华南陆块在朝鲜半岛的边界存在争议(Yin and Nie, 1993; 徐嘉炜和朱光, 1995; Ree *et al.*, 1996; Chang and Park, 2001; Oh *et al.*, 2006; Oh, 2012; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Zhai *et al.*, 2007a; Oh and Kusky, 2007; Kim *et al.*, 2011a)。从~19 亿年前后的岩浆的研究表明,狼林地块及京畿地块北侧(图1)均发育~19 亿年 S 型花岗岩和似斑状花岗岩,同时,京畿地

块北缘还发育~25 亿年基底岩系,这与京畿地块南侧-岭南地块仅发育似斑状花岗岩存在明显差异。这可能暗示两者的基底属性存在差异。研究表明,晚三叠纪的变质作用区域横穿朝鲜半岛中部(图1、表1),主要分布在京畿地块范围(图1);同时三叠纪岩浆岩(正长岩-二长岩)也贯穿朝鲜半岛中部,覆盖锆石年龄记录的同期变质作用范围,并且覆盖狼林地块南侧和岭南地块(图1)。彭澎等(2016)认为这一区域可能对应华北和华南两个地块在朝鲜的界线,这一认识与~19 亿年岩浆岩朝鲜半岛南北部存在差异是一致的。

7.2 朝鲜~19 亿年岩浆岩的岩石成因分析

根据本文及前人已经发表的数据(表1),这三类岩浆岩系列的形成时代为~18.5 亿年。而这些地区都经历了~18.5 亿年的高级变质作用(Paek *et al.*, 1996; 赵磊等, 2016; 李秋立等, 2016; 翟明国, 2016)。本文得到的变质作用 U-Pb 年龄(1844Ma)略小于岩浆岩的形成时代;但是,考虑到锆石年龄可能代表变质作用退变质时代(赵磊等, 2016; 李秋立等, 2016),我们推测,岩浆岩的形成时代可能与麻粒岩相变质作用进变质时代接近。

我们认为, S 型花岗岩的原岩与副片麻岩密切相关,其形成与同期区域麻粒岩相变质作用存在因果联系,这是因为:1) S 型花岗岩均分布在麻粒岩相变质副片麻岩中(如,嘉山岩体分布于狼林“群”中); 2) S 型花岗岩与副片麻岩多为过渡关系,边界不清楚(Paek *et al.*, 1996); 3) S 型花岗岩非常富铝(如 A/CNK = ~3; 图7a),表明其原岩为沉积岩。不过,这些岩浆岩的 MgO 含量比较高, SiO₂ 比较低(~55%)。同时,岩体内部富石英部分和富石榴石部分有分离的迹象。我们认为,这些“二长岩”可能是原地熔融熔体的一部分抽离后转熔反应形成矿物与残余熔体的“混合”。当然,考虑到即使是细粒富石英部分的 MgO 含量和 Mg[#] 值均较高(SiO₂ 为~74%, MgO ~3%, Mg[#] = 100 × Mg/(Fe²⁺ + Mg) 摩尔比 = 47),不排除有幔源岩浆的贡献。

似斑状花岗岩(I 型花岗岩)系列与 S 型花岗岩相比,不含堇青石或者夕线石,石榴石含量少或者无;主量成分上,铁镁含量明显低很多;微量元素配分型式大体相似,似斑状花岗岩轻稀土稍微富集一些。似斑状花岗岩成分相对均匀,并且多发育于原岩为变质火山-沉积岩系的甌山“群”中,其来源可能就是火山岩系。大量火山岩作为源岩可能是导致似斑状花岗岩成分上更类似 I 型花岗岩的原因。我们认为,二者有成因联系,可能都以表壳岩系作为源岩,所不同的是, S 型花岗岩更为富铝,可能来自泥质岩或者副变质岩,而似斑状花岗岩则可能来自火山岩或者正变质岩。

正长岩系列 MgO 含量低(<2%),相容元素如 V、Cr 和 Ni 含量低(表3);其 Na₂O 含量和稀土含量明显高于 S 型花岗岩和似斑状花岗岩(图5);与 S 型花岗岩相比,明显高的 Na₂O + K₂O 含量(>9%);与似斑状花岗岩相比, K₂O/Na₂O 比较小(大致为1)。虽然正长岩可以来源于富集的岩石圈

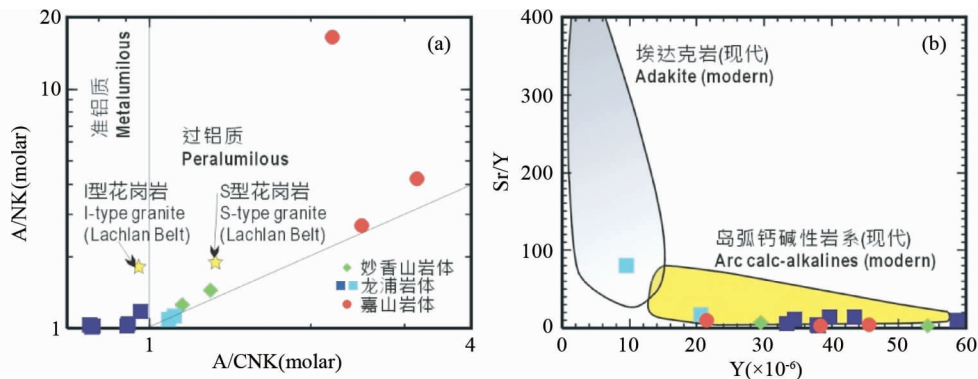


图7 A/NK-A/CNK图解(a)和Sr/Y-Y图解(b)(据Defant *et al.*, 2002)

A = Al_2O_3 ; NK = $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; CNK = $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

Fig. 7 A/NK vs. A/CNK (molar) diagram (a) and Sr/Y vs. Y diagram (b) (after Defant *et al.*, 2002)

地幔部分熔融(Brown and Becker, 1986; Sutcliffe *et al.*, 1990; Yang *et al.*, 2005),但是鉴于嘉山正长岩非常低的MgO和相容元素含量,我们认为这一岩体来源于地幔的可能性较低。实验岩石学研究表明,正长岩可以形成于高压下地壳物质的部分熔融(如Huang and Wyllie, 1981; Johannes and Holts, 1990),我们推测其可能来源于陆壳物质的相对高压下的部分熔融。其高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (图6a)比和相对低的Y元素含量(图7b)支持其源区有石榴石残留,但其低的Sr/Y比(图7b)则可能说明源区亦有长石残留,或者与岩体内部的结晶分异过程有关。当然这一推断还有待结合其他岩相进一步讨论。

朝鲜发育~19亿年岩浆岩,岩石类型以S型花岗岩、似斑状花岗岩为主,并有少量正长岩,这一地区同时经历了区域性高级变质作用。强烈的岩浆-热事件导致本区发生深熔作用,并可能形成大量的、原地就位的壳岩岩浆岩(S型花岗岩和似斑状花岗岩)。正长岩的发育,可能是由于部分地壳被加厚,并发生部分熔融,当然,也不排除幔源的可能。我们认为,这些岩浆活动可能发育于活动大陆边缘,也可能形成于造山后伸展背景。然而,鉴于岩浆活动和麻粒岩相变质作用基本同期或者稍早,变质作用后期缺少岩浆活动证据,我们倾向于认为这些岩浆岩形成于大陆边缘弧背景。其低的Sr/Y值和高的Y含量(图7b)支持形成于活动大陆边缘岩浆弧背景。Han(2011)根据Ryonhwasan(莲花山)杂岩第一类K质系列花岗岩体群的特征提出这些岩石形成于同造山大陆边缘环境。S型花岗岩-二长岩和似斑状花岗岩两个系列,类似的组合报道于华北凉城-集宁一带,被认为与活动大陆边缘岩浆弧的活动有关(Peng *et al.*, 2012)。因此, Peng *et al.* (2014)曾称山东半岛-辽东半岛-朝鲜半岛相关岩浆岩组成~19亿年的朝鲜岩浆弧。实际上, I型花岗岩和S型花岗岩的组合见于新生代俯冲体系(如, Pe-Piper, 2000)和陆-陆碰撞造山带中(如, Chappell, 1999; Atherton and Ghani, 2002)。

8 结论

通过统计朝鲜及邻区~19亿年岩浆岩数据,结合对朝鲜三个代表性岩体的研究,得出如下初步结论:

(1) 本文获得嘉山岩体(S型花岗岩) $1862 \pm 5\text{Ma}$ (MSWD = 7.6, $n = 17$)、龙浦岩体(正长岩) $1857 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD = 1.7, $n = 20$)和甌山群夕线榴片麻岩 $1844 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD = 1.4, $n = 20$)的锆石U-Pb年龄;岩体年龄代表形成时代,夕线榴片麻岩年龄代表区域变质年龄;推测岩体形成时代与区域(麻粒岩相)变质作用进变质时代接近。

(2) 研究表明, S型花岗岩可能和狼林“群”变质表壳岩相关,可能是副变质岩部分熔融的产物;似斑状花岗岩(I型花岗岩)与含有大量火山岩系的甌山“群”等表壳岩系关系密切;正长岩系列可能来自加厚地壳物质的部分熔融;同时,不排除这些岩浆岩有地幔物质的加入。

(3) 统计分析表明,朝鲜半岛北部基底发育大量古元古代岩浆岩,大致可以分为三类, S型花岗岩、似斑状花岗岩和正长岩,主体活动时代为~19亿年(19~18.5亿年),与区域麻粒岩相变质的时代基本接近;邻区辽东-吉南及胶东地区~19亿年的岩浆活动基本相似,但~21亿年岩浆作用更为广泛;朝鲜半岛南部同样发育~19亿年岩浆岩,但岩石类型以似斑状花岗岩为主,并发育紫苏花岗岩和斜长岩,推测朝鲜半岛南北两侧基底属性存在差异。

(4) 朝鲜半岛北部~19亿年前广泛发育壳熔花岗岩就位,可能伴随有幔源岩浆作用,并且伴随区域高级变质作用,这些都说明本区在古元古代可能为活动大陆边缘岩浆弧背景。

致谢 本文是翟明国研究员带领的中国科学院地质与地球物理研究所中朝地质对比研究团队集体成果。除署名作者外,翟明国研究员、李秋立研究员、吴福元研究员、侯泉林

教授、张晓辉研究员、张艳斌副研究员以及赵磊博士参加了野外工作,对本文有实质贡献。感谢朝鲜国家科学院地质学研究所给予的帮助。感谢韩国吴昌桓教授、崔善奎教授、柳寅昌教授等的帮助。感谢薛丁帅、刘艳红、刘宇、凌潇潇、马红霞、郭巨杰等在实验过程中的帮助。感谢杜利林博士和张华锋博士等对初稿的修改意见。

References

- Atherton MP and Ghani AA. 2002. Slab breakoff: A model for Caledonian, late granite syn-collisional magmatism in the orthotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland. *Lithos*, 62(3–4): 65–85
- Bai X, Liu SW, Yan M, Zhang LF, Wang W, Guo RR and Guo BR. 2014. Geological event series of Early Precambrian metamorphic complex in South Fushun area, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2905–2924 (in Chinese with English abstract)
- Brown PE and Becker SM. 1986. Fractionation, hybridisation and magma-mixing in the Kialineq centre East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(1): 57–70
- Chang KH and Park SO. 2001. Paleozoic Yellow Sea transform fault: Its role in the tectonic history of Korea and adjacent regions. *Gondwana Research*, 4(4): 588–589
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551
- Cho DL, Lee SR and Armstrong R. 2008a. Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: Occurrence of ca. 220Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 105(3–4): 191–200
- Cho M, Kim H, Lee Y, Horie K and Hidaka H. 2008b. The oldest (ca. 2.51Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12(1): 1–6
- Chough SK, Kwon ST, Ree JH and Choi DK. 2000. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new view. *Earth-Science Reviews*, 52(1–3): 175–235
- Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskis P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129–142
- Dong CY, Ma MZ, Liu SJ, Xie HQ, Liu DY, Li XM and Wan YS. 2012. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: New evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of meta-gabbro in the Anshan-Gongchangling area. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2785–2792 (in Chinese with English abstract)
- Han RY, Choi UJ, Kim and JN. 1998. The lithological characteristics and forming condition of rapakivi granite in myohyangsan complex. *Geological and Geographical Science*, 2: 7–11 (in Korean with English abstract)
- Han RY and Em HC. 2002. Some problems in study on the granitoids of ryonhwasan complex. *Geological and Geographical Science*, 3: 36–38 (in Korean with English abstract)
- Han RY, Kim JN and Pang YH. 2004. Converting partion of second group granites in ryonhwasan complex to myoh yangsan complex. *Bulletin of Kim Il Sung University (Natural Science)*, 50(1): 167–169 (in Korean with English abstract)
- Han RY. 2011. *Geology of Korea*. Science and Technical Publishing House, 200–2–290 (in Korean)
- Huang WL and Wyllie PJ. 1981. Phase relationships of S-type granite with H₂O to 35kbar: Muscovite granite from Harney Peak, South Dakota. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10515–10529
- Ishiwatari A and Tsujimori T. 2003. Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *Island Arc*, 12(2): 190–206
- Jiang CC. 1987. *Precambrian Geology of Eastern Part of Liaoning and Jilin*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House (in Chinese)
- Johannes W and Holtz F. 1990. Formation and composition of H₂O-undersaturated granitic melts. In: Ashworth JR and Brown M (eds.). *High-temperature Metamorphism and Crustal Anatexis*. Springer, 87–104
- Kim J, Yi K, Jeong YJ and Cheong CS. 2011c. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic high-K granitoids in the central Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20(2–3): 608–620
- Kim JN, Han RY, Zhao L, Li QL and Kim SS. 2016. Study on the petrographic and SIMS zircon U-Pb geochronological characteristics of the magmatic rocks associated with the Jongju and Cholsan REE deposits in northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3123–3138 (in Chinese with English abstract)
- Kim N, Cheong CS, Park KH, Kim J and Song YS. 2012. Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21(4): 865–875
- Kim SW, Williams IS, Kwon SH and Oh CW. 2008. SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the south-western Gyeonggi Block, Korea: Implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162(3–4): 475–497
- Kim SW, Kwon S, Koh HJ, Yi K, Jeong Y and Santosh M. 2011a. Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20(4): 865–889
- Kim SW, Kwon S, Santosh M, Williams IS and Yi K. 2011b. A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20(4): 890–903
- Kim SW, Kwon SH, Yi KW and Santosh M. 2014. Arc magmatism in the Yeongnam massif, Korean Peninsula: Imprints of Columbia and Rodinia supercontinents. *Gondwana Research*, 26(3–4): 1009–1027
- Kong QB. 2009. Zircon U-Pb dating, REE and Lu-Hf isotopic characteristics of Paleoproterozoic orthogneiss in Sulu UHP terrane, eastern China. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 51–62 (in Chinese with English abstract)
- Lee BC, Oh CW, Kim TS and Yi K. 2016. The metamorphic evolution from ultrahigh-temperature to amphibolite facies metamorphism in the Odaesan area after the collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 256–257: 109–131
- Lee SR, Cho M, Yi K and Stern RA. 2000. Early Proterozoic granulites in central Korea: Tectonic correlation with Chinese cratons. *Journal of Geology*, 108(6): 729–738
- Lee YY, Cho M, Cheong W and Yi K. 2014. A massif-type (~1.86 Ga) anorthositic complex in the Yeongnam Massif, Korea: Late-orogenic emplacement associated with the mantle delamination in the North China Craton. *Terra Nova*, 26(5): 408–416
- Li JJ and Shen BF. 2000. Geochronology of Precambrian continental crust in Liaoning Province and Jilin Province. *Progress in Precambrian Research*, 23(4): 242–249 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Zhao L, Zhang YB, Yang JH, Kim JN and Han RY. 2016. Zircon-titanite-rutile U-Pb system from metamorphic rocks of Jungshan “Group” in Korea: Implications of tectono-thermal events from Paleoproterozoic to Mesozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3019–3032 (in Chinese with English abstract)
- Li SZ and Zhao GC. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 158(1–2): 1–16
- Li Z and Chen B. 2014. Geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic meta-basalts from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China

- Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Research*, 255: 653–667
- Liao X, Zhang XH, Kim SH, Park U and Jong C. 2016. Detrital zircon U-Pb ages of the Machollyong Group in Korean Peninsula: Regional correlation and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2981–2992 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL, Liu PH, Wang F, Liu JH, Meng E, Cai J and Shi JR. 2014a. U-Pb dating of zircons from granitic leucosomes in migmatites of the Jiaobei Terrane, southwestern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Constraints on the timing and nature of partial melting. *Precambrian Research*, 245: 80–99
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu CH, Yang H, Liu PH, Wang F and Meng E. 2013. The growth, reworking and metamorphism of Early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-Th-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 224: 287–303
- Liu JH, Liu FL, Ding ZJ, Liu PH, Guo CL and Wang F. 2014b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Paleoproterozoic granitoid rocks in the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Precambrian Research* 255: 685–698
- Liu PH, Liu FL, Yang H, Wang F and Liu JH. 2012. Protolith ages and timing of peak and retrograde metamorphism of the high-pressure granulites in the Shandong Peninsula, eastern North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 3(6): 923–943
- Lu XP, Wu FY, Lin JQ, Sun DY, Zhang YB and Guo CL. 2004a. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123–138 (in Chinese with English abstract)
- Lu XP, Wu FY, Zhang YB, Zhao CB and Guo CL. 2004b. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381–392 (in Chinese with English abstract)
- Lu XP, Wu FY, Guo JH, Wilde SA, Yang JH, Liu XM and Zhang XO. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(3–4): 138–164
- Lu XP. 2009. Geochronology of the granites and Archean crustal growth and evolution in South Jilin area, North China Craton. Post-Doctor Research Report. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–83 (in Chinese)
- Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ, Ayers JC, Xia XP and Zhang JH. 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 163(3–4): 279–306
- Meng E, Liu FL, Liu JH, Liu PH, Cui Y, Liu CH, Yang H, Wang F, Shi JR, Kong QB and Lian T. 2013. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic constraints on Archean crustal evolution in the Liaonan Complex of Northeast China. *Lithos*, 177: 164–183
- Oh CW, Kim SW and Williams IS. 2006. Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China Blocks. *Lithos*, 92(3–4): 557–575
- Oh CW and Kusky T. 2007. The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49(7): 636–657
- Oh CW. 2012. The tectonic evolution of South Korea and Northeast Asia from Paleoproterozoic to Triassic. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 21(2): 59–87 (in Korean with English abstract)
- Oh CW, Imayama T, Lee SY, Yi SB, Yi K and Lee BC. 2015. Permo-Triassic and Paleoproterozoic metamorphism related to continental collision in Yangpyeong, South Korea. *Lithos*, 216–217: 264–284
- Paek RJ, Kang HG and Jon CP. 1996. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1–631
- Peng P, Zhai MG, Guo JH, Zhang HF and Zhang YB. 2008. Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: An example from North Korea. *Geological Magazine*, 145(5): 637–647
- Peng P, Zhai MG, Li QL, Wu FY, Hou QL, Li Z, Li TS and Zhang YB. 2011. Neoproterozoic (~900Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the south-eastern margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 243–254
- Peng P, Guo JH, Zhai MG, Windley BF, Li TS and Liu F. 2012. Genesis of the Hengling magmatic belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics. *Lithos*, 148: 27–44
- Peng P, Wang XP, Windley BF, Guo JH, Zhai M and Li Y. 2014. Spatial distribution of ca. 1950–1800Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton. *Lithos*, 202–203: 250–266
- Peng P, Wang C, Wang XP and Yang SY. 2015. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the Eastern North China Craton: Root of a Neoarchaean arc. *Tectonophysics*, 662: 7–21
- Peng P, Yang SY and Wang XP. 2016. A preliminary study on the distribution, magma series and petrogenesis of the Triassic igneous rocks in Middle-South Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3083–3097 (in Chinese with English abstract)
- Pe-Piper G. 2000. Origin of S-type granites coeval with I-type granites in the Hellenic subduction system, Miocene of Naxos, Greece. *European Journal of Mineralogy*, 12: 859–875
- Ree JH, Cho M, Kwon ST and Nakamura E. 1996. Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24(12): 1071–1074
- Seo J, Choi SG and Oh CW. 2010. Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18(2–3): 479–496
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207–221
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ. (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Sutcliffe RH, Smith AR, Doherty W and Barnett RL. 1990. Mantle derivation of Archean amphibole-bearing granitoid and associated mafic rocks: Evidence from the southern Superior Province, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105(3): 255–274
- Suzuki K. 2009. CHIME dating and age mapping of monazite in granulites and paragneisses from the Hwacheon area, Korea: Implications for correlations with Chinese cratons. *Geosciences Journal*, 13(3): 275–292
- Tam PY, Zhao GC, Liu FL, Zhou XW, Sun M and Li SZ. 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton. *Gondwana Research*, 19(1): 150–162
- Wan YS, Song B, Yang C and Liu DY. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78–87 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149(3–4): 249–271
- Wan YS, Liu DY, Nutman A, Zhou HY, Dong CY, Yin XY and Ma MZ. 2012. Multiple 3.8–3.1Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54–55: 18–30
- Wang W, Zhai MG, Li TS, Santosh M, Zhao L and Wang HZ. 2014. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the eastern North China

- Craton: Zircon U-Th-Pb and Lu-Hf evidence from the Jiaobei Terrane. *Precambrian Research*, 241: 146–160
- Wang XP, Peng P, Wang C and Yang SY. 2016. Petrogenesis of the 2115Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China craton: Implications for an intra-continental rifting. *Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2016.01.009
- Wang YF, Li XH, Jin W and Zhang JH. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton. *Precambrian Research*, 263: 88–107
- Williams IS, Cho DL and Kim SW. 2009. Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107(3–4): 239–256
- Wu FY, Han RY, Yang JH, Wilde SA, Zhai MG and Park SC. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3–4): 232–248
- Wu FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3–4): 339–362
- Wu FY, Li QL, Yang JH, Kim JN and Han RH. 2016. Crustal growth and evolution of Rangnim Massif, northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2933–2947 (in Chinese with English abstract)
- Wu ML, Zhao GC, Sun M, Bao ZA, Tam PY and He YH. 2014a. Tectonic affinity and reworking of the Archean Jiaodong Terrane in the Eastern Block of the North China Craton: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb zircon ages. *Geological Magazine*, 151(2): 365–371
- Wu ML, Zhao GC, Sun M, Li SZ, Bao ZA, Tam PY, Eizenhöfer PR and He YH. 2014b. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of major lithologies from the Jiaodong Terrane: Implications for the crustal evolution of the Eastern Block of the North China Craton. *Lithos*, 190–191: 71–84
- Xiang H, Zhang ZM, Lei HC, Qi M, Dong X, Wang W and Lin YH. 2014. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature pelitic granulites in the northern Sulu orogen: Constraints from petrology and geochronology. *Precambrian Research*, 254: 273–289
- Xu JW and Zhu G. 1995. Discussion on tectonic models for the Tan-Lu fault zone, eastern China. *Journal of Geology and Mineral Resources North China*, 10(2): 121–134 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu orogenic belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1–2): 99–125
- Yang JH, Wu FY, Xie LW and Liu XM. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from in-situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 263–276 (in Chinese with English abstract)
- Yi K, Cheong CS, Kim J, Kim N, Jeong YJ and Cho M. 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, 153: 129–141
- Yin A and Nie SY. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 810–813
- Yuan LL, Zhang XH, Xue FH, Han CM, Chen HH and Zhai MG. 2015. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 264: 119–139
- Zhai MG, Ni ZY, Oh CW, Guo JH and Choi SG. 2005. SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholith in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implications. *Geological Magazine*, 142(1): 23–30
- Zhai MG, Guo JH, Li Z, Chen DZ, Peng P, Li TS, Hou QL and Fan QC. 2007a. Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, 12(4): 388–403
- Zhai MG, Guo JH, Peng P and Hu B. 2007b. U-Pb zircon age dating of a rapakivi granite batholith in Rangnim massif, North Korea. *Geological Magazine*, 144(3): 547–552
- Zhai MG. 2016. Comparative study of geology in North China and Korean Peninsula: Research advances and key issues. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2915–2932 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YF, Liu JD, Xiao RG, Wang SZ, Wang J and Bao DJ. 2010. The hyalotourmalites of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning: Zircon features and SHRIMP dating. *Earth Science*, 35(6): 985–999 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Cao L, Wilde SA, Sun M, Choe WJ and Li SZ. 2006. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3–4): 365–379
- Zhao L, Li TS, Peng P, Guo JH, Wang W, Wang HZ, Santosh M and Zhai MG. 2015. Anatomy of zircon growth in high pressure granulites: SIMS U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes from the Jiaobei Terrane, eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 28(4): 1373–1390
- Zhao L, Zhang YB, Wu FY, Li QL, Yang JH, Kim JN and Choi WJ. 2016. Paleoproterozoic high temperature metamorphism and anatexis in the northwestern Korean Peninsula: Constraints from petrology and zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3045–3069 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XW, Zhao GC, Wei CJ, Geng YS and Sun M. 2008. EPMA U-Th-Pb monazite and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 328–350

附中文参考文献

- 白翔, 刘树文, 阎明, 张立飞, 王伟, 郭荣荣, 郭博然. 2014. 抚顺南部早前寒武纪变质杂岩的地质事件序列. *岩石学报*, 30(10): 2905–2924
- 董春艳, 马铭株, 刘守偈, 颀颀强, 刘敦一, 李雪梅, 万渝生. 2012. 华北克拉通元古代中期伸展体制新证据: 鞍山-弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学. *岩石学报*, 28(2): 2785–2792
- 姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质. 沈阳: 辽宁科学与技术出版社
- 孔庆波. 2009. 苏鲁地体元古代花岗质片麻岩锆石的 U-Pb 定年、REE 和 Lu-Hf 同位素特征. *地质通报*, 28(1): 51–62
- 金正男, 韩龙渊, 赵磊, 李秋立, 金石山. 2016. 朝鲜半岛北部定州与铁山稀土矿相关碱性岩和花岗岩的岩石学和 SIMS 锆石 U-Pb 年代学特征研究. *岩石学报*, 32(10): 3123–3138
- 李俊建, 沈保丰. 2000. 辽吉地区早前寒武纪大陆壳的地质年代表. *前寒武纪研究进展*, 23(4): 242–249
- 李秋立, 赵磊, 张艳斌, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜甑山“群”变质岩中锆石-榍石-金红石 U-Pb 体系: 元古代-中生代构造-热事件记录. *岩石学报*, 32(10): 3019–3032
- 廖鑫, 张晓晖, 金胜贤, 朴雄, 郑哲寿. 2016. 朝鲜半岛元古代摩天岭群的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 32(10): 2981–2992
- 路孝平, 吴福元, 林景仟, 孙德有, 张艳斌, 郭春丽. 2004a. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩岩浆作用的年代学格架. *地质科学*, 39(1): 123–138
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 赵成弼, 郭春丽. 2004b. 吉林南部通化地区

古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. 岩石学报, 20(3): 381–392

路孝平. 2009. 吉林省南部地区太古宙地质体年龄格架及地壳演化. 博士后出站报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1–83

彭澎, 杨书艳, 王欣平. 2016. 朝鲜半岛中南部三叠纪岩浆岩的分布、系列与成因浅析. 岩石学报, 32(10): 3083–3097

万渝生, 宋彪, 杨淳, 刘敦一. 2005. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 地质学报, 79(1): 78–87

吴福元, 李秋立, 杨正赫, 金正男, 韩龙渊. 2016. 朝鲜北部狼林地块构造归属与地壳形成时代. 岩石学报, 32(10): 2933–2947

徐嘉炜, 朱光. 1995. 中国东部郯庐断裂带构造模式讨论. 华北地质

矿产杂志, 10(2): 121–134

杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 23(2): 263–276

翟明国. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题. 岩石学报, 32(10): 2915–2932

张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 王生志, 王瑾, 包德军. 2010. 辽宁后仙峪硼矿区古元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年. 地球科学-中国地质大学学报, 35(6): 985–999

赵磊, 张艳斌, 吴福元, 李秋立, 杨正赫, 金正男, 崔元正. 2016. 朝鲜半岛西北部古元古代高温变质-深熔作用: 宏观和微观岩石学以及锆石 U-Pb 年代学制约. 岩石学报, 32(10): 3045–3069