

朝鲜半岛平南盆地中元古代岩浆事件*

朴贤旭¹ 翟明国^{2**} 杨正赫¹ 金正男¹ 郑哲珠¹ 吴福元² 金胜贤¹ 韩龙渊¹ 朴雄¹ 金明哲¹ 侯泉林³
 PARK HyoNuk¹, ZHAI MingGuo^{2**}, YANG JongHyok¹, KIM JongNam¹, JONG CholSu¹, WU FuYuan², KIM SungHyon¹, HAN RyongYon¹, PARK Ung¹, KIM MyongChol¹ and HOU QuanLin³

1. 朝鲜国家科学院地质研究所, 平壤 3812100

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

1. Institute of Geology, State Academy of Sciences, Pyongyang 3812100, DPR Korea

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Key Laboratory of Computational Earth Dynamics, Chinese Academy of Sciences; College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2016-05-20 收稿, 2016-08-24 改回.

Park HN, Zhai MG, Yang JH, Kim JN, Jong C, Wu FY, Kim SH, Han RY, Park U, Kim MC and Hou QL. 2016. Meso-Proterozoic magmatism event in the Pyongnam Basin, Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10):3033–3044

Abstract Paleoproterozoic Hwanghae Group and granites were developed in Ongjin area, southwestern part of the Pyongnam Basin, Korean Peninsula. The granites intruded into the Hwanghae Group. We obtained zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of four samples from two felsic volcanic rocks from Hwanghae Group and two representative granitic intrusions to determine their formation ages. New zircon U-Pb ages indicate that the felsic volcanic rocks located in lower and upper layer of Hwanghae Group were erupted in 1235 ± 5 Ma and 1203 ± 7 Ma, respectively, which suggest that the deposition age of the Hwanghae Group was Mesoproterozoic, not the traditional thought of Paleoproterozoic. Two granite plutons, Ongjin and Hwangyuisan, emplaced at 1251 Ma and 1246 Ma, respectively. The magmatism time around 1251 ~ 1203 Ma obtained in this study demonstrates the development of Mesoproterozoic magmatism on the Korean Peninsula. It indicates that Hwanghae rift has concurrent evolution history with the Eastern Marginal Rift of North China Craton.

Key words Korean Peninsula; Pyongnam Basin; Mesoproterozoic granites; Hwanghae Group; Mesoproterozoic

摘要 朝鲜平南盆地翁津地区发育中元古代黄海群和同时期(称之为瓮津期)花岗岩,花岗岩体侵入于黄海群。本文采用锆石原位微区 U-Pb 定年技术,对黄海群中的酸性火山岩及花岗岩进行了年龄测试。获得的数据表明,黄海群中下部层位及上部层位的酸性火山岩分别在 1235 ± 5 Ma 和 1203 ± 7 Ma 喷发,由此说明黄海群的沉积时代应为中元古代,而不是传统上认为的古元古代;两个翁津期花岗岩体(翁津和黄衣山岩体)的侵位年龄分别为 1251 ± 22 Ma 和 1248 ± 13 Ma,为中元古代花岗质岩浆活动的产物。上述 1251 ~ 1203 Ma 年龄的获得,表明朝鲜半岛发育中元古代岩浆作用,从而明确朝鲜黄海裂谷与华北东缘裂谷在时间上具有同期性,同时也表明中国华北与朝鲜在中元古代具有类似的发展历史。

关键词 朝鲜半岛;平南盆地;瓮津期花岗岩;黄海群;中元古代

中图法分类号 P542; P597.3

* 本文受重大国际合作项目(41210003)资助。

第一作者简介:朴贤旭,男,1958年生,研究员,沉积地质学专业

** 通讯作者:翟明国,男,1947年生,研究员,前寒武纪地质学专业, E-mail: mgzhai@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

华北克拉通在经历了古元古代晚期的变质事件(吕梁运动或称中条运动)之后,开始进入地台演化阶段,即开始了裂谷系的发育与演化,形成南、北两个在地表没有连接的裂陷槽(熊耳裂陷槽和燕辽裂陷槽)以及北缘(渣尔泰-白云鄂博-化德)裂谷系、东缘(徐淮-旅大-平南)裂谷系(翟明国等, 2014)。虽然华北克拉通自古元古代末至新元古代经历了多期裂谷事件(翟明国和卞爱国, 2000; 翟明国和彭澎, 2007; 翟明国等, 2014; Zhai and Liu, 2003; Zhai *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2016),并发育一系列的岩浆活动,如:1.78Ga 的大火成岩事件、1.72~1.62Ga 的非造山岩浆活动、1.37~1.32Ga 的镁铁质岩床群,以及约 900Ma 的镁铁质岩墙群,但是期间没有块体拼合的构造事件,缺少四堡期(格林威尔期)大规模热-构造事件的地质记录,目前发现的 1.3~1.0Ga 的岩石很少,仅在朝鲜半岛狼林地块(Rangnim)北部发现了形成年龄为 1195Ma 的含角闪石花岗岩(Zhao *et al.*, 2006)。1.3~1.0Ga 的年龄记录多出现在华北东缘和北缘的沉积岩碎屑锆石中(Luo *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007; 高林志等, 2010; Gao *et al.*, 2011; 胡波等, 2009, 2013; Hu *et al.*, 2012)和侵入岩的捕获锆石中(Yang *et al.*, 2004; 张华锋等, 2009)。因而华北克拉通是否发育四堡期岩浆活动,是否参与过 Rodinia 超大陆汇聚和裂解以及在超大陆的位置等问题还存在不同的推断(彭澎等, 2002; Yang *et al.*, 2004; 陆松年等, 2004, 2012; Lu *et al.*, 2008; 胡波等, 2013)。

朝鲜半岛北部平南盆地中、新元古界地层发育完整,出露齐全,且有大面积元古宙花岗岩伴生,对地层中的火山岩及伴生花岗岩进行详细的年代学研究势必为探讨华北克拉通与朝鲜平南盆地在中、新元古代地壳演化对比提供重要依据。

2 地质概况

朝鲜半岛自北向南由狼林地块、京畿地块和岭南地块三大构造单元构成,其间分别被临津江和沃川两个晚古生代-中生代造山带分隔(Ryu *et al.*, 1990a; Paek *et al.*, 1996)(图 1)。两个古生代盆地平南盆地和太白山盆地分别位于朝鲜北部和南部,形成于前寒武纪变质基底之上(Ryu *et al.*, 1990a, b)。

平南盆地位于狼林地块以南,不整合沉积于太古宙-古元古代结晶基底之上,是朝鲜半岛中、新元古界和古生界地层出露最为广阔、完整的沉积盆地,是中元古代-三叠纪地层系统层型剖面所在地。平南盆地西南角的翁津地区,发育太古界狼林群、古元古界黄海群和新元古界祥源超群及古元古代花岗岩。翁津地区呈现北隆南拗的古地理-古构造格局(Park, 2006)。

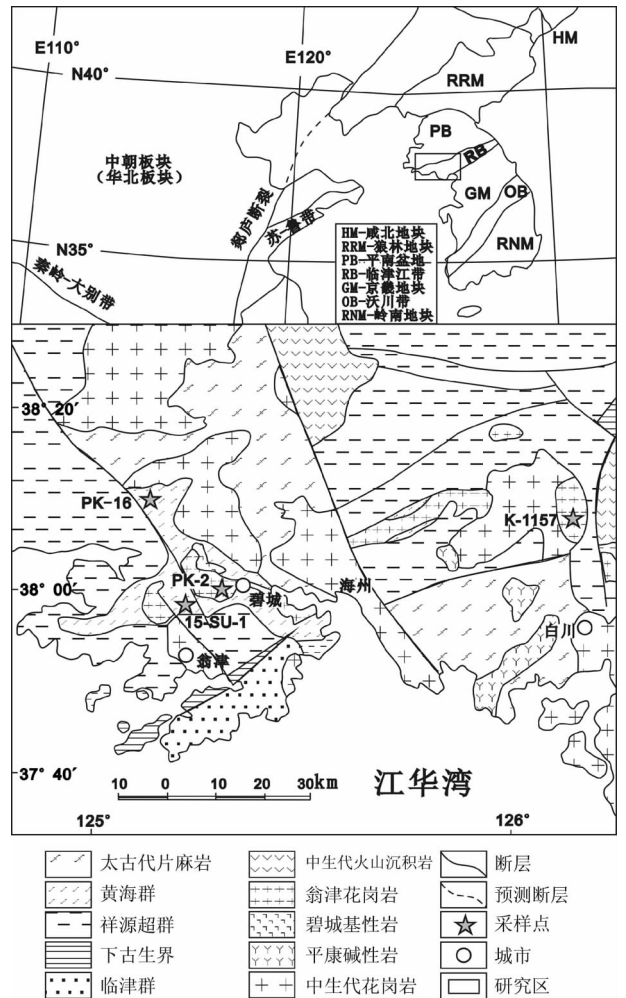


图 1 朝鲜半岛构造分区简图(a,据金炳成, 2012 修改)和平南盆地翁津地区地质简图(b,据 Paek *et al.*, 1996 修改)

Fig. 1 Tectonic subdivisions of the Korean Peninsula (a, modified after Kim, 2012) and sketch geological map of the Ongjin area, southwestern part of the Pyongnam Basin (b, modified after Paek *et al.*, 1996)

黄海群最初于 20 世纪 60 年代开展的 1:20 万填图工作时提出,泛指朝鲜中部地区出露的一套绿片岩相变质岩(Ri, 1963)。此后的 1:5 万填图,黄海群被解体,大部分划归为元古代的狼林群和新元古代的祥源系。Yang *et al.* (2007) 进一步明确黄海群的岩石组合及岩石学、地球化学特征,进而重新划分了黄海群的分布范围,认为它仅分布在黄海南道瓮津郡、碧城郡及新院郡的部分地区。按照岩性特征,黄海群分为上、下两组(图 2)(Kim *et al.*, 2006)。下组主要由碎屑变质岩类组成,从下至上为富铝片岩、黑云母石英片岩和绿泥石石英片岩,其上半部分夹有长石斑岩、大理岩和角闪岩,下组的厚度超过 2000m。上组基本上由酸性火山岩组成,为石英斑岩层与花岗斑岩层,总厚度超过 1300m。黄海

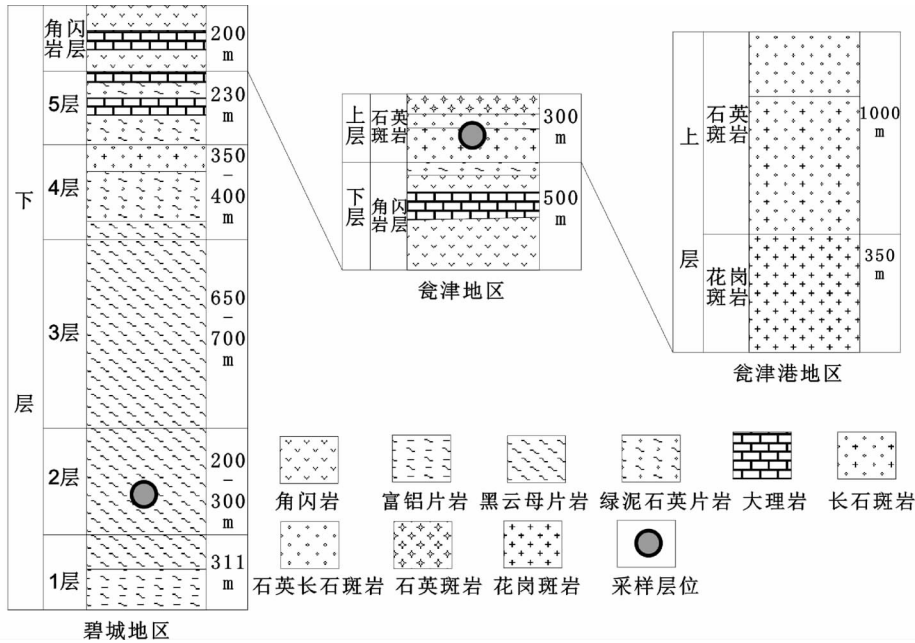


图2 平南盆地黄海群地层柱状图(据 Kim *et al.*, 2006 修改)

Fig.2 Strata column of the Hwanghae Group in the Pyongnam Basin (modified after Kim *et al.*, 2006)

群在东部的新院郡以碎屑岩为主,在中部的碧城郡则表现为碎屑岩与角闪岩、长石斑岩、大理岩的互层,到西部的瓮津郡以酸性火山岩为主。总体表现为东部新院郡和西部碧城郡地区,岩性组成单一,而中部的碧城郡地区则岩石组合丰富。

元古宙花岗岩与黄海群伴生,由瓮津岩体、率拉岩体和黄衣山岩体组成,统称为翁津花岗岩,其岩性基本相同,为黑云母花岗岩,仅瓮津岩体的东部出露闪长岩。瓮津岩体分布于黄海南道瓮津郡和碧城郡,呈两个椭圆形小岩体,岩体侵入于黄海群,出露面积共约 100km²。率拉岩体呈东西向展布的长条形分布于黄海南道新院郡,面积约 150km²。黄衣山岩体分布于黄海南道风天郡,呈椭圆形,出露面积小于 50km²。率拉岩体和黄衣山岩体被祥源超群中的直岬群不整合覆盖。翁津花岗岩都具有片麻状构造,其片麻理方向与围岩黄海群片岩的片理大体平行,但与其上不整合覆盖的直岬群的层理方向不一致。

Ryu *et al.* (1990b) 和 Han *et al.* (2010) 通过对翁津花岗岩岩石学及地球化学研究,将其划分为 A 型花岗岩,并认为其与碧城地区出露的基性岩构成了双峰式岩石组合,形成于大陆裂谷活动末期。根据黄海群的岩性特征,即从下至上为碎屑岩、碎屑岩与双峰式火山-沉积岩交互层及酸性火山岩, Yang and Kim (2007)、Yang *et al.* (2007) 认为黄海群、瓮津花岗岩和碧城基性岩是一个在被动裂谷带上发育的古裂谷盆地。且由于岩石组合类型全面,推测黄海古裂谷是一个发育很完整裂谷,分布面积远远超出瓮津地区。

由于黄海群与瓮津花岗岩都被新元古代的祥源超群角度不整合覆盖,所以其形成时代被认为形成于新元古代以前 (Kim *et al.*, 1988; Kang, 1990; Ryu *et al.*, 1990a; Paek and

Jon, 1991), 但到底属于中元古代还是古元古代,还存在不同的认识 (Ri, 1968; Kim and Jon, 1989; Pang, 2003)。如, Park *et al.* (2006) 通过叠层石的研究将祥源超群置于中元古代,由此推断瓮津花岗岩与黄海群的时代为古元古代; Kim *et al.* (2006) 利用单颗粒锆石 U-Pb 方法,在瓮津花岗岩中获得 1199 ± 15Ma 的年龄。但由于受传统观点的影响,仍将瓮津花岗岩的年龄限定在 1700 ~ 1200Ma。近年来,黄海群获得大量的碎屑锆石 U-Pb 年龄,大致将黄海群的沉积时代限定在古元古代末-中元古代初 (Kim *et al.*, 2006, 2008; Han, 2007; Han *et al.*, 2010)。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品描述

为了明确黄海群的沉积时代及瓮津花岗岩的侵入年龄,我们采集了黄海群最上部层位酸性火山岩层中的长石斑岩和中下部层位碎屑岩内夹层的弱变质酸性火山岩(绿泥石石英片岩)、瓮津与黄衣山岩体的黑云母花岗岩,进行锆石原位微区 U-Pb 定年。

长石斑岩(15-SU-1),斑状结构发育,斑晶为斜长石和钾长石,含量约 10%,基质由石英、长石和黑云母组成,无定向排列。

绿泥石石英片岩(PK-16),片理发育,造岩矿物很细小,主要由石英、长石、绿泥石和绢云母组成,呈弱定向排列。前人通过对该岩石中进行的野外和显微研究、岩石地球化学研究,已确定该岩石是黄海群较早期的酸性火山岩 (Yang and Kim, 2007; Yang *et al.*, 2007),本次采集的样品为弱变质的

酸性火山岩。

黑云母花岗岩(PK-2),采于黄海南道瓮津郡东部,是翁津岩体的东部岩体。岩石呈灰白色,弱片麻状构造,中粒-粗粒花岗岩变晶结构。矿物组合为黑云母(7%)、斜长石(20%)、钾长石(50%)、石英(20%)及少量的锆石、石榴子石、磁铁矿等副矿物。

黑云母花岗岩(K-1157),采于黄海南道风天郡东南部的黄衣山岩体,岩石呈灰白色,中粒花岗岩变晶结构,条带状构造。主要组成矿物为斜长石(30%) + 钾长石(20%) + 石英(35%) + 黑云母(12%)。副矿物有磁铁矿、独居石、锆石和榍石等。

3.2 样品制备及分析方法

选择新鲜岩石样品 10kg,经手工破碎、淘洗、电磁选、重液分选,双目镜下手选,得到含包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石。在双目镜下将锆石样品粘在双面胶上,制成样品靶以备 U-Pb 年龄测试。

实验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进行。锆石阴极发光(CL)图像在 LEO 1450VP 扫描电镜拍摄,加速电压为 10kV。锆石微量元素和 U-Pb 年龄测试在 MC-ICPMS 实验室所配置的 Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)和 Geolas Pro 型 193nm 准分子激光剥蚀系统上进行。哈佛大学的标准锆石 91500 作为计算 U-Pb 同位素的外标,其参考值加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1065.4 \pm 0.6\text{Ma}$ (Wiedenbeck *et al.*, 1995);元素含量的计算采用硅酸盐玻璃 NIST SRM 610 为外标, ^{29}Si 为内标。锆石测试采用的激光束斑直径为 $40\mu\text{m}$,剥蚀深度为 $20 \sim 40\mu\text{m}$ 。详细的仪器参数设置及分析技术见谢烈文等(2008)。

LA-ICP-MS 测得的 U-Pb 同位素和元素含量原始数据使用 GLITTER 4.0 软件(Macquarie University)进行处理。各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot (ver3.0) 程序。

4 分析结果

黄海群长石斑岩(15-SU-1)中的锆石为短柱状,CL 图像显示其振荡环带发育,锆石的 Th/U 比值较高,为 $0.4 \sim 1.2$,为典型的岩浆锆石(图 3、表 1)。部分颗粒的外侧有白色的变质增生边,表明曾经历过后期的变质作用。对 66 颗锆石进行了分析(图 4),除两颗锆石显示轻微的 Pb 丢失外,其余 64 个分析点皆位于谐和线上,其中 63 个分析点给出了 $1203 \pm 7\text{Ma}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄,代表了长石斑岩的喷发时代。

黄海群绿泥石英片岩(PK-16)中的锆石为短柱状,粒径小于 $100\mu\text{m}$,CL 图像显示其振荡环带发育,其 Th/U 比值较高($0.36 \sim 1.14$),为典型的岩浆锆石(图 3)。对 40 颗锆

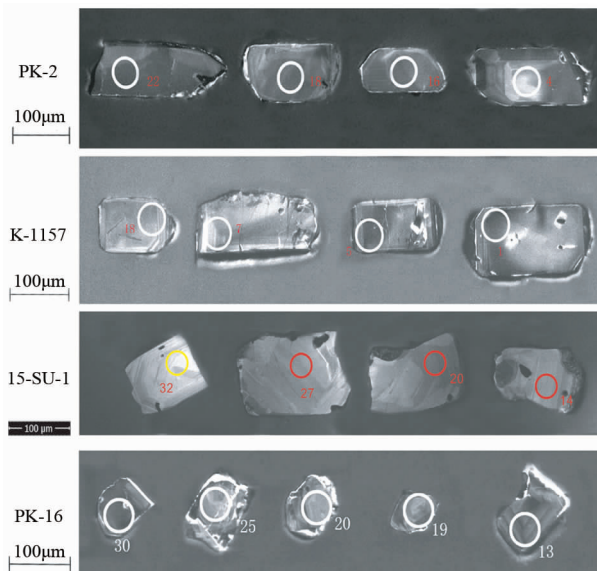


图 3 平南盆地黄海群火山岩和翁津花岗岩的锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of the zircons in the volcanic rocks from the Hwanghae Group and the Ongjin granite of the Ongjin area, Pyongnam Basin

石进行了测试(图 4),除 7 颗锆石经历了轻微的 Pb 丢失,数据点落在谐和线的下方之外,其余 33 个数据点皆落在谐和线上,并给出 $1212 \sim 1290\text{Ma}$ 、 $1308 \sim 1389\text{Ma}$ 和 1645Ma 三组年龄。其中最年轻一组数据中的 22 个数据点给出了 $1235 \pm 5\text{Ma}$ 的加权平均年龄,表明了该火山岩的喷发时代为 $\sim 1235\text{Ma}$,而其余老的年龄值为岩浆喷发时从围岩中捕获锆石的年龄。

瓮津黑云母花岗岩(PK-2)和黄衣山黑云母花岗岩(K-1157)中的锆石多为长柱状或短柱状晶体,CL 图像显示,锆石具有弱的成分环带(图 3)。锆石的 Th/U 比值较高($0.34 \sim 0.91$),表明这些锆石为典型的岩浆成因。翁津黑云母花岗岩(PK-2)中 18 颗锆石的 18 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或附近,给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $1182 \sim 1324\text{Ma}$,其中 15 个数据点给出 $1251 \pm 22\text{Ma}$ 平均权重年龄,表明翁津黑云母花岗岩的侵位时代 $\sim 1251\text{Ma}$ 。黄衣山黑云母花岗岩(K-1157)中 14 颗锆石的 14 个分析点位于 U-Pb 谐和线上或附近,给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $1226 \sim 1358\text{Ma}$,其中 12 个数据点给出 $1248 \pm 13\text{Ma}$ 平均权重年龄,代表了岩浆的形成年龄(图 4)。

5 讨论

5.1 黄海群的沉积时代

黄海群地层变形较强,目前尚未发现化石,不能用古生物化石方法来限定其沉积时代。传统观点认为,黄海群的沉

表 1 朝鲜半岛平南盆地瓮津地区黄海岸火山岩与翁津花岗岩的锆石 U-Pb 年龄

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Hwanghae Group and Ongjin granite in Ongjin area, Pyongnam Basin, Korea Peninsula

Analysis No.	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
15-SU-1-1	47	94	0.0796	0.0026	2.22	0.07	0.202	0.005	0.0525	0.0019	1187	29	1186	22	1187	26
15-SU-1-2	72	130	0.0790	0.0042	2.12	0.11	0.195	0.006	0.0548	0.0028	1173	54	1155	35	1148	32
15-SU-1-3	64	131	0.0811	0.0028	2.36	0.08	0.211	0.005	0.0617	0.0023	1224	31	1230	24	1236	27
15-SU-1-4	44	85	0.0801	0.0029	2.26	0.08	0.205	0.005	0.0608	0.0023	1200	33	1201	24	1204	27
15-SU-1-5	22	55	0.0795	0.0043	2.19	0.11	0.201	0.006	0.0553	0.0034	1183	56	1179	36	1178	33
15-SU-1-6	30	64	0.0778	0.0023	2.07	0.06	0.193	0.004	0.0530	0.0017	1140	26	1139	20	1140	23
15-SU-1-7	26	60	0.0805	0.0045	2.28	0.12	0.206	0.007	0.0557	0.0035	1210	58	1206	38	1206	35
15-SU-1-8	57	129	0.0795	0.0042	2.20	0.11	0.201	0.006	0.0525	0.0032	1184	55	1182	36	1182	33
15-SU-1-9	24	55	0.0793	0.0041	2.20	0.11	0.202	0.006	0.0497	0.0029	1179	53	1182	35	1185	32
15-SU-1-10	62	106	0.0799	0.0041	2.24	0.11	0.203	0.006	0.0562	0.0029	1196	51	1193	34	1193	32
15-SU-1-11	48	80	0.0794	0.0041	2.22	0.11	0.203	0.006	0.0582	0.0027	1182	53	1187	35	1192	33
15-SU-1-12	70	80	0.0779	0.0046	2.08	0.12	0.194	0.006	0.0471	0.0023	1145	63	1141	39	1141	34
15-SU-1-13	37	79	0.0806	0.0020	2.30	0.05	0.208	0.004	0.0577	0.0016	1212	21	1214	17	1216	24
15-SU-1-14	54	89	0.0780	0.0028	2.10	0.07	0.196	0.005	0.0551	0.0019	1148	32	1150	23	1152	25
15-SU-1-15	34	77	0.0803	0.0043	2.26	0.12	0.204	0.006	0.0559	0.0034	1205	55	1199	36	1198	34
15-SU-1-16	83	156	0.0802	0.0026	2.26	0.07	0.204	0.005	0.0563	0.0019	1203	29	1199	22	1199	26
15-SU-1-17	69	96	0.0819	0.0033	2.41	0.09	0.214	0.006	0.0540	0.0018	1243	37	1245	27	1248	29
15-SU-1-18	530	545	0.0756	0.0010	2.33	0.03	0.224	0.004	0.0616	0.0010	1084	20	1222	9	1304	22
15-SU-1-19	51	93	0.0806	0.0041	2.31	0.11	0.208	0.006	0.0556	0.0029	1212	52	1214	35	1217	33
15-SU-1-20	52	103	0.0830	0.0039	2.47	0.11	0.216	0.006	0.0601	0.0031	1269	46	1262	32	1260	33
15-SU-1-21	43	102	0.0785	0.0030	2.13	0.08	0.197	0.005	0.0558	0.0024	1160	36	1160	25	1162	27
15-SU-1-22	27	57	0.0807	0.0026	2.30	0.07	0.207	0.005	0.0585	0.0021	1213	29	1212	22	1213	26
15-SU-1-23	57	96	0.0803	0.0032	2.27	0.09	0.205	0.005	0.0563	0.0022	1205	38	1204	27	1204	28
15-SU-1-24	50	118	0.0814	0.0033	2.34	0.09	0.208	0.005	0.0556	0.0026	1231	38	1223	27	1221	29
15-SU-1-25	79	149	0.0810	0.0025	2.33	0.07	0.209	0.005	0.0568	0.0019	1222	26	1222	21	1224	25
15-SU-1-26	63	114	0.0801	0.0028	2.25	0.07	0.204	0.005	0.0588	0.0022	1199	31	1198	23	1199	26
15-SU-1-27	63	103	0.0789	0.0034	2.18	0.09	0.201	0.005	0.0570	0.0023	1170	42	1176	29	1180	29
15-SU-1-28	32	60	0.0788	0.0028	2.15	0.07	0.198	0.005	0.0556	0.0020	1167	33	1164	24	1164	26
15-SU-1-29	46	103	0.0790	0.0027	2.17	0.07	0.200	0.005	0.0572	0.0022	1173	32	1172	23	1173	26
15-SU-1-30	104	146	0.0790	0.0020	2.17	0.05	0.200	0.004	0.0596	0.0015	1171	21	1171	17	1173	23
15-SU-1-31	534	674	0.0811	0.0019	2.34	0.05	0.209	0.004	0.0593	0.0013	1225	19	1224	16	1226	23
15-SU-1-32	24	53	0.0812	0.0047	2.36	0.13	0.211	0.007	0.0537	0.0036	1225	61	1230	40	1235	36
15-SU-1-33	56	96	0.0811	0.0028	2.33	0.08	0.208	0.005	0.0598	0.0021	1224	32	1220	24	1219	27
15-SU-1-34	100	84	0.0779	0.0051	2.08	0.13	0.194	0.007	0.0497	0.0024	1144	71	1142	43	1142	36
15-SU-1-35	38	71	0.0791	0.0049	2.19	0.13	0.201	0.007	0.0521	0.0033	1175	66	1177	41	1179	36

续表 1

Continued Table 1

Analysis No.	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
15-SU-1-36	95	168	0.0796	0.0030	2.22	0.08	0.202	0.005	0.0583	0.0022	1188	35	1187	25	1187	27
15-SU-1-37	86	162	0.0808	0.0019	2.31	0.05	0.207	0.004	0.0613	0.0015	1216	20	1214	16	1214	23
15-SU-1-38	61	102	0.0788	0.0031	2.18	0.08	0.201	0.005	0.0556	0.0021	1168	37	1174	26	1178	27
15-SU-1-39	502	223	0.8292	0.0110	478.22	11.59	4.188	0.124	7.9894	0.2223	4973	19	6267	25	10614	154
15-SU-1-40	81	149	0.0790	0.0025	2.17	0.07	0.200	0.005	0.0582	0.0019	1173	28	1173	21	1174	25
15-SU-1-41	83	149	0.0800	0.0015	2.24	0.04	0.204	0.004	0.0604	0.0013	1196	18	1194	13	1194	22
15-SU-1-42	194	290	0.0806	0.0022	2.30	0.06	0.207	0.005	0.0600	0.0015	1212	22	1213	18	1214	24
15-SU-1-43	78	146	0.0807	0.0026	2.30	0.07	0.207	0.005	0.0596	0.0021	1213	29	1212	22	1212	26
15-SU-1-44	57	88	0.0777	0.0028	2.07	0.07	0.193	0.005	0.0634	0.0023	1139	34	1139	24	1140	25
15-SU-1-45	53	87	0.0811	0.0040	2.34	0.11	0.209	0.006	0.0592	0.0027	1224	49	1224	33	1225	32
15-SU-1-46	195	313	0.0795	0.0027	2.22	0.07	0.203	0.005	0.0583	0.0019	1186	30	1188	22	1190	26
15-SU-1-47	33	74	0.0806	0.0025	2.30	0.07	0.207	0.005	0.0593	0.0021	1212	27	1211	21	1211	25
15-SU-1-48	44	40	0.0798	0.0034	2.23	0.09	0.203	0.005	0.0638	0.0026	1192	42	1192	29	1193	29
15-SU-1-49	45	93	0.0800	0.0023	2.25	0.06	0.204	0.005	0.0596	0.0019	1197	25	1197	20	1199	24
15-SU-1-50	34	76	0.0804	0.0023	2.28	0.06	0.206	0.005	0.0631	0.0020	1208	25	1205	19	1205	24
15-SU-1-51	23	54	0.0816	0.0038	2.37	0.11	0.211	0.006	0.0643	0.0034	1236	46	1235	32	1235	31
15-SU-1-52	108	148	0.0796	0.0021	2.20	0.06	0.201	0.004	0.0619	0.0018	1188	23	1182	18	1180	23
15-SU-1-53	76	148	0.0811	0.0018	2.34	0.05	0.209	0.004	0.0605	0.0015	1223	19	1223	15	1224	23
15-SU-1-54	49	95	0.0818	0.0021	2.39	0.06	0.212	0.005	0.0628	0.0018	1240	21	1239	17	1239	24
15-SU-1-55	21	46	0.0817	0.0071	2.38	0.20	0.212	0.009	0.0612	0.0057	1238	97	1237	60	1238	49
15-SU-1-56	96	95	0.0799	0.0042	2.10	0.11	0.191	0.006	0.0581	0.0028	1195	55	1149	35	1126	31
15-SU-1-57	96	169	0.0820	0.0033	2.41	0.09	0.214	0.006	0.0640	0.0027	1246	38	1247	28	1248	29
15-SU-1-58	75	147	0.0805	0.0019	2.29	0.05	0.207	0.004	0.0647	0.0017	1210	20	1210	16	1210	23
15-SU-1-59	63	107	0.0814	0.0051	2.34	0.14	0.208	0.007	0.0584	0.0036	1232	67	1224	43	1220	37
15-SU-1-60	30	67	0.0797	0.0024	2.23	0.06	0.203	0.005	0.0642	0.0021	1190	26	1189	20	1189	24
15-SU-1-61	38	67	0.0852	0.0069	2.68	0.21	0.228	0.010	0.0769	0.0060	1320	87	1323	58	1326	50
15-SU-1-62	76	144	0.0794	0.0023	2.22	0.06	0.202	0.004	0.0555	0.0018	1183	24	1186	19	1188	24
15-SU-1-63	69	134	0.0803	0.0030	2.28	0.08	0.206	0.005	0.0696	0.0027	1204	34	1206	25	1208	27
15-SU-1-64	44	92	0.0819	0.0025	2.40	0.07	0.213	0.005	0.0644	0.0022	1243	27	1244	21	1245	26
15-SU-1-65	51	80	0.0831	0.0044	2.49	0.13	0.218	0.007	0.0612	0.0033	1270	54	1270	37	1270	35
15-SU-1-66	894	933	0.0818	0.0015	2.41	0.04	0.213	0.004	0.0639	0.0013	1241	17	1245	13	1247	23
PK-16-01	490	1272	0.0811	0.0005	2.34	0.01	0.209	0.002	0.0630	0.0007	1223	11	1223	4	1223	12
PK-16-02	116	183	0.0821	0.0009	2.42	0.02	0.213	0.002	0.0661	0.0009	1249	10	1248	7	1247	13
PK-16-03	52	114	0.0814	0.0014	2.35	0.04	0.210	0.003	0.0617	0.0015	1232	14	1229	11	1227	15
PK-16-04	36	76	0.0820	0.0014	2.41	0.04	0.213	0.003	0.0644	0.0015	1246	14	1247	11	1246	16

续表 1

Continued Table 1

Analysis No.	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
PK-16-05	67	114	0.101	0.002	3.78	0.06	0.271	0.004	0.0839	0.0019	1645	13	1588	12	1545	20
PK-16-06	47	88	0.0810	0.0013	2.33	0.03	0.209	0.003	0.0625	0.0013	1220	13	1222	11	1223	15
PK-16-07	48	90	0.0807	0.0011	2.35	0.03	0.211	0.003	0.0641	0.0012	1214	11	1229	9	1237	14
PK-16-08	141	276	0.0810	0.0007	2.40	0.02	0.215	0.002	0.0631	0.0008	1222	10	1243	6	1255	13
PK-16-10	39	81	0.0835	0.0012	2.44	0.03	0.212	0.003	0.0656	0.0013	1282	12	1255	9	1240	14
PK-16-11	89	129	0.0819	0.0010	2.34	0.03	0.207	0.002	0.0598	0.0009	1243	10	1225	8	1215	13
PK-16-13	76	131	0.0817	0.0010	2.44	0.03	0.217	0.003	0.0652	0.0010	1238	10	1255	8	1265	14
PK-16-14	41	101	0.0859	0.0011	2.59	0.03	0.219	0.003	0.0715	0.0014	1335	11	1298	9	1276	14
PK-16-16	52	174	0.0810	0.0014	2.47	0.04	0.221	0.003	0.0616	0.0019	1222	14	1263	12	1288	16
PK-16-17	59	124	0.0814	0.0010	2.36	0.03	0.210	0.003	0.0632	0.0011	1230	11	1230	8	1230	13
PK-16-18	43	92	0.0812	0.0014	2.35	0.04	0.210	0.003	0.0643	0.0015	1226	14	1227	11	1227	15
PK-16-19	37	77	0.0829	0.0012	2.51	0.03	0.219	0.003	0.0658	0.0014	1267	12	1274	10	1278	15
PK-16-20	46	94	0.0816	0.0015	2.37	0.04	0.211	0.003	0.0645	0.0017	1235	15	1233	12	1231	16
PK-16-21	79	137	0.0818	0.0010	2.35	0.03	0.209	0.002	0.0621	0.0010	1242	10	1228	8	1221	13
PK-16-22	212	298	0.0813	0.0008	2.12	0.02	0.189	0.002	0.0637	0.0008	1228	10	1155	6	1117	11
PK-16-24	48	91	0.0806	0.0011	2.34	0.03	0.210	0.003	0.0617	0.0012	1212	11	1223	9	1229	14
PK-16-25	39	78	0.0814	0.0012	2.37	0.03	0.212	0.003	0.0630	0.0013	1231	12	1235	10	1238	14
PK-16-26	223	195	0.0850	0.0009	2.16	0.02	0.185	0.002	0.0455	0.0006	1314	10	1169	7	1092	11
PK-16-27	299	838	0.0810	0.0005	2.22	0.01	0.199	0.002	0.0596	0.0007	1221	11	1189	4	1171	11
PK-16-28	43	95	0.0810	0.0011	2.45	0.03	0.220	0.003	0.0681	0.0013	1222	11	1258	9	1280	14
PK-16-29	35	81	0.0823	0.0012	2.50	0.03	0.220	0.003	0.0684	0.0014	1251	12	1272	10	1284	15
PK-16-30	221	270	0.0854	0.0010	2.68	0.03	0.228	0.003	0.0718	0.0010	1325	10	1324	8	1323	14
PK-16-31	74	128	0.0810	0.0019	2.33	0.05	0.209	0.003	0.0673	0.0019	1221	19	1222	15	1223	18
PK-16-32	86	142	0.0871	0.0018	2.81	0.05	0.234	0.004	0.0812	0.0020	1362	16	1359	14	1357	19
PK-16-33	216	432	0.0812	0.0006	2.26	0.02	0.202	0.002	0.0618	0.0007	1227	10	1201	5	1186	12
PK-16-34	42	81	0.0830	0.0012	2.38	0.03	0.208	0.003	0.0628	0.0013	1269	12	1236	10	1218	14
PK-16-35	35	76	0.0827	0.0012	2.50	0.03	0.219	0.003	0.0668	0.0014	1261	12	1271	10	1278	15
PK-16-36	73	146	0.0828	0.0010	2.21	0.02	0.194	0.002	0.0662	0.0011	1265	10	1185	8	1142	12
PK-16-39	81	157	0.0816	0.0009	2.38	0.02	0.212	0.002	0.0701	0.0011	1236	10	1238	7	1239	13
PK-16-40	185	243	0.0839	0.0008	2.26	0.02	0.195	0.002	0.0562	0.0007	1290	10	1199	6	1150	12
PK-16-42	415	449	0.0821	0.0006	2.41	0.02	0.213	0.002	0.0644	0.0007	1247	10	1245	5	1244	12
PK-16-43	105	317	0.0821	0.0007	2.53	0.02	0.224	0.002	0.0705	0.0010	1248	10	1281	6	1302	13
PK-16-44	372	380	0.0827	0.0007	2.36	0.02	0.207	0.002	0.0626	0.0007	1262	10	1231	5	1215	12
PK-16-45	40	96	0.0883	0.0012	2.52	0.03	0.207	0.003	0.0755	0.0015	1389	11	1277	9	1213	14

续表 1

Continued Table 1

Analysis No.	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
							(Ma)		(Ma)		(Ma)		(Ma)		(Ma)	
PK-16-46	37	86	0.0847	0.0012	2.48	0.03	0.213	0.003	0.0701	0.0015	1308	12	1267	10	1244	14
PK-16-47	37	83	0.0813	0.0012	2.38	0.03	0.212	0.003	0.0664	0.0014	1229	12	1236	10	1240	15
PK-2-02	55	79	0.0836	0.0025	2.39	0.07	0.207	0.003	0.0654	0.0017	1282	31	1240	20	1215	18
PK-2-03	51	108	0.0835	0.0031	2.23	0.08	0.193	0.004	0.0672	0.0025	1281	40	1190	24	1140	19
PK-2-05	21	40	0.0854	0.0033	2.48	0.09	0.211	0.004	0.0701	0.0026	1324	42	1267	26	1234	21
PK-2-06	36	74	0.0808	0.0022	2.34	0.06	0.210	0.003	0.0660	0.0018	1217	28	1226	18	1231	17
PK-2-08	41	59	0.0795	0.0022	2.29	0.06	0.209	0.003	0.0634	0.0015	1186	29	1209	19	1222	17
PK-2-09	31	61	0.0833	0.0022	2.39	0.06	0.208	0.003	0.0635	0.0017	1275	26	1238	18	1217	16
PK-2-10	24	42	0.0794	0.0025	2.36	0.07	0.216	0.003	0.0623	0.0018	1182	33	1232	21	1260	18
PK-2-11	29	47	0.0801	0.0023	2.23	0.06	0.202	0.003	0.0602	0.0016	1199	31	1191	19	1186	17
PK-2-12	25	43	0.0815	0.0033	2.43	0.09	0.216	0.004	0.0682	0.0025	1233	44	1251	27	1261	22
PK-2-14	26	59	0.0801	0.0019	2.32	0.05	0.210	0.003	0.0634	0.0016	1198	24	1219	16	1231	15
PK-2-15	22	38	0.0807	0.0024	2.33	0.06	0.210	0.003	0.0656	0.0018	1214	31	1222	20	1227	17
PK-2-16	16	30	0.0815	0.0026	2.39	0.07	0.213	0.004	0.0666	0.0021	1233	35	1239	22	1242	19
PK-2-17	15	27	0.0814	0.0027	2.34	0.07	0.208	0.004	0.0639	0.0020	1232	36	1223	23	1219	19
PK-2-18	14	26	0.0813	0.0028	2.32	0.08	0.207	0.004	0.0641	0.0021	1228	37	1218	23	1212	19
PK-2-20	11	20	0.0834	0.0030	2.41	0.08	0.209	0.004	0.0669	0.0022	1279	39	1245	24	1225	20
PK-2-22	12	24	0.0842	0.0028	2.42	0.08	0.208	0.004	0.0659	0.0021	1296	35	1248	23	1221	19
PK-2-23	19	42	0.0842	0.0022	2.38	0.06	0.205	0.003	0.0630	0.0017	1297	25	1235	17	1201	16
PK-2-24	26	41	0.0840	0.0021	2.40	0.06	0.207	0.003	0.0619	0.0015	1292	25	1242	17	1213	16
K1157-01	171	266	0.0812	0.0010	2.34	0.03	0.209	0.004	0.0634	0.0013	1226	23	1225	9	1224	24
K1157-02	195	373	0.0818	0.0011	2.37	0.03	0.210	0.004	0.0664	0.0014	1240	23	1233	9	1229	24
K1157-03	121	234	0.0823	0.0014	2.36	0.04	0.208	0.005	0.0660	0.0017	1253	21	1230	12	1216	25
K1157-04	227	299	0.0825	0.0012	2.23	0.03	0.196	0.004	0.0643	0.0013	1257	22	1189	10	1152	23
K1157-06	160	475	0.0816	0.0011	2.29	0.03	0.203	0.004	0.0657	0.0014	1235	22	1208	9	1193	23
K1157-08	286	313	0.0821	0.0011	2.41	0.03	0.213	0.004	0.0660	0.0013	1248	22	1245	9	1243	24
K1157-09	174	358	0.0820	0.0010	2.43	0.03	0.215	0.005	0.0644	0.0013	1246	23	1252	9	1255	24
K1157-10	225	467	0.0825	0.0010	2.44	0.03	0.215	0.005	0.0650	0.0013	1258	23	1256	9	1254	24
K1157-11	196	382	0.0822	0.0011	2.37	0.03	0.209	0.004	0.0657	0.0014	1251	22	1234	9	1224	24
K1157-13	277	542	0.0869	0.0011	2.58	0.03	0.215	0.005	0.0672	0.0014	1358	22	1294	9	1255	24
K1157-15	298	545	0.0853	0.0010	2.38	0.03	0.202	0.004	0.0623	0.0012	1322	23	1235	8	1186	23
K1157-16	201	394	0.0823	0.0011	2.43	0.03	0.214	0.005	0.0651	0.0013	1253	22	1250	9	1248	24
K1157-17	154	319	0.0819	0.0010	2.38	0.03	0.211	0.004	0.0647	0.0013	1242	23	1237	9	1233	24
K1157-18	213	475	0.0827	0.0010	2.42	0.03	0.212	0.004	0.0638	0.0013	1262	23	1249	9	1242	24

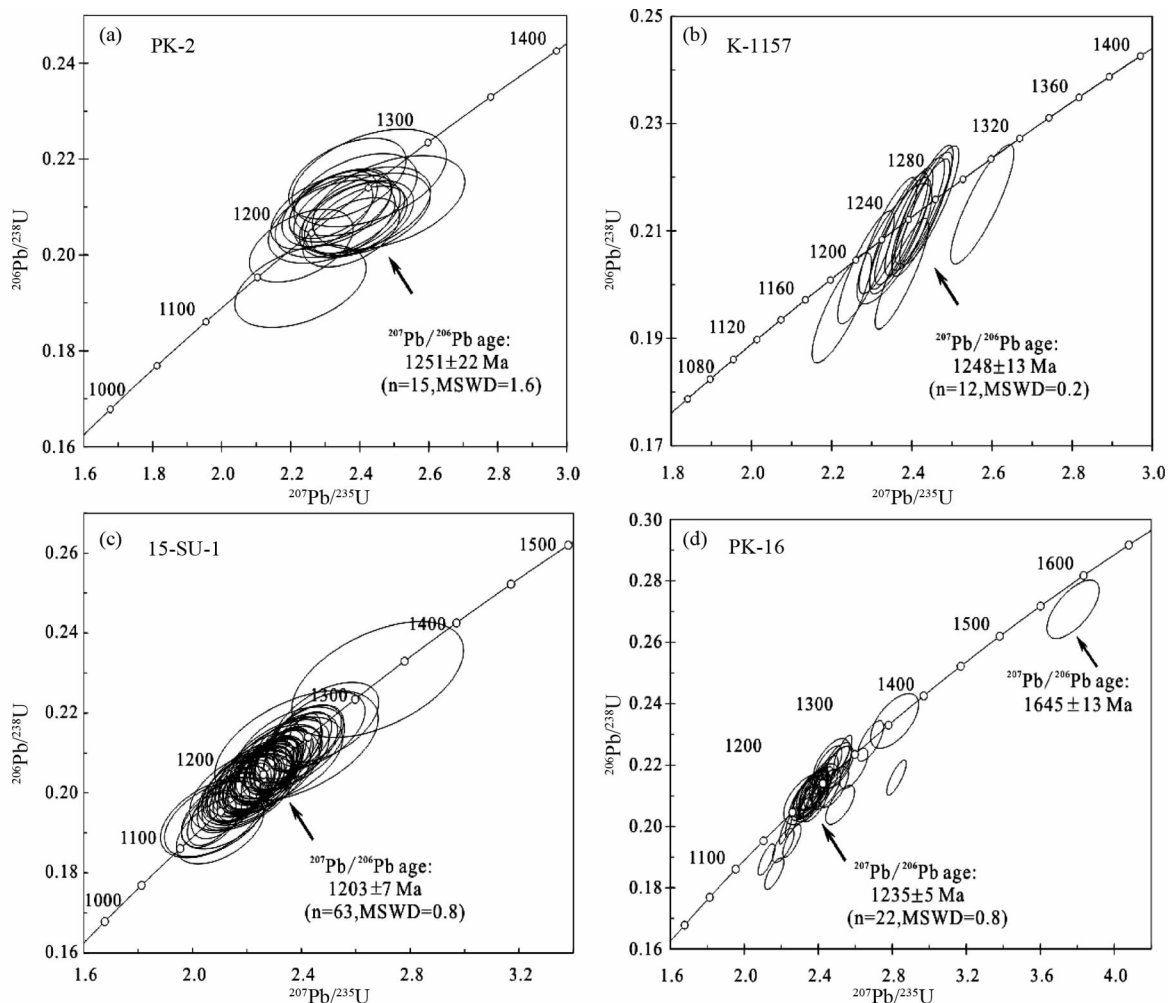


图4 平南盆地翁津地区黄海群火山岩和翁津花岗岩的锆石 U-Pb 年龄
 Fig. 4 U-Pb ages of the zircons from volcanic rocks from the Hwanghae Group and the Ongjin granite of the Ongjin area, Pyongyang Basin

积时代为古元古代-中元古代 (Paek *et al.*, 1996), 其地质依据为黄海群覆盖在早古元古代甌山群之上, 并被新元古代祥源超群不整合覆盖。近年来, 大量碎屑锆石 U-Pb 年龄将黄海群的沉积时代大致限定在古元古代末-中元古代初 (Kim *et al.*, 2006, 2008; Han, 2007; Han *et al.*, 2010)。

我们对黄海群碎屑沉积岩中的火山岩夹层进行了锆石 U-Pb 年龄测试, 获得其中下部层位、最上部层位火山岩的形成年龄分别为 1235 ± 5 Ma 和 1203 ± 7 Ma, 结合侵入于黄海群中的花岗岩的侵位年龄 1251 ± 22 Ma, 表明黄海群的沉积早于 1251 ± 22 Ma, 并在 1203 ± 7 Ma 之后结束, 其沉积时代至少持续了一段时间。

5.2 翁津花岗岩的形成时代

早期的研究认为, 翁津花岗岩的形成早于新元古代 (Kim *et al.*, 1988; Kang, 1990; Ryu *et al.*, 1990a; Paek and Jon, 1991)。此后, 虽然 Kim *et al.* (2006) 获得翁津花岗岩

的单颗粒锆石 U-Pb 年龄 1199 ± 15 Ma, 但仍将其侵位年龄定为 1700 ~ 1200 Ma。本文对翁津花岗岩中的翁津岩体和黄山岩体进行了锆石原位微区 U-Pb 年龄测试, 分别获得其侵位年龄为 1251 ± 22 Ma 和 1248 ± 13 Ma, 年龄在误差范围内一致, 表明是同一期岩浆事件的产物, 形成于中元古代的延展纪 (Ectasian)。结合 Kim *et al.* (2006) 和 Wu *et al.* (2007) 等报道的中元古花岗岩的侵位年龄 ~ 1200 Ma, 表明中元古代时期的岩浆活动比较活跃, 且持续时间较长。

5.3 朝鲜半岛格林威尔期岩浆事件的地质意义

本文的研究表明, 黄海群与瓮津花岗岩均形成于中元古代的延展纪 (Ectasian), 老于新元古代的四堡期。本文的地质概况中谈到过, 前人对瓮津花岗岩与黄海群的地质、岩石组合、岩石学、岩石地球化学研究确定, 它们不具有同造山岩浆岩的特征, 应是古裂谷带发育过程的完整记录 (Yang and Kim, 2007; Yang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2006, 2008; Han,

2007; Han *et al.*, 2010)。

目前的研究表明,华北克拉通在古元古代末-新元古代已经进入稳定的地台发展阶段(赵宗溥, 1993; 翟明国和卞爱国, 2000; Zhai and Liu, 2003; 翟明国和彭澎, 2007; Lu *et al.*, 2002, 2008; Kusky and Li, 2003),发育有长城系(1.8~1.6Ga)、蓟县系(1.6~1.4Ga)、待建系(1.4~1.0Ga)和青白口系(1.0~0.8Ga)等多期典型的大陆裂谷沉积序列。近年来在青白口系下马岭组中发现了~1.37Ga的凝灰岩(Gao *et al.*, 2007, 2008; 高林志等, 2007, 2009)和侵入其中的~1.32Ga的辉绿岩床(李怀坤等, 2009; 张华锋等, 2009; Zhang *et al.*, 2012),与东缘裂谷沉积岩碎屑锆石中获得的年龄1300~1000Ma相一致,表明华北北缘的裂谷系与燕辽裂陷槽具有相同的层序与沉积历史,推测其为同期裂谷的产物(翟明国等, 2014)。黄海群火山岩与翁津花岗岩的形成时代略晚于下马岭组中岩墙的形成时代,与东缘裂谷沉积岩碎屑锆石中获得的年龄相一致,表明朝鲜中部黄海古裂谷与中国华北东缘古裂谷在时间上具有同期性。上述裂谷带的存在有力的证明了华北克拉通在中元古代延展纪(Ectasian),不可能属于Grenville造山带,同时也证明了中国华北与朝鲜,在中元古代具有同样的发展历史。

6 结论

本文获得了朝鲜平南盆地黄海群火山岩和翁津花岗岩的锆石U-Pb年龄,得到如下结论:

(1) 黄海群中下部层位及最上部层位火山岩的形成年龄分别为 $1235 \pm 5\text{Ma}$ 和 $1203 \pm 7\text{Ma}$,结合侵入于黄海群中的花岗岩的侵位年龄 $1251 \pm 22\text{Ma}$,表明黄海群的沉积早于 $1251 \pm 22\text{Ma}$,并在 $1203 \pm 7\text{Ma}$ 之后结束;

(2) 翁津黑云母花岗岩和黄衣山黑云母花岗岩分别形成于 $1251 \pm 22\text{Ma}$ 和 $1248 \pm 13\text{Ma}$,表明早期划分的翁津期花岗岩为中元古代花岗岩质岩浆作用的产物;

(3) 黄海群火山岩和翁津期花岗岩的形成年龄表明朝鲜半岛发育中元古代岩浆作用(1.25~1.20Ga),从而明确朝鲜黄海古裂谷与中国华北东缘古裂谷在时间上具有同期性,同时也表明中国华北与朝鲜在中元古代具有同样的发展历史。

致谢 感谢周艳艳博士和卢俊生博士两位审稿人耐心细致的修改,使得本稿更加完善!

References

Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Zhou HR, Wang ZQ and Song B. 2007. A new SHRIMP age of the Xiamaling Formation in the North China Plate and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 1103–1109
Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Zhou HR and Wang ZQ. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of

the Qingbaikouan System in North China. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249–255 (in Chinese with English abstract)
Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Song B, Wang ZQ and Liu YM. 2008. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by zircon SHRIMP dating. *Chinese Science Bulletin*, 53(17): 2665–2671
Gao LZ, Zhang CH, Liu PJ, Ding XZ, Wang ZQ and Zhang YJ. 2009. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 433–446 (in Chinese with English abstract)
Gao LZ, Zhang CH, Chen SM, Liu PJ, Ding XZ, Liu YX, Dong CY and Song B. 2010. Detrital zircon SHRIMP U-Pb age from the Diaoyutai Formation, Xihe Group in Liaodong Peninsula, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 29(8): 1113–1122 (in Chinese with English abstract)
Gao LZ, Liu PJ, Yin CY, Zhang CH, Ding XZ, Liu YX and Song B. 2011. Detrital zircon dating of Meso- and Neoproterozoic rocks in North China and its implications. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 271–282
Han R. 2007. Magmatism of Precambrian Geotectonics period. *Geology and Geography*, 1: 6–8 (in Korean with English abstract)
Han R, Pak SC and Kim JN. 2010. Isotopic data of Mesoproterozoic orogeny in Rangnim massif. *Geology and Geography*, 2: 25 (in Korean with English abstract)
Hu B, Zhai MG, Guo JH, Peng P, Liu F and Liu S. 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade Group in the northern margin of the North China Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 193–211 (in Chinese with English abstract)
Hu B, Zhai MG, Li TS, Li Z, Peng P, Guo JH and Kusky TM. 2012. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. *Gondwana Research*, 22(3–4): 828–842
Hu B, Zhai MG, Peng P, Liu F, Diwu CR, Wang HZ and Zhang HD. 2013. Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geological events of the North China Craton: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cambrian and Jurassic sedimentary rocks in Western Hills of Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2508–2536 (in Chinese with English abstract)
Kang JG. 1990. Some opinion about the stratigraphy of Korea. *Geol. Sci.*, 2: 43–48 (in Korean with English abstract)
Kim B. 2012. Characteristics of Paleozoic sedimentary from East China-Korean Peninsula and its tectonic evolution. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 65–66 (in Chinese with English summary)
Kim JN, Paek RJ, Han RY *et al.* 2006. *Precambrian Geology*. Kim IL Sung University Press, 5–30 (in Korean)
Kim JN, Han RY, Yang JH and Park SC. 2008. The Formation and Evolution of Pre-Cambrian Crust in Rangnim Massif. Kim IL Sung University Press, 4–185 (in Korean)
Kim JR, Ryang HU and Cha SC. 1988. A tectonic map of Korea made newly (Scale of 1:1000000). *Geol. Geog.*, 5: 7–12 (in Korean with English abstract)
Kim JR and Jon CB. 1989. *Geology of Korea*. Publishing House of the Higher Education Books, 126 (in Korean)
Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
Li HK, Lu SN, Li HM, Sun LX, Xiang ZQ, Geng JZ and Zhou HY. 2009. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396–1404 (in Chinese with English abstract)
Li XH, Chen FK, Guo JH, Li QL, Xie LW and Siebel W. 2007. South China provenance of the lower-grade Penglai Group north of the Sulu UHP orogenic belt, eastern China: Evidence from detrital zircon ages and Nd-Hf isotopic composition. *Geochemical Journal*, 41(1): 29

- 45

- Lu SN, Yang CL, Li HK and Li HM. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 5(1): 123 – 131
- Lu SN, Li HK, Chen ZH, Yu HF, Jin W and Guo KY. 2004. Relationship between Neoproterozoic Cratons of China and the Rodinia. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 515 – 523 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160(1–2): 77 – 93
- Lu SN, Xiang ZQ, Li HK, Wang HC and Chu H. 2012. Response of the North China craton to Rodinia supercontinental events: GOSEN joining hypothesis. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1396 – 1406 (in Chinese with English abstract)
- Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ and Xia XP. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Yushulazi Group in the Eastern Block, North China Craton. *International Geology Review*, 48(9): 828 – 840
- Paek RJ and Jon GP. 1991. On development of the earth crust of the Pre-Cambrian in Korea. *Geol. Sci.*, 1: 15 – 19 (in Korean with English abstract)
- Paek RJ, Kang HG and Jon GP. 1996. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Language Book Publishing House, 31 – 51
- Pang YH. 2003. *The Igneous Rocks of Korea*. Kim IL Sung University Press, 14 – 180 (in Korean)
- Park MH. 2006. Principle of stratum division and stratigraphic chart of Korea. *Bulletin of Geological Society of Korea*, 1: 2 – 9 (in Korean)
- Peng P, Liu WJ and Zhai MG. 2002. Response of north China block to Rodinia supercontinent and its characteristics. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(4): 343 – 355 (in Chinese with English abstract)
- Ri BG. 1968. *Intrusive Rocks of Korea*. Publishing House of the Kim IL Sung University Press, 1 – 368 (in Korean)
- Ri JN. 1963. Some opinions to the Pre-Cambrian stratigraphy and its age in Hwanghae Province. *Geol. Geog.*, 2: 43 – 48 (in Korean with English abstract)
- Ryu JR, Paek YS and Ham BS. 1990a. *Geological Composition of Korea (2)*. Pyongyang: Industry Press, 174 – 195 (in Korean)
- Ryu JR, Paek YS, Ham PS, Tongbang KUI and Kim C. 1990b. *Geological Constitution of Korea*. Pyongyang: Industry Press, 7 – 304 (in Korean)
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1 – 23
- Wu FY, Han RH, 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
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565 – 1573
- Yang JH, Wu FY, Zhang YB, Zhang Q and Wilde SA. 2004. Identification of Mesoproterozoic zircons in a Triassic dolerite from the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1958 – 1962
- Yang JH and Kim JN. 2007. The lithochemical study on the Paleoproterozoic strata in the middle zone of Korea. *Bulletin of Academy of Sciences*, 6: 30 – 32 (in Korean with English abstract)
- Yang JH, Rim DS and Yom HS. 2007. The lithochemical and geochemical study on the formation of Hwanghae Group. *Geological and Geographical Sciences*, 1: 14 – 16 (in Korean with English abstract)
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl. 1): 219 – 232
- Zhai MG and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. *Precambrian Research*, 122(1–4): 183 – 199
- Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665 – 2682 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Hu B, Peng P and Zhao TP. 2014. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100 – 119 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Hu B, Zhao TP, Peng P and Meng QR. 2015. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review. *Tectonophysics*, 662: 153 – 166
- Zhang HF, Zhou ZG, Liu WC, Li ZZ, Zhang YM and Liu CF. 2009. Grenvill tectono-thermal event record in the Bainaimiao area, Inner Mongolia, China: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of quart monzodiorite dike. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1512 – 1518 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y and Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222 – 223: 339 – 367
- 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, Zhu XY and Zhai MG. 2016. Major advances in the study of the precambrian geology and metallogensis of the north China Craton: A review. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 1122 – 1155
- Zhao ZP. 1993. *Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplatform*. Beijing: Science Press, 3 – 384 (in Chinese)

附中文参考文献

- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 26(3): 249 – 255
- 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 2009. 华北-江南地区中、新元古代地层格架的再认识. *地球学报*, 30(4): 433 – 446
- 高林志, 张传恒, 陈寿铭, 刘鹏举, 丁孝忠, 刘燕学, 董春燕, 宋彪. 2010. 辽东半岛细河群沉积岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, 29(8): 1113 – 1122
- 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 彭澎, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义. *岩石学报*, 25(1): 193 – 211
- 胡波, 翟明国, 彭澎, 刘富, 第五春荣, 王浩铮, 张海东. 2013. 华北克拉通元古代末-新元古代地质事件——来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的证据. *岩石学报*, 29(7): 2508 – 2536
- 金炳成. 2012. 中国东部-朝鲜半岛古生代沉积特征及构造演化. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 65 – 66
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 28(10): 1396 – 1404
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. *地学前缘*, 11(2): 515 – 523

- 陆松年, 相振群, 李怀坤, 王惠初, 初航. 2012. 华北克拉通对罗迪尼亚超大陆事件的响应——GOSEN 连接假设. 地质学报, 86(9): 1396–1406
- 彭澎, 刘文军, 翟明国. 2002. 华北陆块对 Rodinia 超大陆的响应及其特征. 岩石矿物学杂志, 21(4): 343–355
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220–228
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增): 129–137
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665–2682
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21(1): 100–119
- 张华锋, 周志广, 刘文灿, 李真真, 章永梅, 柳长峰. 2009. 内蒙古中部白乃庙地区格林威尔岩浆事件记录: 石英二长闪长岩脉锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据. 岩石学报, 25(6): 1512–1518
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 3–384