

朝鲜半岛北部显生宙花岗岩成因研究及地质意义*

张艳斌¹ 吴福元¹ 杨正赫² 金正男² 韩龙渊²

ZHANG YanBin¹, WU FuYuan¹, YANG JongHyok², KIM JongNam² and HAN RyongHyon²

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. 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. Institute of Geology, State Academy of Sciences, Pyongyang 3812100, DPRK

2016-04-11 收稿, 2016-08-25 改回.

Zhang YB, Wu FY, Yang JH, Kim JN and Han RY. 2016. Petrogenesis and geological implications of Phanerozoic granitoids at northern Korean Peninsula. Acta Petrologica Sinica, 32(10):3098–3122

Abstract The Tumangang belt and Kwanmo massif, located in northern part of the Korean Peninsula, are characterized by large volumes of granitoids and traditionally regarded as of Late Permian and Early Triassic ages. We obtained zircon SIMS U-Pb isotopic data of 16 samples from six representative granitic intrusions to determine their intrusive ages. New zircon U-Pb ages indicate that the granites in this area can be subdivided into three episodes: Late Permian (265 ~ 263Ma), Early Triassic (248 ~ 240Ma) and Jurassic (199 ~ 173Ma). Mineralogical and geochemical features suggest that all granites are I- and high fractionated I-types and most rocks belong to high calc-alkaline. Zircons from Jurassic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Late Permian gneissic granites in the Kwanmo Massif, are characterized by positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (4.7 ~ 13.5), fairly young $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ (367 ~ 784Ma) and uniform O isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$: 5.7‰ ~ 7.4‰). Such Hf-O isotopic characteristics of these granitoids are likely indicative of a high proportion of juvenile material in their petrogenesis. The highest $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value (13.5) need a source of juvenile underplated basalt derived from depleted asthenospheric mantle. Zircons from Late Permian and Early Triassic granites in Kwanmo Massif normally have lower $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-10.9 ~ 3.8), older $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ (889 ~ 1651Ma) and large variation of O isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$: 5.6‰ ~ 9.2‰), indicating that they were derived from anatexis of old crustal basement materials. Regional comparison shows that the Tumangang belt and Kwanmo massif have the same geological evolution history. The granites of these areas have a great similarity with the granites in Jihei orogenic belt in the geochronological framework, petrological and geochemical characteristics, genetic type and magma source region, which indicate that the Tumangang belt and Kwanmo massif belong to the Central Asian Orogenic Belt. Our studies suggested that Late Permian and Early Triassic granitoids belong to syn-collisional granites in northern margin of the North China Craton, which were most likely related to subduction of the Paleo-Asian Oceanic Plate beneath the North China Craton. In the Jurassic, Northeast China and Korea Peninsula transfer to Round Pacific Ocean tectonic field. With the effect of subduction of the Pacific Ocean Plate, a large area of Jurassic granites were developed.

Key words Northern Korean Peninsula; Phanerozoic granitoids; Zircon U-Pb; Hf-O isotope

摘要 朝鲜半岛北部图们江褶皱带和冠帽地块发育大面积的花岗岩, 长期被认为形成于晚古生代二叠纪-早中生代三叠纪。采用锆石原位微区 U-Pb 测年技术(SIMS U-Pb), 对 6 个代表性岩体的 16 个样品进行了侵位年龄测定, 结合早期发表的年代学数据, 确定朝鲜北部花岗岩主要形成于中生代的侏罗纪(199 ~ 173Ma), 少部分为晚二叠世(265 ~ 263Ma)和早三叠世(248 ~ 240Ma)。岩石学及地球化学特征表明, 朝鲜北部花岗岩以钙-碱性岩石系列为主, 其成因类型为 I 型, 且少数为高分异 I 型。锆石 Hf-O 同位素特征明显分为两类: 图们江褶皱带及冠帽地块中的侏罗纪花岗岩、冠帽地块中晚二叠世片麻状花岗岩具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(4.7 ~ 13.5)和年轻的二阶段 Hf 模式年龄(367 ~ 784Ma), O 同位素组成 $\delta^{18}\text{O}$ 集中分布在 5.7‰ ~ 7.4‰, 表明其源区物质为新生地壳, 且该地壳物质来自于亏损型的软流圈地幔; 而冠帽地块中晚二叠世和早三叠世花岗岩通常具有负

* 本文受重大国际合作项目(41210003)资助。

第一作者简介: 张艳斌, 女, 1973 年生, 副研究员, 地球化学专业, E-mail: zhangyanbin@mail.iggcas.ac.cn

的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-10.9 ~ 3.8) 和古老的二阶段 Hf 模式年龄 (889 ~ 1651 Ma), O 同位素组成变化较大, $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 5.6‰ ~ 9.2‰, 推测其主要为古老地壳物质重熔的产物。区域对比研究表明, 图们江褶皱带和冠帽地块具有相同的地质演化历史, 应归属于同一个整体, 其上发育的花岗岩与我国吉黑造山带花岗岩在年代学格架、岩石学及地球化学特征、成因类型及岩浆源区都具有极大的相似性, 可以进行对比。由此可见, 朝鲜北部图们江褶皱带和冠帽地块为中亚造山带的组成部分, 且朝鲜北部晚二叠世-早三叠世花岗岩形成于古亚洲洋闭合阶段, 由于西伯利亚板块与华北板块的碰撞拼合, 在华北地台北缘形成了同碰撞型花岗岩。侏罗纪中国东北及朝鲜开始进入环太平洋构造域演化阶段, 在太平洋板块俯冲的挤压体制下形成大面积花岗岩。

关键词 朝鲜半岛北部; 中生宙花岗岩; 锆石 U-Pb; Hf-O 同位素

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

朝鲜半岛北部与我国吉林省东部相连, 其构造单元由北向南依次划分为图们江 (Tumangang) 褶皱带、冠帽 (Kwanmo) 地块和狼林 (Rangnim) 地块, 其中的图们江褶皱带也被称为豆满江 (Domangang) 造山带 (Paek *et al.*, 1996) (图 1a)。冠帽地块和图们江褶皱带之间以输城川 (Susongchon) 断裂为界, 该断裂带被认为是华北地台北缘的边界。目前, 对朝鲜半岛北部各构造单元的认识还存在多种不同的观点, 如, 部分学者认为图们江褶皱带是蒙古-鄂霍茨克褶皱带 (即中亚造山带) 的组成部分 (Paek *et al.*, 1996; 金炳成, 2012; 张晓晖等, 2016a), 还有部分学者认为它是一个古老的地块, 与我国的佳木斯地块相对比 (梁道俊等, 2009); 对于冠帽地块, 一种观点认为它是太古代从狼林地块中分离出来的块体 (Pak, 1955), 另一种观点认为它与我国的龙岗地块相对应 (金炳成, 2012), 还有一种观点认为它是与图们江褶皱带性质相同的造山带 (Paek *et al.*, 1996)。导致存在上述认识上分歧的根本原因在于朝鲜半岛北部地区的基本地质事实不清、基础地质调查程度不高、基础地质理论问题研究程度不深, 且该地区位于“古亚洲洋构造体制”与“滨太平洋构造体制”叠加转换的区域, 地质演化历史极为复杂, 也大大增加了研究的难度。

朝鲜半岛北部图们江褶皱带与冠帽地块中生宙花岗岩极其发育, 其出露面积约占出露地质体的一半以上 (图 1b, c)。如此大规模的花岗质岩石, 为我们研究朝鲜半岛北部区域构造演化提供了不可多得的条件。因此, 本文选择朝鲜半岛北部地区中生宙花岗岩开展时代与成因研究, 探索它们形成的构造环境和演化特征, 并探讨该地区的地质演化历史。

2 区域地质概况

图们江褶皱带位于朝鲜半岛最北端, 向西与我国兴安-吉黑造山带相接, 近北西走向的输城川断裂带将其与南部的冠帽地块相隔。区内基底岩石为元古代茂山 (Musang) 群, 零星出露在罗津、先锋等东海岸一带。茂山群下部为黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、条带状磁铁

石英岩、云母石英岩夹斜长角闪岩、云母片岩和云母石英片岩; 上部为斜长角闪片岩、黑云角闪片岩、斜长角闪岩、角闪岩和少量片麻岩。原岩为中酸性火山岩、凝灰岩夹玄武岩, 上部出现砂泥岩 (曹林和朱东, 1999)。Paek *et al.* (1996) 将茂山群的时代划归为古元古代, 曹林和朱东 (1999) 将其划归为新太古代, 王靛靛 (2010) 认为茂山群与辽吉新元古代的板石沟群相对应, 它们具有相同的岩性组合和含矿特征, 因此将其划分为新太古代, 而 Kim *et al.* (2006) 由获得的锆石 U-Pb 年龄将其划归为新太古-古元古代 (2359 ~ 2097 Ma)。区内沉积有上古生界豆满群和新生代地层。豆满群自下而上分为岩基 (Amgi) 组、鸡笼山 (Gyeryongsan) 组和松上 (Songsan) 组 (Paek *et al.*, 1996; Ro and Pak, 1987; 金炳成等, 2012)。岩基组主要分布于清津-罗津一带, 为陆源碎屑岩和火山岩碎屑岩建造, 主要由页岩、板岩、黑云母硅质片岩等组成。鸡笼山组主要分布于清津、会宁和庆源地区, 为火山沉积岩系列, 以底部火山角砾岩与下伏岩基组分界, 大致可分为上、下两段: 下段是一套火山沉积和碎屑岩建造, 上段岩性主要为浅变质的中基性火山岩、火山碎屑岩和凝灰岩。松上组分布较广泛, 为陆源碎屑岩建造, 岩石组合主要为粉砂岩、泥岩、页岩、凝灰质砂岩和灰岩。豆满群中产出珊瑚、腕足类、苔藓虫类、海百合类和植物等化石, 其中的鸡笼山腕足动物群是一个凉、温水混合型动物群, 与我国吉林东部-延边地区腕足动物群具有可比性。对会宁地区鸡笼山组玄武安山岩的最新锆石 U-Pb 定年为 257 ± 3 Ma, 表明其喷发时代为晚二叠纪, 指示豆满群鸡笼山组形成于晚二叠纪 (张晓晖等, 2016a)。同时, 图们江褶皱带还发育一系列晚古生代以来的侵入岩浆活动 (Paek *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2007b): 晚二叠世-侏罗纪的清津超基性-基性杂岩和豆满江侵入杂岩。

冠帽地块与南侧的摩天岭地块以白头山 (Paektusan) 断裂带相隔, 向北与我国吉林省境内的和龙地块相接。该地块大部分区域由冠帽花岗岩岩基和新生代火山岩所占据 (Zhai *et al.*, 2016), 前寒武纪及古生代地层零星出露。前寒武纪变质基底称为冠帽杂岩, 主要由茂山群表壳岩和相关的变质侵入杂岩组成。茂山群的岩石组合主要包括条带状铁建造、石墨片岩、长英质片麻岩和斜长角闪岩。上古生界地层呈楔形的构造岩片, 变质程度较高。

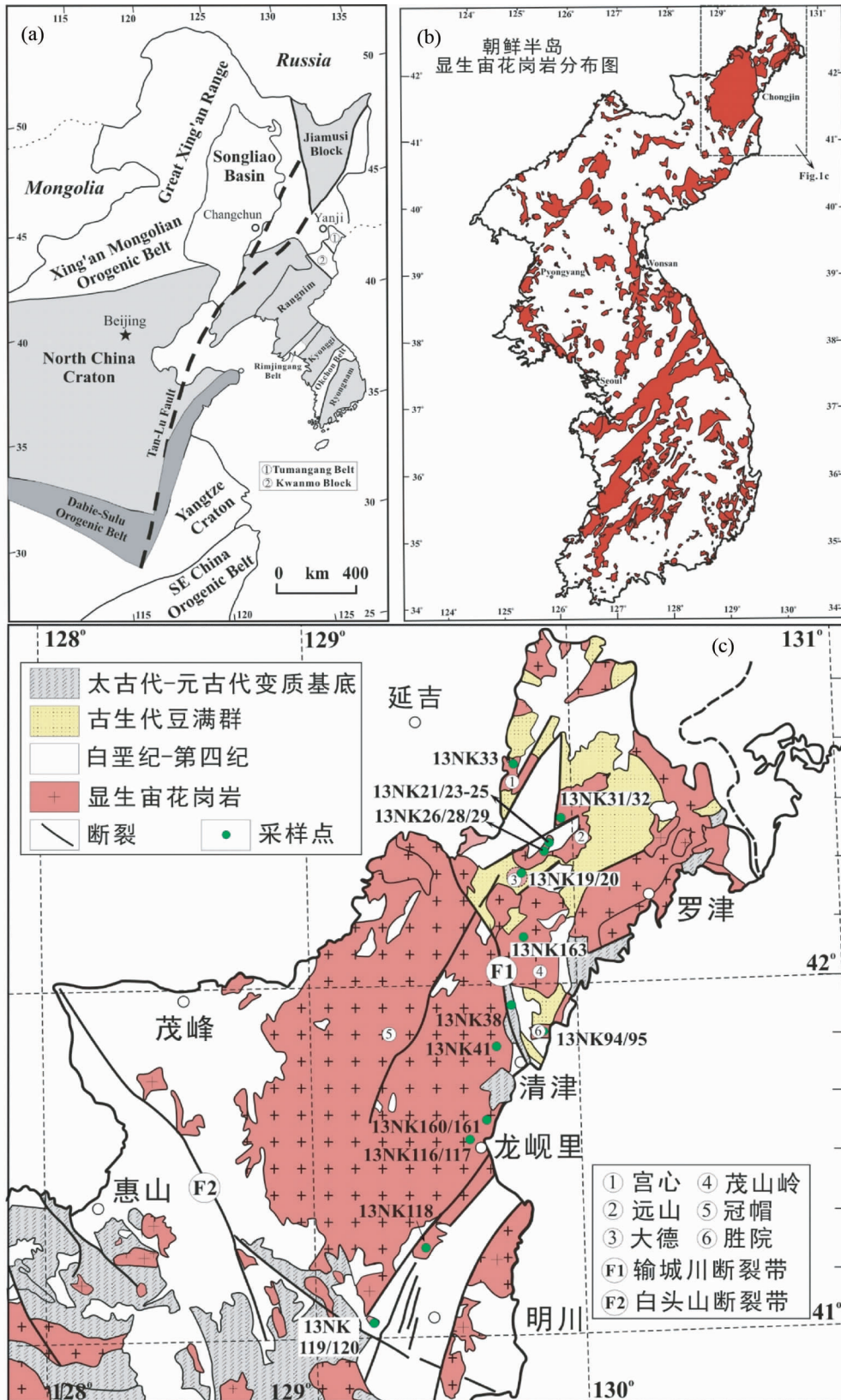


图1 中朝克拉通构造简图(a)、朝鲜半岛显生宙花岗岩分布图(b)和朝鲜图们江褶皱带与冠帽地块地质简图(c) (据GIASDPRK, 1993修改)

Fig.1 Tectonic map of the Sino-Korean Craton (a), distribution of the Phanerozoic granites in Korean Peninsula (b) and sketch geological map of the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula (c) (modified after GIASDPRK, 1993)

3 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩地质与岩石学特征

朝鲜半岛北部显生宙岩浆作用极为发育,其中冠帽地块花岗岩的出露面积达出露地质体的 90%,北部图们江褶皱带内的花岗岩出露面积近 1500km²。

图们江褶皱带内的显生宙花岗岩被称为豆满江杂岩,由十几个岩体组成,并被划分为三期:第一期为闪长岩和花岗闪长岩;第二期为黑云母花岗岩和二云母花岗岩;第三期为黑云母花岗岩和花岗斑岩。其中第三期岩石形成大的岩基。豆满江杂岩的代表性岩体主要有分布在会宁地区的大德、远山、宫心岩体和清津地区的茅山岭、胜院岩体等。大德(Daedokri)岩体出露于会宁市大德里,岩性为石英闪长岩。岩体侵入于二叠纪豆满系火山岩地层中,岩体内可见火山岩包体。远山(Wonsanki)岩体主要由闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩组成,出露面积约 400km²。闪长岩产出在岩体的边部,且破碎强烈。花岗闪长岩中广泛分布有中细粒闪长质包体,包体与花岗岩呈截然的接触关系。岩体中也可见晚期细晶岩脉(钾质脉)穿切。宫心(Gongsim)岩体、胜院(Sungam)岩体和茂山岭岩体(Musanri)的岩石类型单一,均为黑云母花岗岩。其中,茂山岭岩体的面积最大,约 400km²,宫心岩体次之,约 300km²,胜院岩体的面积最小,约 35km²。由于豆满江杂岩侵入到豆满群松上组地层中,且黑云母花岗岩曾获得 265Ma 的黑云母 K-Ar 年龄,因此被认为形成于晚二叠世-早三叠世,并以晚二叠世花岗岩为主体(Paek *et al.*, 1996)。Wu *et al.* (2007b)对茂山岭岩体及其北部、东北部的两个花岗闪长岩岩体进行了锆石 U-Pb 年龄测试,获得侵位年龄分别为 246 ± 1Ma、193 ± 1Ma 和 182 ± 2Ma,表明图们江褶皱带内的花岗岩主要形成于侏罗纪,少部分形成于晚二叠世。

冠帽地块的显生宙花岗岩以出露面积达 3000km² 的冠帽(Guanmobong)杂岩体为代表。该岩体出露于咸镜北道京城郡地区,侵入于前寒武纪变质基底,并被上侏罗统和白垩纪地层覆盖。岩体主要由二长花岗岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩和少量辉长岩、闪长岩组成。早期曾在黑云母花岗岩中获得 214 ~ 133Ma 的黑云母 K-Ar 年龄(Paek *et al.*, 1996),将岩体划归为中生代。Wu *et al.* (2007b)对岩体中的斑状二长花岗岩获得了 173 ± 1Ma 的侵位年龄。

目前对图们江褶皱带和冠帽地块中花岗岩的研究还很薄弱,绝大多数岩体形成时代的确定是依据地质体的侵入关系,仅个别岩体获得黑云母 K-Ar 及全岩 Rb-Sr 年龄,但由于测试方法的局限性,获得的年龄数据并不能准确限定岩体的侵入时代。本文采用锆石原位微区 U-Pb 定年技术,对 6 个代表性花岗岩体进行年龄测定,并通过详尽的地球化学研究探讨其成因。另外,野外地质考察时,在会宁市水库公路边发现片麻状花岗岩露头,被划分为元古代茂山群,本文也对

此样品一并进行研究。

4 分析方法

我们对采集的样品进行了全岩主量、微量元素测试,锆石原位微区 U-Pb、Hf、O 同位素测试,实验全部在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈重点实验室完成。

全岩主量元素分析在岩矿制样与分析实验室完成,采用 Shimadzu1500 型 X 荧光光谱仪,分析精度优于 3%。全岩微量元素测试在等离子体质谱实验室的 Agilon7500A 四极杆质谱仪(Q-ICPMS)上进行,分析流程同 Yang *et al.* (2005)。

锆石微区原位 U-Pb 定年及 O 同位素分析在离子探针实验室的 Cameca IMS-1280 型二次离子质谱仪(SIMS)上进行,详细的分析流程分别见 Li *et al.* (2009)和李献华等(2009)。锆石 U-Pb 同位素分析时,锆石样品的 Pb/U 比值用标准锆石 TEMORA 2 (417Ma, Black *et al.*, 2004)的 $\ln(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 与 $\ln(^{238}\text{U}/^{16}\text{O}_2/^{238}\text{U})$ 之间的线性关系校正(Whitehouse *et al.*, 1997);Th 和 U 含量用标准锆石 91500 (Th = 29×10^{-6} ; U = 80×10^{-6}) (Wiedenbeck *et al.*, 1995)计算。普通 Pb 用测量的 ²⁰⁴Pb 进行校正。单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ, U-Pb 平均年龄误差为 95% 置信度。数据结果采用 ISOPLOT 软件处理(Ludwig, 2001)。锆石 O 同位素分析在 U-Pb 同位素分析之后,需要将样品靶再次磨去 ~ 5μm,以消除前期在 U-Pb 定年时造成的氧污染。仪器质量分馏校正采用 91500 锆石标准,其中 91500 标准锆石的 δ¹⁸O = 9.9‰ (Wiedenbeck *et al.*, 2004),测量的 ¹⁸O/¹⁶O 比值通过 VSMOW 值(δ¹⁸O/¹⁶O = 0.0020052)校正后,加上仪器质量分馏校正因子 IMF 即为该点的 δ¹⁸O 值: $(\delta^{18}\text{O})_{\text{M}} = (\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{M}} / (0.0020052 - 1) \times 1000 (\text{‰})$, $\text{IMF} = (\delta^{18}\text{O})_{\text{M(standard)}} - (\delta^{18}\text{O})_{\text{VSMOW}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{Sample}} = (\delta^{18}\text{O})_{\text{M}} + \text{IMF}$ 。

锆石微区原位 Hf 同位素分析在等离子体质谱实验室用配备了 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统(LA)的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICPMS)完成,其分析程序见文献(Wu *et al.*, 2006)。用标准锆石 91500 与锆石样品交叉分析对仪器漂移进行外部监控。在本研究分析过程中,锆石标样 91500 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值测定的平均值为 0.282305 ± 20 (2σ),在误差范围内与文献综合的结果一致(Wu *et al.*, 2006)。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对图们江褶皱带内的 5 个岩体(大德、远山、宫心、茂山岭、胜院)、冠帽地块内的冠帽杂岩体及 1 个片麻状花岗岩样品,共计 16 件样品进行了锆石 U-Pb 同位素分析,结果见表 1、图 2。

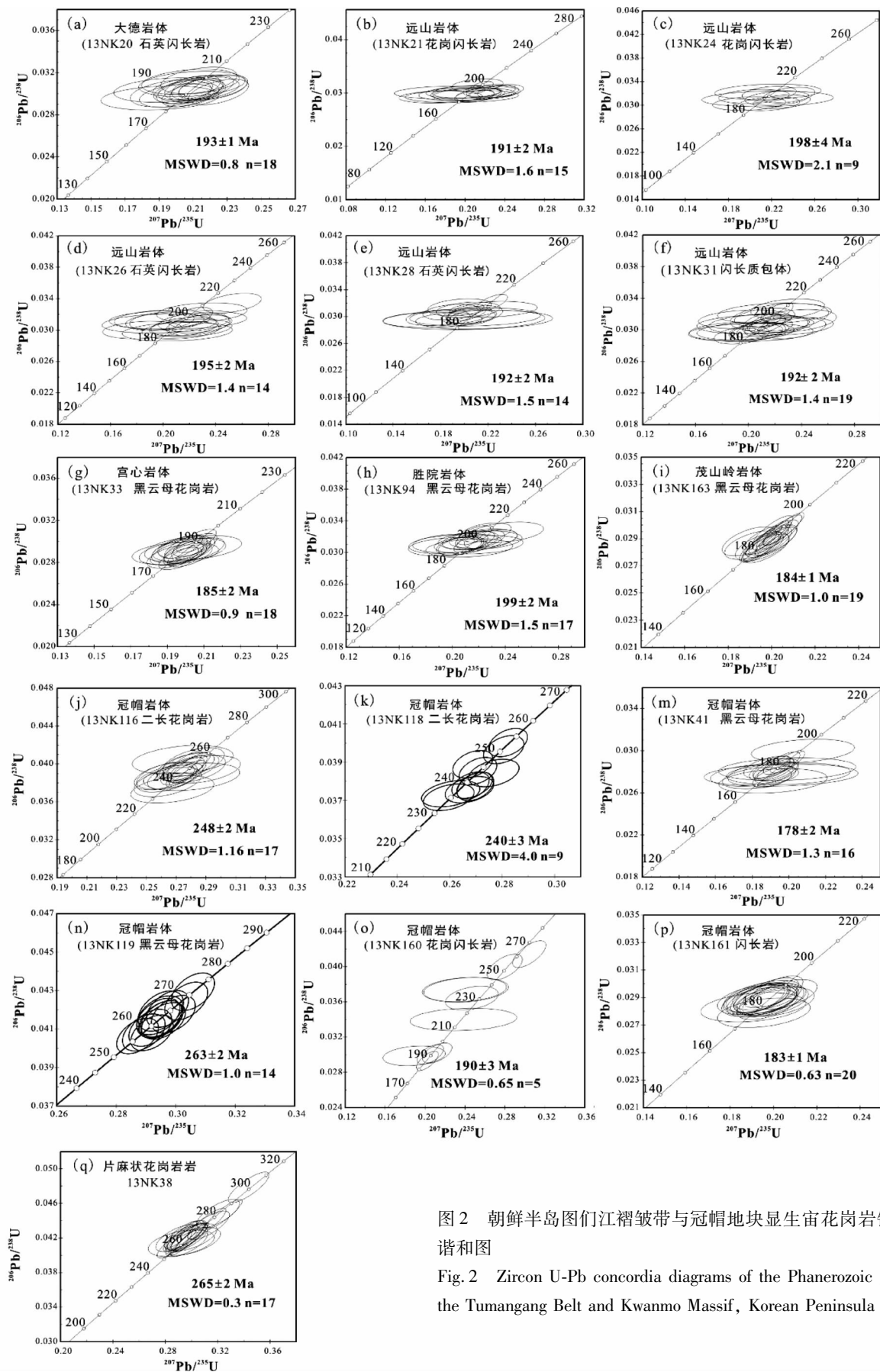


图2 朝鲜半岛图们江褶皱带与冠帽地块显生宙花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 2 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

表 1 朝鲜图们江褶皱带与冠帽地块显生宙花岗岩年龄及 Hf-O 同位素简表

Table 1 Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes of Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

| 地区 | 序号 | 样品号 | 岩体 | 岩性 | 年龄 (Ma) | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ |
|--------------|----|---------|-----|--------|---------|------------------------------|---------------------------------|
| 图们江褶皱带显生宙花岗岩 | 1 | 13NK20 | 大德 | 石英闪长岩 | 193 ± 1 | 7.7 ~ 10.9 | 6.2 ~ 6.8 |
| | 2 | 13NK21 | 远山 | 花岗闪长岩 | 191 ± 2 | | |
| | 3 | 13NK24 | 远山 | 花岗闪长岩 | 198 ± 4 | 9.5 ~ 11.4 | 6.1 ~ 6.3 |
| | 4 | 13NK26 | 远山 | 石英闪长岩 | 195 ± 2 | 8.4 ~ 13.5 | |
| | 5 | 13NK28 | 远山 | 石英闪长岩 | 192 ± 2 | 8.7 ~ 12.2 | |
| | 6 | 13NK31 | 远山 | 闪长质包体 | 192 ± 2 | 8.6 ~ 11.8 | 5.8 ~ 6.8 |
| | 7 | 13NK33 | 宫心 | 黑云母花岗岩 | 185 ± 2 | 7.7 ~ 10.2 | 6.6 ~ 7.2 |
| | 8 | 13NK94 | 胜院 | 黑云母花岗岩 | 199 ± 2 | 7.6 ~ 13.3 | 6.7 ~ 7.4 |
| | 9 | 13NK163 | 茂山岭 | 黑云母花岗岩 | 184 ± 1 | 4.7 ~ 10.0 | 6.4 ~ 7.4 |
| 冠帽地块显生宙花岗岩 | 10 | 13NK41 | 冠帽 | 黑云母花岗岩 | 178 ± 2 | 4.9 ~ 8.8 | 5.7 ~ 6.3 |
| | 11 | 13NK116 | 冠帽 | 二长花岗岩 | 248 ± 2 | -9.0 ~ -3.8 | 7.3 ~ 9.2 |
| | 12 | 13NK118 | 冠帽 | 二长花岗岩 | 240 ± 3 | -10.9 ~ -4.2 | 7.2 ~ 8.2 |
| | 13 | 13NK119 | 冠帽 | 黑云母花岗岩 | 263 ± 2 | -9.7 ~ -4.5 | 5.6 ~ 7.4 |
| | 14 | 13NK160 | 冠帽 | 花岗闪长岩 | 190 ± 3 | 7.2 ~ 10.6 | 5.9 ~ 6.9 |
| | 15 | 13NK161 | 冠帽 | 闪长岩 | 183 ± 1 | 6.2 ~ 9.7 | 5.7 ~ 6.3 |
| | 16 | 13NK38 | | 片麻状花岗岩 | 265 ± 2 | 8.9 ~ 12.0 | |

注: 简表中仅列出岩浆结晶锆石的 Hf-O 同位素数据, 捕获锆石的同位素数据见文中讨论

大德石英闪长岩(13NK20)18 颗锆石的 18 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上(图 2a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $193 \pm 1\text{Ma}$ (2σ , $\text{MSWD}=0.8$), 代表了石英闪长岩的结晶时代。

远山岩体位于图们江褶皱带的中部, 其主体岩性为花岗闪长岩, 少量闪长岩和石英闪长岩产出在岩体的边部。花岗闪长岩中常见中细粒闪长质包体。采自岩体不同部位的 2 件中-粗粒花岗闪长岩(13NK21 和 13NK24) 及 2 件石英闪长岩(13NK26 和 13NK28) 分别获得 $191 \pm 2\text{Ma}$ 、 $198 \pm 4\text{Ma}$ 、 $195 \pm 2\text{Ma}$ 和 $192 \pm 2\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄(图 2b-e), 四组年龄在误差范围内一致, 表明花岗闪长岩和石英闪长岩同时形成于早侏罗世。同时, 我们还对岩体中的闪长质包体(13NK31) 进行了年龄测试, 20 颗锆石获得的 20 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上(图 2f), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $192 \pm 2\text{Ma}$ (2σ , $\text{MSWD}=1.4$), 与花岗岩的年龄在误差范围内一致, 表明镁铁质岩浆与花岗质岩浆同时就位。

宫心岩体(13NK33)、胜院岩体(13NK94) 和茂山岭岩体(13NK163) 的岩性均为黑云母花岗岩, 测试结果表明, 它们均形成于侏罗纪, 其年龄分别为 $185 \pm 2\text{Ma}$ 、 $199 \pm 2\text{Ma}$ 和 $184 \pm 1\text{Ma}$ (图 2g-i)。

冠帽杂岩体规模巨大, 并由多种不同的岩石类型所组成。根据区域地质调查和野外实地考察, 该岩体的主体岩性为中粒二长花岗岩和斑状二长花岗岩, 部分地段出现闪长岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩。测年结果显示, 中粒二长花岗岩(13NK116) 的年龄为 $248 \pm 2\text{Ma}$ (图 2j), 斑状二长花岗岩(13NK118) 为 $240 \pm 3\text{Ma}$ (图 2k), 推测其为两期岩浆活动的产物。2 个黑云母花岗岩(13NK41 和 13NK119) 分别获得 $178 \pm 2\text{Ma}$ 和 $263 \pm 2\text{Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(图 2m, n), 表明其侵位年龄分别为侏罗纪和晚二叠世。花岗闪长岩(13NK160) 共获得 11 个分析数据(图 2o), 年龄较为分

散, 表明含有残留锆石, 其中最年轻的 5 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $190 \pm 3\text{Ma}$, 代表了花岗闪长岩的结晶年龄。闪长岩(13NK161) 获得 20 个分析数据, 数据点均位于 U-Pb 谐和线上(图 2p), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $183 \pm 1\text{Ma}$, 代表了闪长岩的结晶年龄。上述情况表明, 冠帽杂岩体是多次岩浆活动的复式岩体, 其主体形成于早三叠世($248 \sim 240\text{Ma}$), 还经历了晚二叠世(263Ma) 和侏罗纪($190 \sim 178\text{Ma}$) 的岩浆活动。

片麻状花岗岩(13NK38) 被划分为元古代的茂山群, 其锆石具有明显的成分环带, Th/U 值较高, 为 $0.33 \sim 1.65$, 表明为岩浆成因。22 颗锆石的 22 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上(图 2q), 除 5 个数据点给出的年龄稍老, 其它 17 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $265 \pm 2\text{Ma}$, 表明该花岗岩形成于二叠纪, 并不是早期所认为的元古代。

5.2 地球化学特征

在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解上(图 3a), 朝鲜北部花岗岩的投影点落在辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩区, 与岩石的矿物定名基本一致。

研究区内各时期的花岗岩在主要元素上表现为极为相似的特征(表 2): 岩石的含铝指数 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (分子比) 小于 1.1(图 3b), 表现出非 S 型花岗岩的特点; 花岗岩的 SiO_2 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (分子比) 呈现良好的负相关关系(图 3c); 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上(图 3d), 投影点落在钙-碱性系列和高钾钙碱性系列, 其中 SiO_2 含量低于 70% 的样品都属于钙-碱性岩系, 而 SiO_2 含量高于 70% 的样品以高钾钙碱性岩系为主。

研究区内花岗岩的稀土配分曲线可大致分为两类(图 4),

表2 朝鲜半岛图们江褶皱带与冠帽地块显生宙花岗岩的全岩元素地球化学成分(主量元素:wt%;稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)
 Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element compositions for the Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

| 样品号 | 13NK19 | 13NK20 | 13NK21 | 13NK24 | 13NK24-3 | 13NK25 | 13NK26 | 13NK28 | 13NK29 | 13NK31 | 13NK32 | 13NK33 |
|---|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 岩性 | 石英闪长岩 | 石英闪长岩 | 花岗闪长岩 | 花岗闪长岩 | 钾质脉 | 花岗闪长岩 | 石英闪长岩 | 石英闪长岩 | 石英闪长岩 | 闪长质包体 | 花岗闪长岩 | 黑云母花岗岩 |
| 岩体 | 大德 | | | | | 远山 | | | | | | 宫心 |
| SiO ₂ | 52.1 | 63.7 | 66.0 | 66.5 | 76.8 | 63.9 | 57.8 | 56.3 | 57.1 | 56.5 | 65.3 | 71.7 |
| TiO ₂ | 0.84 | 0.62 | 0.59 | 0.61 | 0.08 | 0.69 | 0.93 | 1.04 | 1.02 | 0.81 | 0.65 | 0.33 |
| Al ₂ O ₃ | 17.6 | 16.0 | 15.6 | 15.5 | 12.4 | 15.9 | 17.0 | 16.2 | 16.4 | 17.5 | 15.6 | 15.6 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 9.38 | 5.31 | 4.81 | 4.82 | 0.77 | 5.53 | 7.64 | 7.58 | 7.46 | 7.67 | 5.05 | 2.09 |
| MnO | 0.15 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.01 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.10 | 0.14 | 0.08 | 0.04 |
| MgO | 6.01 | 2.84 | 2.20 | 2.28 | 0.15 | 2.67 | 2.93 | 4.87 | 4.79 | 4.09 | 2.42 | 0.68 |
| CaO | 9.69 | 5.38 | 4.55 | 4.43 | 0.56 | 4.89 | 6.56 | 6.81 | 6.69 | 6.87 | 4.66 | 2.92 |
| Na ₂ O | 2.28 | 3.41 | 3.61 | 3.59 | 2.57 | 3.60 | 3.80 | 3.70 | 3.82 | 4.24 | 3.38 | 4.54 |
| K ₂ O | 0.70 | 2.06 | 2.44 | 2.65 | 6.36 | 2.45 | 1.17 | 1.01 | 0.95 | 1.58 | 2.59 | 2.56 |
| P ₂ O ₅ | 0.06 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.01 | 0.12 | 0.17 | 0.20 | 0.21 | 0.12 | 0.11 | 0.10 |
| LOI | 1.50 | 1.06 | 0.48 | 0.46 | 0.22 | 0.50 | 2.50 | 2.46 | 2.36 | 0.64 | 0.46 | 0.40 |
| Total | 100.3 | 100.5 | 100.5 | 101.0 | 99.9 | 100.3 | 100.6 | 100.3 | 100.8 | 100.1 | 100.2 | 100.9 |
| Ga | 18.5 | 18.1 | 17.1 | 17.9 | 9.0 | 19.0 | 19.8 | 21.2 | 21.0 | 20.2 | 18.2 | 18.0 |
| Rb | 20.6 | 73.3 | 82.2 | 87.7 | 130.8 | 80.9 | 30.9 | 35.3 | 33.1 | 63.1 | 88.3 | 70.6 |
| Sr | 318.9 | 254.0 | 285.2 | 238.1 | 107.6 | 229.4 | 305.7 | 520.2 | 494.4 | 320.0 | 242.1 | 349.1 |
| Y | 13.2 | 21.8 | 25.5 | 25.2 | 1.3 | 26.3 | 29.0 | 17.6 | 17.2 | 22.6 | 25.1 | 5.7 |
| Zr | 74.9 | 165.5 | 206.2 | 152.4 | 75.4 | 167.8 | 137.7 | 151.0 | 149.7 | 103.4 | 173.7 | 118.0 |
| Nb | 2.4 | 4.8 | 5.2 | 5.4 | 1.4 | 5.5 | 5.5 | 3.5 | 3.5 | 3.7 | 5.5 | 4.3 |
| Cs | 2.0 | 4.5 | 5.4 | 5.9 | 2.1 | 5.4 | 2.4 | 1.3 | 1.2 | 4.7 | 6.7 | 6.6 |
| Ba | 131.5 | 323.6 | 380.9 | 421.2 | 236.0 | 441.7 | 264.0 | 232.7 | 215.4 | 294.0 | 412.4 | 481.3 |
| La | 7.7 | 16.3 | 19.4 | 17.3 | 14.0 | 16.7 | 14.1 | 15.6 | 15.7 | 13.6 | 23.1 | 19.2 |
| Ce | 17.9 | 36.7 | 41.8 | 39.4 | 28.2 | 38.0 | 32.6 | 34.9 | 35.1 | 29.1 | 47.2 | 37.0 |
| Pr | 2.3 | 4.5 | 5.0 | 4.7 | 2.2 | 4.8 | 4.2 | 4.5 | 4.6 | 3.8 | 5.5 | 4.1 |
| Nd | 8.9 | 17.9 | 19.5 | 18.7 | 5.7 | 19.6 | 17.2 | 18.4 | 18.5 | 15.4 | 20.7 | 14.6 |
| Sm | 2.2 | 4.1 | 4.4 | 4.3 | 0.6 | 4.5 | 4.3 | 3.9 | 4.0 | 3.7 | 4.6 | 2.5 |
| Eu | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.4 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.0 | 0.8 |
| Gd | 2.3 | 4.0 | 4.3 | 4.1 | 0.4 | 4.4 | 4.5 | 3.5 | 3.5 | 3.9 | 4.4 | 1.8 |
| Tb | 0.4 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.0 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.2 |
| Dy | 2.5 | 3.8 | 4.3 | 4.1 | 0.5 | 4.3 | 4.7 | 3.2 | 3.2 | 3.8 | 4.2 | 1.4 |
| Ho | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.1 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.3 |
| Er | 1.4 | 2.1 | 2.5 | 2.4 | 0.2 | 2.5 | 2.8 | 1.7 | 1.7 | 2.1 | 2.3 | 0.5 |
| Tm | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.1 |
| Yb | 1.3 | 2.1 | 2.6 | 2.4 | 0.2 | 2.5 | 2.8 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 2.3 | 0.4 |
| Lu | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.1 |
| Hf | 1.9 | 4.5 | 5.8 | 4.0 | 2.5 | 4.3 | 3.4 | 3.7 | 3.8 | 2.5 | 4.5 | 3.2 |
| Ta | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.5 |
| Pb | 12.9 | 13.7 | 55.0 | 11.7 | 19.4 | 17.7 | 11.4 | 10.8 | 6.2 | 12.2 | 12.5 | 19.0 |
| Th | 2.6 | 8.3 | 11.5 | 8.7 | 25.1 | 5.8 | 2.9 | 4.4 | 4.4 | 3.8 | 9.5 | 8.7 |
| U | 0.7 | 1.3 | 6.7 | 1.5 | 2.0 | 1.0 | 0.7 | 1.3 | 1.3 | 1.0 | 2.6 | 2.3 |

续表 2

Continued Table 2

| 样品号 | 13NK94 | 13NK95 | 13NK41 | 13NK116 | 13NK117 | 13NK118 | 13NK119 | 13NK120 | 13NK160 | 13NK161 | 13NK163 |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 岩性 | 黑云母花岗岩 | 黑云母花岗岩 | 黑云母花岗岩 | 二长花岗岩 | 二长花岗岩 | 二长花岗岩 | 黑云母花岗岩 | 基性岩脉 | 花岗闪长岩 | 闪长岩 | 黑云母花岗岩 |
| 岩体 | 胜院 | | | 冠帽 | | | | | | | 茅山岭 |
| SiO ₂ | 73.7 | 72.9 | 71.4 | 71.4 | 71.3 | 72.3 | 71.1 | 51.4 | 74.2 | 59.3 | 71.5 |
| TiO ₂ | 0.22 | 0.28 | 0.36 | 0.26 | 0.31 | 0.26 | 0.19 | 1.31 | 0.23 | 0.96 | 0.29 |
| Al ₂ O ₃ | 14.2 | 14.3 | 14.4 | 15.3 | 15.3 | 14.8 | 15.8 | 16.3 | 13.8 | 17.5 | 15.3 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 1.96 | 2.33 | 2.33 | 1.95 | 2.1 | 1.68 | 1.85 | 8.93 | 1.93 | 6.85 | 2.47 |
| MnO | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.21 | 0.06 | 0.12 | 0.07 |
| MgO | 0.39 | 0.57 | 0.83 | 0.41 | 0.55 | 0.43 | 0.40 | 7.30 | 0.48 | 2.33 | 0.76 |
| CaO | 1.67 | 1.72 | 2.04 | 1.72 | 1.76 | 1.61 | 2.46 | 8.00 | 1.49 | 5.10 | 2.40 |
| Na ₂ O | 4.36 | 4.33 | 4.08 | 4.37 | 4.28 | 4.42 | 4.32 | 3.88 | 3.86 | 4.54 | 4.47 |
| K ₂ O | 3.15 | 3.30 | 3.77 | 4.19 | 4.22 | 3.98 | 3.73 | 0.66 | 3.98 | 2.26 | 2.55 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.28 | 0.06 | 0.31 | 0.11 |
| LOI | 0.58 | 0.60 | 0.58 | 0.42 | 0.52 | 0.92 | 0.44 | 2.18 | 0.48 | 0.96 | 0.68 |
| Total | 100.3 | 100.4 | 99.8 | 100.1 | 100.4 | 100.4 | 100.4 | 100.5 | 100.6 | 100.2 | 100.6 |
| Ga | 15.3 | 16.4 | 16.9 | 18.5 | 19.0 | 18.8 | 18.6 | 21.6 | 14.4 | 21.7 | 16.6 |
| Rb | 85.0 | 93.6 | 121.8 | 127.1 | 133.7 | 144.4 | 120.0 | 25.2 | 127.4 | 71.9 | 70.8 |
| Sr | 149.2 | 154.5 | 288.5 | 460.3 | 423.6 | 409.1 | 626.0 | 606.3 | 216.7 | 415.5 | 260.0 |
| Y | 39.9 | 47.0 | 8.2 | 9.6 | 8.5 | 7.8 | 11.6 | 31.0 | 14.3 | 28.4 | 13.2 |
| Zr | 214.6 | 234.6 | 122.2 | 204.9 | 173.5 | 151.1 | 132.1 | 201.7 | 147.6 | 210.6 | 145.2 |
| Nb | 6.5 | 9.1 | 7.1 | 8.6 | 9.3 | 10.1 | 11.9 | 6.8 | 7.6 | 9.2 | 6.1 |
| Cs | 2.5 | 2.9 | 3.8 | 2.0 | 2.8 | 2.2 | 1.2 | 1.2 | 3.5 | 4.2 | 3.7 |
| Ba | 477.1 | 521.8 | 493.9 | 954.7 | 736.0 | 705.9 | 1174 | 415.1 | 746.7 | 553.4 | 399.1 |
| La | 20.2 | 22.4 | 26.1 | 37.1 | 28.8 | 32.0 | 22.4 | 29.0 | 33.3 | 24.5 | 15.4 |
| Ce | 44.4 | 46.1 | 45.7 | 67.5 | 57.8 | 58.0 | 41.9 | 59.8 | 59.5 | 53.2 | 30.5 |
| Pr | 5.3 | 5.8 | 4.7 | 6.7 | 5.6 | 6.1 | 4.5 | 7.5 | 6.0 | 6.3 | 3.7 |
| Nd | 20.8 | 23.1 | 15.9 | 21.8 | 18.7 | 20.4 | 15.8 | 31.0 | 19.8 | 25.7 | 13.3 |
| Sm | 5.0 | 5.7 | 2.7 | 3.4 | 3.0 | 3.2 | 2.8 | 6.7 | 3.2 | 5.7 | 2.7 |
| Eu | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 2.0 | 0.7 | 1.6 | 0.8 |
| Gd | 5.2 | 6.0 | 2.1 | 2.4 | 2.1 | 2.2 | 2.2 | 6.3 | 2.5 | 5.4 | 2.3 |
| Tb | 0.9 | 1.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 1.0 | 0.4 | 0.8 | 0.4 |
| Dy | 5.9 | 6.6 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 1.6 | 1.9 | 5.4 | 2.3 | 4.8 | 2.3 |
| Ho | 1.3 | 1.5 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 1.1 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |
| Er | 3.8 | 4.4 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 1.0 | 3.0 | 1.4 | 2.6 | 1.2 |
| Tm | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.2 |
| Yb | 4.1 | 5.0 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 1.2 | 2.8 | 1.5 | 2.5 | 1.1 |
| Lu | 0.6 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.2 |
| Hf | 5.5 | 6.3 | 3.3 | 4.6 | 4.2 | 4.2 | 3.4 | 4.5 | 3.7 | 4.9 | 3.5 |
| Ta | 0.6 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 0.9 | 0.4 | 1.0 | 0.8 | 0.6 |
| Pb | 12.6 | 12.8 | 15.9 | 21.1 | 20.1 | 23.9 | 19.6 | 64.4 | 16.7 | 12.7 | 15.7 |
| Th | 10.6 | 10.7 | 21.3 | 13.7 | 12.9 | 16.6 | 8.2 | 4.3 | 17.3 | 10.9 | 6.6 |
| U | 2.6 | 3.2 | 3.5 | 1.8 | 1.8 | 5.3 | 1.9 | 1.2 | 3.8 | 2.5 | 1.6 |

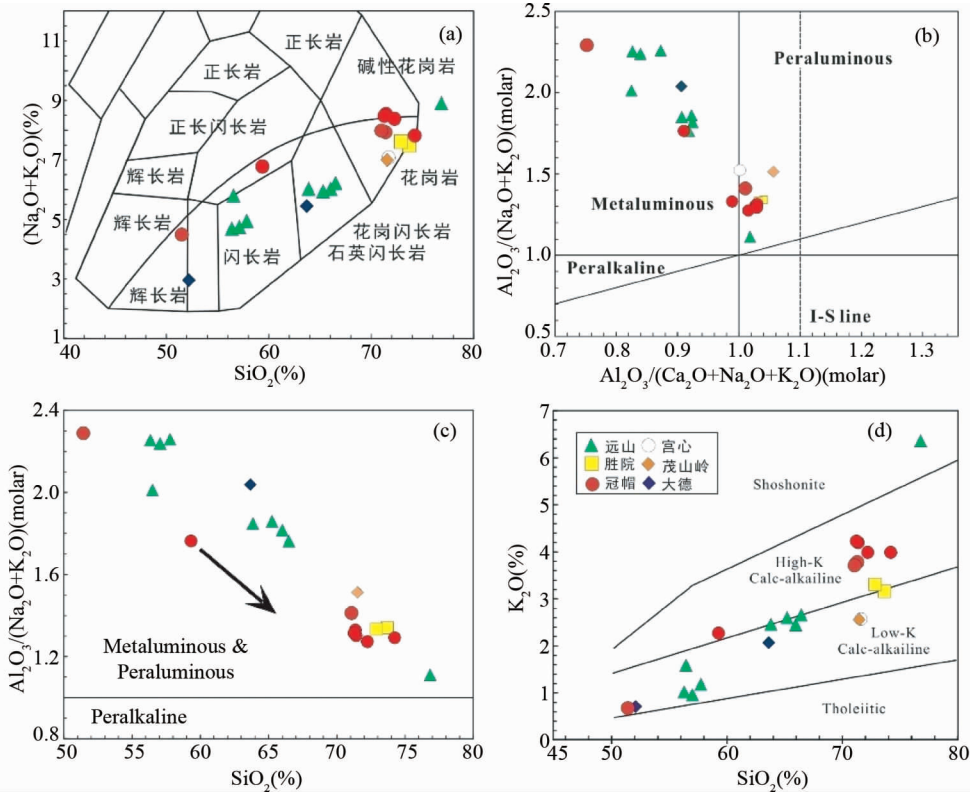


图3 朝鲜半岛图们江褶皱带与冠帽地块显生宙花岗岩的主要元素分类图解

(a) SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; (b) A/NK - A/CNK ; (c) SiO_2 - A/NK ; (d) SiO_2 - K_2O

Fig. 3 Geochemical discrimination diagrams for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

一类以远山石英闪长岩-花岗闪长岩、冠帽闪长岩、胜院黑云母花岗岩和大德石英闪长岩为代表, 稀土配分曲线呈轻稀土曲线较陡, 重稀土曲线平缓的特点, 轻重稀土分馏较弱 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.2 \sim 5.7$), 具弱负 Eu 异常; 另一类以冠帽二长花岗岩、花岗岩闪长岩和黑云母花岗岩及宫心、茂山岭黑云母花岗岩为代表, 基本无或弱的负 Eu 异常, 轻重稀土分馏较强 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.6 \sim 34.5$), 部分样品的重稀土相对于轻稀土强烈亏损, 推测源岩存在石榴石或角闪石。

研究区内花岗岩的显著特征是高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf) 的含量较低, 其中 Nb 的含量低于 Lachlan Belt 内的 I 型和高分异的 I 型花岗岩的平均值 (14×10^{-6} 、 21×10^{-6}) (Chappell and White, 1992; Chappell, 1999)。在原始地幔标准化图解上 (图 5), 花岗岩的微量元素显示了富集大离子亲石元素 (LILE), 如 K、Rb、Th、U 及轻稀土元素 (LREE), 亏损高场强元素 (HSFE, Nb、P、Ti), 其微量元素配分曲线呈右倾趋势, 与 LILE、LREE 相比具有明显的 Ba、Nb、Ta、P 和 Ti 元素的负异常。

5.3 Hf-O 同位素特征

5.3.1 图们江褶皱带显生宙花岗岩的 Hf-O 同位素特征

本文对图们江褶皱带中的大德、远山、宫心、茂山岭和胜院岩体的 8 件样品进行了锆石原位微区 Hf 同位素测试, 且

对其中的 6 件样品进行了锆石原位微区 O 同位素测试, 测试结果见表 3、图 6。

大德石英闪长岩 (13NK20) 的 Hf 同位素变化较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282876 \sim 0.282965$, 按照锆石所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄计算, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 7.7 \sim 10.9$, Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 变化范围为 478 ~ 646Ma, Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM^C}) 为 532 ~ 732Ma, 平均年龄为 599Ma。O 同位素组成相对比较均一, 呈单峰正态分布, $\delta^{18}\text{O} = 6.2\text{‰} \sim 6.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 加权平均值为 $6.5\text{‰} \pm 0.1\text{‰}$ 。

远山花岗闪长岩 (13NK24) 和闪长质包体 (13NK31) 分别做了 9 颗和 20 颗锆石的原位 Hf-O 同位素测定, 2 个样品获得相似的 Hf-O 同位素特征: Hf 同位素变化较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别分布于 $0.282923 \sim 0.282972$ 和 $0.282900 \sim 0.282990$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 9.5 ~ 11.4 和 8.6 ~ 11.8, Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 变化范围为 458 ~ 553Ma 和 436 ~ 602Ma, Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM^C}) 的平均年龄分别为 584Ma 和 572Ma; O 同位素组成相对比较均一, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $6.1\text{‰} \sim 6.3\text{‰}$ 和 $5.8\text{‰} \sim 6.8\text{‰}$ 。石英闪长岩 13NK26 和 13NK28 分别做了 20 颗和 19 颗锆石的原位 Hf 同位素测定。样品 13NK26 中锆石的 Hf 同位素变化较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282898 \sim 0.283038$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 8.4 \sim 13.5$; Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 变化范围为 346 ~ 611Ma, Hf 平均地壳模式年

表3 朝鲜半岛图们江褶皱带与冠帽地块中生代花岗岩的 Hf-O 同位素数据

Table 3 Hf-O isotopic data for the Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM} (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^{C} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|-------------|----------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|-----|
| 图们江褶皱带 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13NK20 01 | 194 | 0.04 | 0.001 | 0.282939 | 0.000019 | 0.282935 | 0.283111 | 5.9 | 10.0 | 447 | 526 | 32 | 586 | -0.96 | 6.2 | 0.2 |
| 13NK20 02 | 195 | 0.02 | 0.001 | 0.282937 | 0.000016 | 0.282934 | 0.283110 | 5.8 | 10.0 | 444 | 524 | 31 | 591 | -0.98 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK20 03 | 191 | 0.02 | 0.001 | 0.282910 | 0.000017 | 0.282908 | 0.283113 | 4.9 | 9.0 | 481 | 574 | 34 | 654 | -0.98 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK20 04 | 193 | 0.04 | 0.001 | 0.282943 | 0.000016 | 0.282939 | 0.283112 | 6.1 | 10.1 | 442 | 519 | 31 | 577 | -0.96 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK20 05 | 193 | 0.03 | 0.001 | 0.282938 | 0.000019 | 0.282935 | 0.283112 | 5.9 | 10.0 | 445 | 525 | 31 | 588 | -0.97 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK20 06 | 193 | 0.03 | 0.001 | 0.282962 | 0.000017 | 0.282958 | 0.283112 | 6.7 | 10.8 | 411 | 480 | 29 | 535 | -0.97 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK20 07 | 192 | 0.03 | 0.001 | 0.282946 | 0.000019 | 0.282942 | 0.283112 | 6.1 | 10.2 | 436 | 512 | 31 | 572 | -0.97 | 6.4 | 0.3 |
| 13NK20 08 | 192 | 0.02 | 0.001 | 0.282955 | 0.000017 | 0.282952 | 0.283112 | 6.5 | 10.6 | 418 | 490 | 29 | 551 | -0.98 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 09 | 193 | 0.02 | 0.001 | 0.282951 | 0.000018 | 0.282948 | 0.283112 | 6.3 | 10.5 | 425 | 498 | 30 | 559 | -0.98 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 10 | 192 | 0.03 | 0.001 | 0.282927 | 0.000017 | 0.282923 | 0.283112 | 5.5 | 9.6 | 462 | 547 | 33 | 616 | -0.97 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 11 | 194 | 0.03 | 0.001 | 0.282900 | 0.000016 | 0.282896 | 0.283111 | 4.5 | 8.7 | 499 | 595 | 36 | 676 | -0.97 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 12 | 196 | 0.03 | 0.001 | 0.282918 | 0.000017 | 0.282915 | 0.283109 | 5.2 | 9.4 | 472 | 559 | 34 | 632 | -0.97 | 6.5 | 0.3 |
| 13NK20 13 | 190 | 0.02 | 0.001 | 0.282935 | 0.000016 | 0.282933 | 0.283114 | 5.8 | 9.8 | 447 | 528 | 32 | 597 | -0.98 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 14 | 188 | 0.03 | 0.001 | 0.282965 | 0.000017 | 0.282961 | 0.283115 | 6.8 | 10.8 | 408 | 478 | 29 | 532 | -0.97 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 15 | 198 | 0.02 | 0.001 | 0.282914 | 0.000017 | 0.282912 | 0.283108 | 5.0 | 9.3 | 475 | 564 | 34 | 640 | -0.98 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK20 16 | 194 | 0.04 | 0.001 | 0.282953 | 0.000018 | 0.282948 | 0.283111 | 6.4 | 10.5 | 427 | 500 | 30 | 555 | -0.96 | 6.6 | 0.3 |
| 13NK20 17 | 193 | 0.04 | 0.001 | 0.282908 | 0.000018 | 0.282903 | 0.283112 | 4.8 | 8.9 | 492 | 585 | 35 | 657 | -0.96 | 6.6 | 0.2 |
| 13NK20 18 | 198 | 0.03 | 0.001 | 0.282961 | 0.000017 | 0.282958 | 0.283108 | 6.7 | 10.9 | 413 | 480 | 29 | 533 | -0.97 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK20 19 | 193 | 0.04 | 0.001 | 0.282933 | 0.000017 | 0.282928 | 0.283112 | 5.7 | 9.8 | 457 | 538 | 32 | 601 | -0.96 | 6.7 | 0.3 |
| 13NK20 20 | 189 | 0.04 | 0.001 | 0.282876 | 0.000019 | 0.282872 | 0.283114 | 3.7 | 7.7 | 538 | 646 | 39 | 732 | -0.96 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK24-01 | 201 | 0.04 | 0.001 | 0.282932 | 0.000018 | 0.282926 | 0.283106 | 5.6 | 9.9 | 460 | 540 | 32 | 598 | -0.96 | 6.1 | 0.3 |
| 13NK24-02 | 192 | 0.02 | 0.001 | 0.282926 | 0.000018 | 0.282923 | 0.283112 | 5.4 | 9.6 | 461 | 546 | 33 | 617 | -0.97 | 6.2 | 0.2 |
| 13NK24-03 | 194 | 0.03 | 0.001 | 0.282923 | 0.000017 | 0.282919 | 0.283111 | 5.3 | 9.5 | 466 | 553 | 33 | 624 | -0.97 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK24-04 | 203 | 0.03 | 0.001 | 0.282972 | 0.000019 | 0.282968 | 0.283104 | 7.1 | 11.4 | 396 | 458 | 27 | 506 | -0.97 | 6.2 | 0.2 |
| 13NK24-05 | 198 | 0.02 | 0.001 | 0.282931 | 0.000015 | 0.282928 | 0.283108 | 5.6 | 9.9 | 453 | 534 | 32 | 601 | -0.98 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK24-06 | 205 | 0.02 | 0.001 | 0.282938 | 0.000016 | 0.282936 | 0.283103 | 5.9 | 10.3 | 441 | 517 | 31 | 581 | -0.98 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK24-07 | 200 | 0.03 | 0.001 | 0.282929 | 0.000016 | 0.282926 | 0.283107 | 5.6 | 9.8 | 456 | 538 | 32 | 605 | -0.97 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK24-08 | 192 | 0.04 | 0.001 | 0.282951 | 0.000016 | 0.282946 | 0.283112 | 6.3 | 10.4 | 432 | 506 | 30 | 561 | -0.96 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK24-09 | 197 | 0.03 | 0.001 | 0.282949 | 0.000017 | 0.282945 | 0.283109 | 6.3 | 10.4 | 432 | 505 | 30 | 561 | -0.96 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK31-2-01 | 207 | 0.03 | 0.001 | 0.282952 | 0.000020 | 0.282949 | 0.283101 | 6.4 | 10.8 | 425 | 494 | 30 | 547 | -0.97 | 5.8 | 0.3 |
| 13NK31-02 | 189 | 0.05 | 0.002 | 0.282965 | 0.000019 | 0.282960 | 0.283114 | 6.8 | 10.8 | 412 | 481 | 29 | 530 | -0.95 | 5.8 | 0.2 |
| 13NK31-03 | 197 | 0.06 | 0.002 | 0.282990 | 0.000018 | 0.282983 | 0.283109 | 7.7 | 11.8 | 381 | 436 | 26 | 467 | -0.94 | 5.8 | 0.2 |
| 13NK31-04 | 205 | 0.07 | 0.002 | 0.282934 | 0.000017 | 0.282925 | 0.283103 | 5.7 | 9.9 | 466 | 544 | 33 | 591 | -0.93 | 5.9 | 0.3 |
| 13NK31-05 | 194 | 0.04 | 0.001 | 0.282900 | 0.000016 | 0.282895 | 0.283111 | 4.5 | 8.6 | 506 | 602 | 36 | 675 | -0.96 | 5.9 | 0.2 |
| 13NK31-06 | 200 | 0.04 | 0.001 | 0.282937 | 0.000018 | 0.282933 | 0.283107 | 5.9 | 10.1 | 449 | 527 | 32 | 586 | -0.96 | 5.9 | 0.2 |
| 13NK31-07 | 192 | 0.04 | 0.001 | 0.282900 | 0.000016 | 0.282896 | 0.283112 | 4.5 | 8.6 | 501 | 598 | 36 | 676 | -0.97 | 6.1 | 0.2 |
| 13NK31-08 | 192 | 0.09 | 0.003 | 0.282989 | 0.000019 | 0.282979 | 0.283112 | 7.7 | 11.5 | 391 | 449 | 27 | 474 | -0.92 | 6.1 | 0.2 |
| 13NK31-2-09 | 198 | 0.04 | 0.001 | 0.282946 | 0.000017 | 0.282942 | 0.283108 | 6.2 | 10.4 | 436 | 510 | 31 | 567 | -0.96 | 6.1 | 0.2 |
| 13NK31-10 | 189 | 0.03 | 0.001 | 0.282953 | 0.000017 | 0.282950 | 0.283114 | 6.4 | 10.5 | 422 | 496 | 30 | 557 | -0.97 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK31-11 | 192 | 0.03 | 0.001 | 0.282938 | 0.000017 | 0.282935 | 0.283112 | 5.9 | 10.0 | 444 | 524 | 31 | 590 | -0.97 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK31-12 | 204 | 0.03 | 0.001 | 0.282937 | 0.000017 | 0.282933 | 0.283104 | 5.8 | 10.2 | 447 | 524 | 31 | 584 | -0.97 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK31-13 | 199 | 0.06 | 0.002 | 0.282945 | 0.000018 | 0.282938 | 0.283107 | 6.1 | 10.2 | 446 | 521 | 31 | 569 | -0.94 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK31-14 | 195 | 0.09 | 0.003 | 0.282969 | 0.000020 | 0.282959 | 0.283110 | 7.0 | 10.9 | 421 | 486 | 29 | 517 | -0.92 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK31-15 | 188 | 0.03 | 0.001 | 0.282961 | 0.000017 | 0.282958 | 0.283115 | 6.7 | 10.7 | 413 | 483 | 29 | 539 | -0.97 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK31-16 | 200 | 0.03 | 0.001 | 0.282912 | 0.000019 | 0.282909 | 0.283107 | 4.9 | 9.2 | 481 | 570 | 34 | 644 | -0.97 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK31-2-8 | 195 | 0.03 | 0.001 | 0.282951 | 0.000016 | 0.282948 | 0.283110 | 6.3 | 10.5 | 426 | 499 | 30 | 558 | -0.97 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK31-18 | 189 | 0.03 | 0.001 | 0.282909 | 0.000016 | 0.282906 | 0.283114 | 4.9 | 8.9 | 485 | 579 | 35 | 657 | -0.97 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK31-2-9 | 198 | 0.03 | 0.001 | 0.282973 | 0.000018 | 0.282970 | 0.283108 | 7.1 | 11.3 | 396 | 458 | 27 | 505 | -0.97 | 6.6 | 0.2 |
| 13NK31-2-10 | 189 | 0.03 | 0.001 | 0.282928 | 0.000017 | 0.282925 | 0.283114 | 5.5 | 9.6 | 458 | 544 | 33 | 614 | -0.97 | 6.8 | 0.3 |
| 13NK26-01 | 199 | 0.04 | 0.001 | 0.282940 | 0.000023 | 0.282935 | 0.283107 | 6.0 | 10.1 | 446 | 523 | 31 | 580 | -0.96 | | |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM} (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^{C} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|-----------|-------------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------|------------------------------|-----|
| 13NK26-02 | 198 | 0.05 | 0.002 | 0.282987 | 0.000021 | 0.282980 | 0.283108 | 7.6 | 11.7 | 383 | 440 | 26 | 475 | -0.95 | | |
| 13NK26-03 | 199 | 0.06 | 0.002 | 0.282926 | 0.000020 | 0.282919 | 0.283107 | 5.4 | 9.6 | 474 | 557 | 33 | 613 | -0.94 | | |
| 13NK26-04 | 190 | 0.07 | 0.002 | 0.282980 | 0.000019 | 0.282973 | 0.283114 | 7.4 | 11.3 | 397 | 459 | 28 | 495 | -0.94 | | |
| 13NK26-05 | 195 | 0.04 | 0.001 | 0.282971 | 0.000021 | 0.282966 | 0.283110 | 7.0 | 11.1 | 403 | 467 | 28 | 512 | -0.96 | | |
| 13NK26-06 | 190 | 0.05 | 0.002 | 0.282934 | 0.000019 | 0.282928 | 0.283114 | 5.7 | 9.7 | 459 | 541 | 32 | 599 | -0.95 | | |
| 13NK26-08 | 205 | 0.05 | 0.002 | 0.282932 | 0.000020 | 0.282926 | 0.283103 | 5.7 | 9.9 | 462 | 540 | 32 | 595 | -0.95 | | |
| 13NK26-09 | 189 | 0.06 | 0.002 | 0.282898 | 0.000019 | 0.282892 | 0.283114 | 4.5 | 8.4 | 513 | 611 | 37 | 682 | -0.95 | | |
| 13NK26-10 | 193 | 0.06 | 0.002 | 0.282967 | 0.000026 | 0.282960 | 0.283112 | 6.9 | 10.9 | 415 | 482 | 29 | 524 | -0.94 | | |
| 13NK26-11 | 196 | 0.05 | 0.002 | 0.282916 | 0.000018 | 0.282910 | 0.283109 | 5.1 | 9.2 | 485 | 573 | 34 | 637 | -0.95 | | |
| 13NK26-12 | 192 | 0.07 | 0.002 | 0.282957 | 0.000024 | 0.282949 | 0.283112 | 6.6 | 10.5 | 434 | 505 | 30 | 546 | -0.93 | | |
| 13NK26-13 | 195 | 0.05 | 0.002 | 0.282980 | 0.000020 | 0.282974 | 0.283110 | 7.3 | 11.4 | 393 | 453 | 27 | 493 | -0.95 | | |
| 13NK26-14 | 201 | 0.05 | 0.002 | 0.282978 | 0.000028 | 0.282971 | 0.283106 | 7.3 | 11.5 | 396 | 455 | 27 | 494 | -0.95 | | |
| 13NK26-15 | 197 | 0.07 | 0.002 | 0.282919 | 0.000022 | 0.282911 | 0.283109 | 5.2 | 9.2 | 489 | 575 | 35 | 629 | -0.93 | | |
| 13NK26-16 | 189 | 0.06 | 0.002 | 0.282911 | 0.000022 | 0.282904 | 0.283114 | 4.9 | 8.8 | 497 | 590 | 35 | 654 | -0.94 | | |
| 13NK26-17 | 188 | 0.05 | 0.002 | 0.282916 | 0.000019 | 0.282910 | 0.283115 | 5.1 | 9.0 | 485 | 576 | 35 | 642 | -0.95 | | |
| 13NK26-18 | 191 | 0.05 | 0.002 | 0.282982 | 0.000022 | 0.282976 | 0.283113 | 7.4 | 11.4 | 390 | 451 | 27 | 490 | -0.95 | | |
| 13NK26-19 | 197 | 0.05 | 0.002 | 0.282975 | 0.000019 | 0.282968 | 0.283109 | 7.2 | 11.3 | 402 | 464 | 28 | 503 | -0.95 | | |
| 13NK26-20 | 191 | 0.06 | 0.002 | 0.283038 | 0.000024 | 0.283032 | 0.283113 | 9.4 | 13.5 | 310 | 346 | 21 | 362 | -0.94 | | |
| 13NK28-01 | 188 | 0.05 | 0.002 | 0.282964 | 0.000018 | 0.282958 | 0.283115 | 6.8 | 10.7 | 415 | 485 | 29 | 533 | -0.95 | | |
| 13NK28-02 | 190 | 0.04 | 0.001 | 0.282939 | 0.000014 | 0.282934 | 0.283114 | 5.9 | 9.9 | 448 | 528 | 32 | 589 | -0.96 | | |
| 13NK28-03 | 188 | 0.02 | 0.001 | 0.282938 | 0.000016 | 0.282935 | 0.283115 | 5.9 | 9.9 | 443 | 524 | 31 | 593 | -0.98 | | |
| 13NK28-04 | 192 | 0.04 | 0.001 | 0.282913 | 0.000018 | 0.282908 | 0.283112 | 5.0 | 9.0 | 487 | 578 | 35 | 647 | -0.96 | | |
| 13NK28-05 | 185 | 0.04 | 0.002 | 0.283007 | 0.000019 | 0.283002 | 0.283117 | 8.3 | 12.2 | 352 | 403 | 24 | 437 | -0.95 | | |
| 13NK28-07 | 191 | 0.03 | 0.001 | 0.282941 | 0.000014 | 0.282937 | 0.283113 | 6.0 | 10.0 | 442 | 521 | 31 | 584 | -0.97 | | |
| 13NK28-08 | 197 | 0.03 | 0.001 | 0.282953 | 0.000016 | 0.282949 | 0.283109 | 6.4 | 10.6 | 426 | 497 | 30 | 553 | -0.97 | | |
| 13NK28-09 | 190 | 0.03 | 0.001 | 0.282918 | 0.000014 | 0.282914 | 0.283114 | 5.2 | 9.2 | 475 | 565 | 34 | 636 | -0.97 | | |
| 13NK28-10 | 197 | 0.04 | 0.001 | 0.282952 | 0.000017 | 0.282947 | 0.283109 | 6.4 | 10.5 | 431 | 503 | 30 | 555 | -0.96 | | |
| 13NK28-11 | 180 | 0.03 | 0.001 | 0.282910 | 0.000014 | 0.282906 | 0.283121 | 4.9 | 8.7 | 486 | 582 | 35 | 661 | -0.97 | | |
| 13NK28-12 | 189 | 0.03 | 0.001 | 0.282922 | 0.000016 | 0.282918 | 0.283114 | 5.3 | 9.3 | 469 | 557 | 33 | 629 | -0.97 | | |
| 13NK28-13 | 192 | 0.03 | 0.001 | 0.282901 | 0.000014 | 0.282898 | 0.283112 | 4.6 | 8.7 | 498 | 594 | 36 | 673 | -0.97 | | |
| 13NK28-16 | 195 | 0.06 | 0.002 | 0.282937 | 0.000016 | 0.282930 | 0.283110 | 5.8 | 9.9 | 457 | 537 | 32 | 591 | -0.94 | | |
| 13NK28-17 | 194 | 0.05 | 0.002 | 0.282961 | 0.000025 | 0.282955 | 0.283111 | 6.7 | 10.7 | 421 | 490 | 29 | 536 | -0.95 | | |
| 13NK28-19 | 199 | 0.04 | 0.002 | 0.282931 | 0.000021 | 0.282925 | 0.283107 | 5.6 | 9.8 | 463 | 544 | 33 | 602 | -0.95 | | |
| 13NK28-06 | 315 | 0.05 | 0.002 | 0.282675 | 0.000029 | 0.282665 | 0.283024 | -3.4 | 3.1 | 834 | 992 | 60 | 1109 | -0.95 | | |
| 13NK28-14 | 204 | 0.05 | 0.002 | 0.282920 | 0.000015 | 0.282914 | 0.283104 | 5.2 | 9.5 | 480 | 564 | 34 | 622 | -0.95 | | |
| 13NK28-15 | 248 | 0.01 | 0.000 | 0.282519 | 0.000026 | 0.282517 | 0.283072 | -8.9 | -3.6 | 1023 | 1273 | 76 | 1500 | -0.99 | | |
| 13NK33-04 | 184 | 0.01 | 0.001 | 0.282891 | 0.000015 | 0.282890 | 0.283118 | 4.2 | 8.2 | 505 | 609 | 37 | 701 | -0.98 | 6.7 | 0.3 |
| 13NK33-05 | 184 | 0.02 | 0.001 | 0.282891 | 0.000018 | 0.282888 | 0.283118 | 4.2 | 8.1 | 510 | 614 | 37 | 702 | -0.98 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK33-06 | 184 | 0.01 | 0.000 | 0.282916 | 0.000015 | 0.282915 | 0.283118 | 5.1 | 9.1 | 470 | 562 | 34 | 644 | -0.99 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK33-07 | 187 | 0.02 | 0.001 | 0.282946 | 0.000019 | 0.282944 | 0.283116 | 6.2 | 10.2 | 430 | 507 | 30 | 575 | -0.98 | 6.8 | 0.3 |
| 13NK33-08 | 186 | 0.02 | 0.001 | 0.282878 | 0.000014 | 0.282875 | 0.283117 | 3.7 | 7.7 | 528 | 637 | 38 | 731 | -0.98 | 6.8 | 0.3 |
| 13NK33-09 | 184 | 0.01 | 0.001 | 0.282947 | 0.000015 | 0.282946 | 0.283118 | 6.2 | 10.2 | 427 | 505 | 30 | 574 | -0.98 | 6.9 | 0.3 |
| 13NK33-10 | 180 | 0.02 | 0.001 | 0.282911 | 0.000017 | 0.282909 | 0.283121 | 4.9 | 8.8 | 480 | 576 | 35 | 659 | -0.98 | 6.9 | 0.3 |
| 13NK33-11 | 183 | 0.01 | 0.001 | 0.282916 | 0.000015 | 0.282914 | 0.283119 | 5.1 | 9.0 | 472 | 564 | 34 | 646 | -0.98 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK33-12 | 182 | 0.02 | 0.001 | 0.282890 | 0.000015 | 0.282888 | 0.283119 | 4.2 | 8.1 | 509 | 614 | 37 | 705 | -0.98 | 6.9 | 0.3 |
| 13NK33-13 | 188 | 0.02 | 0.001 | 0.282881 | 0.000016 | 0.282878 | 0.283115 | 3.8 | 7.9 | 523 | 630 | 38 | 722 | -0.98 | 6.9 | 0.3 |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM} (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^{C} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|------------|-------------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------|------------------------------|------|
| 13NK33-14 | 187 | 0.01 | 0.001 | 0.282898 | 0.000015 | 0.282896 | 0.283116 | 4.5 | 8.5 | 496 | 595 | 36 | 684 | -0.98 | 7.0 | 0.2 |
| 13NK33-15 | 182 | 0.02 | 0.001 | 0.282905 | 0.000016 | 0.282903 | 0.283119 | 4.7 | 8.6 | 488 | 586 | 35 | 672 | -0.98 | 7.0 | 0.2 |
| 13NK33-16 | 187 | 0.02 | 0.001 | 0.282899 | 0.000017 | 0.282896 | 0.283116 | 4.5 | 8.5 | 498 | 597 | 36 | 682 | -0.98 | 7.0 | 0.3 |
| 13NK33-18 | 186 | 0.01 | 0.001 | 0.282878 | 0.000016 | 0.282877 | 0.283117 | 3.8 | 7.8 | 523 | 632 | 38 | 729 | -0.98 | 7.1 | 0.2 |
| 13NK33-19 | 185 | 0.01 | 0.001 | 0.282902 | 0.000016 | 0.282900 | 0.283117 | 4.6 | 8.6 | 491 | 589 | 35 | 677 | -0.98 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK33-20 | 175 | 0.01 | 0.001 | 0.282928 | 0.000017 | 0.282926 | 0.283124 | 5.5 | 9.3 | 454 | 544 | 33 | 624 | -0.98 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-02 | 196 | 0.08 | 0.003 | 0.283008 | 0.000026 | 0.282998 | 0.283109 | 8.3 | 12.3 | 362 | 410 | 25 | 428 | -0.92 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK94-04 | 197 | 0.04 | 0.001 | 0.282979 | 0.000025 | 0.282974 | 0.283109 | 7.3 | 11.5 | 390 | 450 | 27 | 494 | -0.96 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK94-05 | 196 | 0.04 | 0.001 | 0.282979 | 0.000022 | 0.282973 | 0.283109 | 7.3 | 11.4 | 392 | 453 | 27 | 495 | -0.96 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK94-06 | 195 | 0.10 | 0.004 | 0.282912 | 0.000022 | 0.282899 | 0.283110 | 5.0 | 8.8 | 517 | 606 | 36 | 647 | -0.89 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK94-07 | 201 | 0.08 | 0.003 | 0.282885 | 0.000028 | 0.282875 | 0.283106 | 4.0 | 8.0 | 545 | 645 | 39 | 705 | -0.92 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK94-08 | 200 | 0.10 | 0.003 | 0.282955 | 0.000026 | 0.282943 | 0.283107 | 6.5 | 10.4 | 449 | 518 | 31 | 546 | -0.90 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK94-09 | 200 | 0.07 | 0.002 | 0.282968 | 0.000026 | 0.282959 | 0.283107 | 6.9 | 11.0 | 418 | 482 | 29 | 517 | -0.93 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK94-11 | 197 | 0.06 | 0.002 | 0.283013 | 0.000025 | 0.283005 | 0.283109 | 8.5 | 12.6 | 350 | 396 | 24 | 416 | -0.93 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK94-12 | 204 | 0.07 | 0.003 | 0.282960 | 0.000029 | 0.282950 | 0.283104 | 6.6 | 10.8 | 432 | 499 | 30 | 532 | -0.92 | 7.1 | 0.1 |
| 13NK94-13 | 206 | 0.11 | 0.004 | 0.283035 | 0.000030 | 0.283021 | 0.283102 | 9.3 | 13.3 | 331 | 365 | 22 | 361 | -0.89 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-14 | 198 | 0.06 | 0.002 | 0.282883 | 0.000025 | 0.282875 | 0.283108 | 3.9 | 8.0 | 539 | 640 | 38 | 711 | -0.94 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-15 | 198 | 0.08 | 0.003 | 0.282952 | 0.000027 | 0.282941 | 0.283108 | 6.4 | 10.3 | 448 | 520 | 31 | 554 | -0.91 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-16 | 194 | 0.07 | 0.002 | 0.282977 | 0.000027 | 0.282968 | 0.283111 | 7.2 | 11.2 | 405 | 467 | 28 | 500 | -0.93 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-17 | 201 | 0.05 | 0.002 | 0.282946 | 0.000027 | 0.282940 | 0.283106 | 6.2 | 10.4 | 441 | 514 | 31 | 565 | -0.95 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK94-18 | 200 | 0.08 | 0.003 | 0.282944 | 0.000026 | 0.282934 | 0.283107 | 6.1 | 10.1 | 458 | 533 | 32 | 572 | -0.92 | 7.3 | 0.3 |
| 13NK94-19 | 207 | 0.08 | 0.003 | 0.282869 | 0.000029 | 0.282858 | 0.283101 | 3.4 | 7.6 | 573 | 677 | 41 | 738 | -0.91 | 7.3 | 0.4 |
| 13NK94-20 | 201 | 0.06 | 0.002 | 0.283009 | 0.000028 | 0.283001 | 0.283106 | 8.4 | 12.5 | 354 | 400 | 24 | 423 | -0.94 | 7.4 | 0.2 |
| 13NK163-01 | 188 | 0.07 | 0.002 | 0.282797 | 0.000018 | 0.282789 | 0.283115 | 0.9 | 4.7 | 670 | 812 | 49 | 912 | -0.93 | 6.4 | 0.3 |
| 13NK163-02 | 180 | 0.06 | 0.002 | 0.282872 | 0.000021 | 0.282865 | 0.283121 | 3.5 | 7.3 | 554 | 666 | 40 | 747 | -0.94 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK163-03 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282861 | 0.000017 | 0.282857 | 0.283118 | 3.1 | 7.0 | 556 | 673 | 40 | 770 | -0.97 | 6.6 | 0.2 |
| 13NK163-04 | 183 | 0.02 | 0.001 | 0.282920 | 0.000019 | 0.282918 | 0.283119 | 5.2 | 9.2 | 467 | 557 | 33 | 635 | -0.98 | 6.6 | 0.2 |
| 13NK163-05 | 188 | 0.04 | 0.001 | 0.282865 | 0.000016 | 0.282860 | 0.283115 | 3.3 | 7.2 | 554 | 667 | 40 | 759 | -0.96 | 6.6 | 0.3 |
| 13NK163-06 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282944 | 0.000020 | 0.282939 | 0.283119 | 6.1 | 9.9 | 442 | 522 | 31 | 583 | -0.96 | 6.6 | 0.3 |
| 13NK163-07 | 186 | 0.04 | 0.001 | 0.282900 | 0.000020 | 0.282895 | 0.283117 | 4.5 | 8.4 | 505 | 603 | 36 | 681 | -0.96 | 6.6 | 0.2 |
| 13NK163-09 | 181 | 0.06 | 0.002 | 0.282865 | 0.000018 | 0.282859 | 0.283120 | 3.3 | 7.0 | 562 | 677 | 41 | 763 | -0.94 | 6.7 | 0.3 |
| 13NK163-10 | 180 | 0.06 | 0.002 | 0.282878 | 0.000019 | 0.282872 | 0.283121 | 3.8 | 7.5 | 544 | 654 | 39 | 733 | -0.94 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK163-11 | 183 | 0.05 | 0.002 | 0.282947 | 0.000020 | 0.282941 | 0.283119 | 6.2 | 10.0 | 441 | 519 | 31 | 574 | -0.95 | 6.8 | 0.3 |
| 13NK163-12 | 180 | 0.08 | 0.003 | 0.282843 | 0.000021 | 0.282834 | 0.283121 | 2.5 | 6.1 | 607 | 731 | 44 | 814 | -0.92 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK163-13 | 181 | 0.02 | 0.001 | 0.282855 | 0.000020 | 0.282853 | 0.283120 | 2.9 | 6.8 | 560 | 680 | 41 | 784 | -0.98 | 6.8 | 0.2 |
| 13NK163-14 | 184 | 0.05 | 0.002 | 0.282847 | 0.000018 | 0.282842 | 0.283118 | 2.7 | 6.5 | 585 | 707 | 42 | 800 | -0.95 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK163-15 | 186 | 0.04 | 0.001 | 0.282872 | 0.000019 | 0.282867 | 0.283117 | 3.5 | 7.4 | 545 | 656 | 39 | 744 | -0.96 | 6.9 | 0.2 |
| 13NK163-16 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282858 | 0.000023 | 0.282854 | 0.283118 | 3.0 | 7.0 | 560 | 678 | 41 | 776 | -0.97 | 7.0 | 0.3 |
| 13NK163-17 | 189 | 0.07 | 0.002 | 0.282903 | 0.000024 | 0.282895 | 0.283114 | 4.6 | 8.5 | 515 | 610 | 37 | 671 | -0.93 | 7.1 | 0.2 |
| 13NK163-18 | 181 | 0.06 | 0.002 | 0.282867 | 0.000017 | 0.282861 | 0.283120 | 3.4 | 7.1 | 560 | 674 | 40 | 758 | -0.94 | 7.1 | 0.3 |
| 13NK163-19 | 183 | 0.06 | 0.002 | 0.282849 | 0.000020 | 0.282841 | 0.283119 | 2.7 | 6.5 | 593 | 713 | 43 | 796 | -0.93 | 7.1 | 0.3 |
| 13NK163-20 | 185 | 0.06 | 0.002 | 0.282858 | 0.000018 | 0.282851 | 0.283117 | 3.0 | 6.9 | 574 | 691 | 41 | 776 | -0.94 | 7.4 | 0.2 |
| 冠帽地块 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13NK116-01 | 241 | 0.01 | 0.000 | 0.282377 | 0.000018 | 0.282375 | 0.283077 | -14.0 | -8.7 | 1218 | 1535 | 92 | 1821 | -0.99 | 7.3 | 0.21 |
| 13NK116-03 | 250 | 0.02 | 0.001 | 0.282505 | 0.000019 | 0.282502 | 0.283071 | -9.4 | -4.1 | 1048 | 1303 | 78 | 1530 | -0.98 | 7.8 | 0.22 |
| 13NK116-04 | 246 | 0.02 | 0.001 | 0.282454 | 0.000016 | 0.282451 | 0.283073 | -11.3 | -6.0 | 1120 | 1400 | 84 | 1648 | -0.98 | 7.9 | 0.30 |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM} (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^{c} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|------------|-------------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------|------------------------------|------|
| 13NK116-05 | 245 | 0.01 | 0.001 | 0.282730 | 0.000017 | 0.282728 | 0.283074 | -1.5 | 3.8 | 733 | 889 | 53 | 1027 | -0.98 | 8.0 | 0.46 |
| 13NK116-07 | 251 | 0.01 | 0.000 | 0.282640 | 0.000015 | 0.282638 | 0.283070 | -4.7 | 0.8 | 855 | 1050 | 63 | 1228 | -0.99 | 8.0 | 0.40 |
| 13NK116-08 | 249 | 0.02 | 0.001 | 0.282508 | 0.000015 | 0.282504 | 0.283071 | -9.3 | -4.0 | 1047 | 1301 | 78 | 1524 | -0.98 | 8.2 | 0.20 |
| 13NK116-09 | 254 | 0.01 | 0.000 | 0.282527 | 0.000015 | 0.282525 | 0.283068 | -8.7 | -3.1 | 1008 | 1254 | 75 | 1479 | -0.99 | 8.2 | 0.27 |
| 13NK116-10 | 243 | 0.03 | 0.001 | 0.282457 | 0.000016 | 0.282453 | 0.283076 | -11.1 | -6.0 | 1122 | 1400 | 84 | 1642 | -0.97 | 8.3 | 0.24 |
| 13NK116-11 | 251 | 0.01 | 0.000 | 0.282572 | 0.000016 | 0.282570 | 0.283070 | -7.1 | -1.6 | 951 | 1176 | 71 | 1380 | -0.99 | 8.4 | 0.24 |
| 13NK116-12 | 245 | 0.01 | 0.000 | 0.282618 | 0.000013 | 0.282616 | 0.283074 | -5.4 | -0.1 | 883 | 1091 | 65 | 1280 | -0.99 | 8.5 | 0.39 |
| 13NK116-13 | 252 | 0.02 | 0.001 | 0.282416 | 0.000015 | 0.282412 | 0.283069 | -12.6 | -7.2 | 1181 | 1474 | 88 | 1728 | -0.97 | 8.6 | 0.39 |
| 13NK116-14 | 256 | 0.01 | 0.001 | 0.282561 | 0.000018 | 0.282559 | 0.283066 | -7.4 | -1.9 | 966 | 1195 | 72 | 1400 | -0.98 | 8.6 | 0.15 |
| 13NK116-15 | 244 | 0.01 | 0.000 | 0.282624 | 0.000013 | 0.282623 | 0.283075 | -5.2 | 0.1 | 875 | 1080 | 65 | 1267 | -0.99 | 8.7 | 0.44 |
| 13NK116-17 | 249 | 0.01 | 0.001 | 0.282366 | 0.000015 | 0.282363 | 0.283071 | -14.4 | -9.0 | 1238 | 1556 | 93 | 1842 | -0.98 | 8.9 | 0.30 |
| 13NK116-18 | 245 | 0.02 | 0.001 | 0.282407 | 0.000014 | 0.282403 | 0.283074 | -12.9 | -7.7 | 1188 | 1489 | 89 | 1753 | -0.98 | 8.9 | 0.36 |
| 13NK116-19 | 248 | 0.02 | 0.001 | 0.282444 | 0.000015 | 0.282440 | 0.283072 | -11.6 | -6.3 | 1140 | 1422 | 85 | 1667 | -0.97 | 9.1 | 0.29 |
| 13NK116-20 | 251 | 0.02 | 0.001 | 0.282533 | 0.000018 | 0.282530 | 0.283070 | -8.4 | -3.1 | 1009 | 1252 | 75 | 1467 | -0.98 | 9.2 | 0.28 |
| 13NK116-02 | 237 | 0.02 | 0.001 | 0.282394 | 0.000016 | 0.282391 | 0.283080 | -13.4 | -8.3 | 1203 | 1512 | 91 | 1786 | -0.98 | 7.6 | 0.26 |
| 13NK116-06 | 236 | 0.01 | 0.000 | 0.282491 | 0.000016 | 0.282490 | 0.283081 | -9.9 | -4.8 | 1058 | 1326 | 80 | 1570 | -0.99 | 8.0 | 0.26 |
| 13NK118-03 | 238 | 0.04 | 0.001 | 0.282460 | 0.000016 | 0.282454 | 0.283079 | -11.0 | -6.0 | 1129 | 1406 | 84 | 1639 | -0.96 | 7.9 | 0.28 |
| 13NK118-04 | 236 | 0.03 | 0.001 | 0.282445 | 0.000016 | 0.282440 | 0.283081 | -11.6 | -6.6 | 1144 | 1429 | 86 | 1673 | -0.97 | 8.2 | 0.28 |
| 13NK118-05 | 243 | 0.02 | 0.001 | 0.282317 | 0.000016 | 0.282314 | 0.283076 | -16.1 | -10.9 | 1310 | 1651 | 99 | 1954 | -0.98 | 7.2 | 0.28 |
| 13NK118-09 | 239 | 0.02 | 0.001 | 0.282433 | 0.000016 | 0.282430 | 0.283078 | -12.0 | -6.9 | 1151 | 1442 | 87 | 1698 | -0.98 | 8.2 | 0.19 |
| 13NK118-12 | 234 | 0.03 | 0.001 | 0.282459 | 0.000015 | 0.282454 | 0.283082 | -11.1 | -6.1 | 1127 | 1406 | 84 | 1644 | -0.97 | 8.1 | 0.26 |
| 13NK118-16 | 235 | 0.03 | 0.001 | 0.282452 | 0.000014 | 0.282448 | 0.283081 | -11.3 | -6.3 | 1129 | 1412 | 85 | 1657 | -0.97 | 8.1 | 0.30 |
| 13NK118-17 | 239 | 0.05 | 0.001 | 0.282511 | 0.000015 | 0.282504 | 0.283078 | -9.2 | -4.2 | 1062 | 1315 | 79 | 1524 | -0.96 | 8.1 | 0.33 |
| 13NK118-18 | 239 | 0.02 | 0.001 | 0.282437 | 0.000015 | 0.282434 | 0.283078 | -11.8 | -6.7 | 1146 | 1435 | 86 | 1688 | -0.98 | 7.9 | 0.20 |
| 13NK118-19 | 241 | 0.02 | 0.001 | 0.282457 | 0.000015 | 0.282453 | 0.283077 | -11.1 | -6.0 | 1118 | 1398 | 84 | 1644 | -0.98 | 7.8 | 0.26 |
| 13NK118-20 | 244 | 0.03 | 0.001 | 0.282438 | 0.000014 | 0.282433 | 0.283075 | -11.8 | -6.6 | 1151 | 1437 | 86 | 1684 | -0.97 | 8.1 | 0.29 |
| 13NK118-02 | 246 | 0.02 | 0.001 | 0.282435 | 0.000017 | 0.282431 | 0.283073 | -11.9 | -6.7 | 1151 | 1438 | 86 | 1690 | -0.98 | 7.8 | 0.26 |
| 13NK118-07 | 253 | 0.03 | 0.001 | 0.282410 | 0.000018 | 0.282405 | 0.283068 | -12.8 | -7.4 | 1191 | 1486 | 89 | 1741 | -0.97 | 7.8 | 0.21 |
| 13NK118-13 | 251 | 0.02 | 0.001 | 0.282408 | 0.000024 | 0.282404 | 0.283070 | -12.9 | -7.5 | 1193 | 1489 | 89 | 1745 | -0.97 | 7.8 | 0.29 |
| 13NK118-15 | 247 | 0.03 | 0.001 | 0.282498 | 0.000014 | 0.282494 | 0.283073 | -9.7 | -4.4 | 1068 | 1326 | 80 | 1547 | -0.97 | 8.2 | 0.26 |
| 13NK41-01 | 180 | 0.03 | 0.001 | 0.282858 | 0.000017 | 0.282854 | 0.283121 | 3.0 | 6.8 | 561 | 681 | 41 | 780 | -0.97 | 5.7 | 0.3 |
| 13NK41-02 | 179 | 0.03 | 0.001 | 0.282838 | 0.000015 | 0.282835 | 0.283122 | 2.3 | 6.1 | 587 | 716 | 43 | 825 | -0.97 | 5.7 | 0.3 |
| 13NK41-03 | 181 | 0.03 | 0.001 | 0.282852 | 0.000019 | 0.282849 | 0.283120 | 2.8 | 6.7 | 567 | 688 | 41 | 792 | -0.97 | 5.8 | 0.3 |
| 13NK41-04 | 174 | 0.04 | 0.001 | 0.282813 | 0.000020 | 0.282809 | 0.283125 | 1.4 | 5.1 | 627 | 768 | 46 | 885 | -0.96 | 5.9 | 0.2 |
| 13NK41-05 | 177 | 0.02 | 0.001 | 0.282848 | 0.000019 | 0.282845 | 0.283123 | 2.7 | 6.5 | 572 | 697 | 42 | 804 | -0.97 | 5.9 | 0.2 |
| 13NK41-07 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282885 | 0.000018 | 0.282880 | 0.283119 | 4.0 | 7.8 | 526 | 632 | 38 | 716 | -0.96 | 5.9 | 0.3 |
| 13NK41-09 | 176 | 0.03 | 0.001 | 0.282844 | 0.000017 | 0.282841 | 0.283124 | 2.6 | 6.3 | 581 | 708 | 42 | 812 | -0.96 | 6.0 | 0.3 |
| 13NK41-10 | 179 | 0.04 | 0.001 | 0.282879 | 0.000016 | 0.282874 | 0.283122 | 3.8 | 7.6 | 534 | 644 | 39 | 732 | -0.96 | 6.0 | 0.2 |
| 13NK41-11 | 180 | 0.03 | 0.001 | 0.282802 | 0.000015 | 0.282798 | 0.283121 | 1.0 | 4.9 | 639 | 784 | 47 | 907 | -0.97 | 6.0 | 0.3 |
| 13NK41-12 | 173 | 0.03 | 0.001 | 0.282848 | 0.000019 | 0.282845 | 0.283126 | 2.7 | 6.4 | 574 | 700 | 42 | 806 | -0.97 | 6.1 | 0.3 |
| 13NK41-14 | 177 | 0.03 | 0.001 | 0.282888 | 0.000018 | 0.282885 | 0.283123 | 4.1 | 7.9 | 516 | 623 | 37 | 712 | -0.97 | 6.1 | 0.2 |
| 13NK41-15 | 176 | 0.02 | 0.001 | 0.282876 | 0.000020 | 0.282873 | 0.283124 | 3.7 | 7.4 | 531 | 644 | 39 | 742 | -0.98 | 6.2 | 0.2 |
| 13NK41-16 | 184 | 0.02 | 0.001 | 0.282871 | 0.000016 | 0.282868 | 0.283118 | 3.5 | 7.4 | 539 | 651 | 39 | 747 | -0.97 | 6.2 | 0.2 |
| 13NK41-17 | 177 | 0.03 | 0.001 | 0.282841 | 0.000016 | 0.282837 | 0.283123 | 2.4 | 6.2 | 585 | 713 | 43 | 820 | -0.97 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK41-18 | 175 | 0.07 | 0.002 | 0.282921 | 0.000019 | 0.282912 | 0.283124 | 5.3 | 8.8 | 490 | 582 | 35 | 640 | -0.93 | 6.3 | 0.3 |
| 13NK41-20 | 181 | 0.05 | 0.002 | 0.282885 | 0.000017 | 0.282879 | 0.283120 | 4.0 | 7.8 | 531 | 637 | 38 | 717 | -0.95 | 6.3 | 0.2 |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$ | 2σ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_i}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM}^c (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^c (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|------------|-------------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|------------------------------|------|
| 13NK119-01 | 265 | 0.05 | 0.002 | 0.282478 | 0.000014 | 0.282469 | 0.283060 | -10.4 | -4.9 | 1122 | 1380 | 83 | 1581 | -0.94 | 5.6 | 0.3 |
| 13NK119-02 | 257 | 0.04 | 0.001 | 0.282432 | 0.000020 | 0.282425 | 0.283066 | -12.0 | -6.6 | 1172 | 1455 | 87 | 1690 | -0.96 | 6.2 | 0.3 |
| 13NK119-04 | 252 | 0.03 | 0.001 | 0.282465 | 0.000016 | 0.282460 | 0.283069 | -10.9 | -5.5 | 1116 | 1387 | 83 | 1619 | -0.97 | 6.4 | 0.2 |
| 13NK119-05 | 258 | 0.02 | 0.001 | 0.282468 | 0.000014 | 0.282463 | 0.283065 | -10.8 | -5.3 | 1107 | 1376 | 83 | 1609 | -0.97 | 6.5 | 0.2 |
| 13NK119-08 | 258 | 0.05 | 0.002 | 0.282492 | 0.000018 | 0.282483 | 0.283065 | -9.9 | -4.6 | 1101 | 1356 | 81 | 1556 | -0.94 | 6.6 | 0.3 |
| 13NK119-09 | 262 | 0.03 | 0.001 | 0.282391 | 0.000016 | 0.282384 | 0.283062 | -13.5 | -8.0 | 1227 | 1527 | 92 | 1779 | -0.96 | 6.7 | 0.3 |
| 13NK119-10 | 258 | 0.02 | 0.001 | 0.282345 | 0.000016 | 0.282340 | 0.283065 | -15.1 | -9.6 | 1282 | 1605 | 96 | 1883 | -0.97 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK119-11 | 262 | 0.02 | 0.001 | 0.282340 | 0.000019 | 0.282334 | 0.283062 | -15.3 | -9.7 | 1291 | 1614 | 97 | 1892 | -0.97 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK119-12 | 259 | 0.02 | 0.001 | 0.282488 | 0.000017 | 0.282483 | 0.283064 | -10.0 | -4.5 | 1083 | 1342 | 81 | 1563 | -0.97 | 6.7 | 0.2 |
| 13NK119-14 | 262 | 0.03 | 0.001 | 0.282397 | 0.000020 | 0.282390 | 0.283062 | -13.3 | -7.8 | 1222 | 1518 | 91 | 1764 | -0.96 | 7.0 | 0.2 |
| 13NK119-15 | 263 | 0.03 | 0.001 | 0.282458 | 0.000018 | 0.282453 | 0.283061 | -11.1 | -5.5 | 1129 | 1399 | 84 | 1627 | -0.96 | 7.2 | 0.2 |
| 13NK119-17 | 265 | 0.03 | 0.001 | 0.282445 | 0.000016 | 0.282438 | 0.283060 | -11.6 | -6.0 | 1152 | 1427 | 86 | 1656 | -0.96 | 7.3 | 0.2 |
| 13NK119-18 | 263 | 0.02 | 0.001 | 0.282434 | 0.000014 | 0.282429 | 0.283061 | -12.0 | -6.4 | 1157 | 1439 | 86 | 1681 | -0.97 | 7.4 | 0.3 |
| 13NK119-19 | 263 | 0.03 | 0.001 | 0.282389 | 0.000015 | 0.282381 | 0.283061 | -13.6 | -8.0 | 1236 | 1536 | 92 | 1783 | -0.96 | 7.4 | 0.2 |
| 13NK119-03 | 232 | 0.05 | 0.002 | 0.282438 | 0.000015 | 0.282430 | 0.283083 | -11.8 | -7.0 | 1173 | 1460 | 88 | 1692 | -0.95 | 6.3 | 0.2 |
| 13NK160-01 | 237 | 0.02 | 0.001 | 0.282565 | 0.000015 | 0.282560 | 0.283080 | -7.3 | -2.3 | 973 | 1205 | 72 | 1405 | -0.97 | 8.2 | 0.38 |
| 13NK160-05 | 262 | 0.05 | 0.002 | 0.282691 | 0.000017 | 0.282683 | 0.283062 | -2.9 | 2.6 | 809 | 976 | 59 | 1105 | -0.95 | 8.3 | 0.30 |
| 13NK160-08 | 253 | 0.05 | 0.002 | 0.282807 | 0.000020 | 0.282799 | 0.283068 | 1.2 | 6.5 | 644 | 763 | 46 | 848 | -0.95 | 7.1 | 0.24 |
| 13NK160-09 | 216 | 0.01 | 0.001 | 0.282694 | 0.000014 | 0.282692 | 0.283095 | -2.7 | 1.9 | 781 | 963 | 58 | 1126 | -0.98 | 8.2 | 0.24 |
| 13NK160-16 | 231 | 0.05 | 0.002 | 0.282685 | 0.000017 | 0.282678 | 0.283084 | -3.1 | 1.7 | 820 | 999 | 60 | 1137 | -0.95 | 7.0 | 0.26 |
| 13NK160-17 | 237 | 0.03 | 0.001 | 0.282608 | 0.000017 | 0.282603 | 0.283080 | -5.8 | -0.8 | 915 | 1128 | 68 | 1308 | -0.97 | 8.4 | 0.36 |
| 13NK160-02 | 192 | 0.02 | 0.001 | 0.282886 | 0.000015 | 0.282884 | 0.283112 | 4.0 | 8.2 | 513 | 616 | 37 | 708 | -0.98 | 6.4 | 0.25 |
| 13NK160-04 | 186 | 0.09 | 0.003 | 0.282967 | 0.000017 | 0.282955 | 0.283117 | 6.9 | 10.6 | 432 | 500 | 30 | 528 | -0.90 | 6.0 | 0.26 |
| 13NK160-12 | 190 | 0.07 | 0.002 | 0.282952 | 0.000019 | 0.282943 | 0.283114 | 6.4 | 10.2 | 442 | 516 | 31 | 559 | -0.93 | 5.9 | 0.22 |
| 13NK160-18 | 191 | 0.02 | 0.001 | 0.282915 | 0.000015 | 0.282913 | 0.283113 | 5.1 | 9.2 | 475 | 565 | 34 | 642 | -0.98 | 6.9 | 0.27 |
| 13NK160-19 | 192 | 0.04 | 0.001 | 0.282861 | 0.000016 | 0.282857 | 0.283112 | 3.2 | 7.2 | 556 | 670 | 40 | 764 | -0.97 | 6.5 | 0.19 |
| 13NK161-01 | 183 | 0.03 | 0.001 | 0.282848 | 0.000018 | 0.282845 | 0.283119 | 2.7 | 6.6 | 572 | 695 | 42 | 799 | -0.97 | 6.3 | 0.44 |
| 13NK161-02 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282882 | 0.000018 | 0.282878 | 0.283118 | 3.9 | 7.8 | 524 | 632 | 38 | 723 | -0.97 | 6.2 | 0.38 |
| 13NK161-03 | 182 | 0.03 | 0.001 | 0.282920 | 0.000016 | 0.282917 | 0.283119 | 5.2 | 9.1 | 471 | 562 | 34 | 636 | -0.97 | 5.9 | 0.22 |
| 13NK161-04 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282908 | 0.000020 | 0.282904 | 0.283119 | 4.8 | 8.7 | 490 | 586 | 35 | 663 | -0.96 | 6.4 | 0.24 |
| 13NK161-05 | 186 | 0.04 | 0.001 | 0.282925 | 0.000016 | 0.282921 | 0.283117 | 5.4 | 9.4 | 465 | 553 | 33 | 623 | -0.97 | 6.1 | 0.23 |
| 13NK161-06 | 186 | 0.04 | 0.001 | 0.282926 | 0.000019 | 0.282922 | 0.283117 | 5.5 | 9.4 | 463 | 550 | 33 | 620 | -0.97 | 6.3 | 0.40 |
| 13NK161-07 | 181 | 0.03 | 0.001 | 0.282937 | 0.000018 | 0.282933 | 0.283120 | 5.8 | 9.7 | 448 | 531 | 32 | 599 | -0.97 | 6.4 | 0.33 |
| 13NK161-08 | 184 | 0.04 | 0.001 | 0.282918 | 0.000016 | 0.282914 | 0.283118 | 5.2 | 9.0 | 477 | 568 | 34 | 640 | -0.96 | 6.3 | 0.32 |
| 13NK161-09 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282887 | 0.000017 | 0.282883 | 0.283119 | 4.1 | 8.0 | 520 | 625 | 38 | 711 | -0.96 | 6.2 | 0.27 |
| 13NK161-10 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282893 | 0.000017 | 0.282889 | 0.283119 | 4.3 | 8.2 | 512 | 614 | 37 | 697 | -0.96 | 6.1 | 0.30 |
| 13NK161-11 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282902 | 0.000013 | 0.282899 | 0.283118 | 4.6 | 8.5 | 497 | 595 | 36 | 676 | -0.97 | 5.9 | 0.28 |
| 13NK161-12 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282889 | 0.000018 | 0.282886 | 0.283118 | 4.2 | 8.1 | 515 | 619 | 37 | 705 | -0.97 | 6.3 | 0.26 |
| 13NK161-13 | 185 | 0.04 | 0.001 | 0.282837 | 0.000018 | 0.282833 | 0.283117 | 2.3 | 6.2 | 591 | 718 | 43 | 823 | -0.96 | 6.8 | 0.27 |
| 13NK161-14 | 183 | 0.04 | 0.001 | 0.282879 | 0.000017 | 0.282875 | 0.283119 | 3.8 | 7.7 | 533 | 642 | 38 | 729 | -0.96 | 6.3 | 0.28 |
| 13NK161-15 | 184 | 0.03 | 0.001 | 0.282878 | 0.000019 | 0.282875 | 0.283118 | 3.7 | 7.7 | 530 | 640 | 38 | 731 | -0.97 | 6.2 | 0.38 |
| 13NK161-16 | 180 | 0.03 | 0.001 | 0.282915 | 0.000022 | 0.282911 | 0.283121 | 5.1 | 8.9 | 479 | 573 | 34 | 650 | -0.97 | 6.4 | 0.31 |
| 13NK161-17 | 177 | 0.04 | 0.001 | 0.282897 | 0.000018 | 0.282893 | 0.283123 | 4.4 | 8.2 | 507 | 609 | 37 | 692 | -0.96 | 6.5 | 0.31 |
| 13NK161-18 | 183 | 0.03 | 0.001 | 0.282892 | 0.000016 | 0.282889 | 0.283119 | 4.2 | 8.1 | 511 | 614 | 37 | 700 | -0.97 | 6.7 | 0.25 |
| 13NK161-19 | 182 | 0.02 | 0.001 | 0.282863 | 0.000018 | 0.282860 | 0.283119 | 3.2 | 7.1 | 548 | 665 | 40 | 767 | -0.98 | 6.6 | 0.30 |
| 13NK161-20 | 187 | 0.07 | 0.002 | 0.282861 | 0.000021 | 0.282854 | 0.283116 | 3.2 | 7.0 | 571 | 686 | 41 | 767 | -0.94 | 6.5 | 0.28 |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No. | Age (Ma) | $\frac{176}{177}\text{Yb}$ / $\frac{177}{177}\text{Hf}$ | $\frac{176}{177}\text{Lu}$ / $\frac{177}{177}\text{Hf}$ | $\frac{176}{177}\text{Hf}$ / $\frac{177}{177}\text{Hf}$ | 2σ | $\frac{176}{177}\text{Hf}$ / $\frac{177}{177}\text{Hf}_i$ | $\frac{176}{177}\text{Hf}$ / $\frac{177}{177}\text{Hf}_{(\text{DM})}$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | t_{DM}^{C} (Ma) | $t_{\text{DM}2}$ (Ma) | 2σ | t_{DM}^{C} (Ma) | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | 2SE |
|-----------|----------|---|---|---|-----------|---|---|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|-----|
| 13NK38-01 | 265 | 0.07 | 0.003 | 0.282920 | 0.000025 | 0.282907 | 0.283060 | 5.2 | 10.6 | 491 | 557 | 33 | 584 | -0.92 | | |
| 13NK38-02 | 262 | 0.03 | 0.001 | 0.282910 | 0.000023 | 0.282906 | 0.283062 | 4.9 | 10.5 | 484 | 554 | 33 | 609 | -0.97 | | |
| 13NK38-03 | 261 | 0.02 | 0.001 | 0.282864 | 0.000025 | 0.282861 | 0.283063 | 3.3 | 8.9 | 545 | 636 | 38 | 713 | -0.98 | | |
| 13NK38-04 | 268 | 0.06 | 0.002 | 0.282923 | 0.000027 | 0.282913 | 0.283058 | 5.3 | 10.9 | 480 | 543 | 33 | 575 | -0.94 | | |
| 13NK38-06 | 261 | 0.02 | 0.001 | 0.282916 | 0.000025 | 0.282913 | 0.283063 | 5.1 | 10.7 | 471 | 539 | 32 | 595 | -0.98 | | |
| 13NK38-07 | 265 | 0.03 | 0.001 | 0.282905 | 0.000022 | 0.282899 | 0.283060 | 4.7 | 10.3 | 495 | 566 | 34 | 618 | -0.96 | | |
| 13NK38-08 | 267 | 0.03 | 0.001 | 0.282945 | 0.000023 | 0.282939 | 0.283058 | 6.1 | 11.8 | 437 | 490 | 29 | 526 | -0.97 | | |
| 13NK38-09 | 261 | 0.05 | 0.002 | 0.282954 | 0.000024 | 0.282946 | 0.283063 | 6.4 | 11.9 | 430 | 481 | 29 | 510 | -0.95 | | |
| 13NK38-13 | 265 | 0.03 | 0.001 | 0.282907 | 0.000021 | 0.282902 | 0.283060 | 4.8 | 10.4 | 491 | 562 | 34 | 614 | -0.97 | | |
| 13NK38-14 | 266 | 0.04 | 0.002 | 0.282911 | 0.000025 | 0.282903 | 0.283059 | 4.9 | 10.5 | 491 | 560 | 34 | 605 | -0.95 | | |
| 13NK38-15 | 265 | 0.04 | 0.002 | 0.282877 | 0.000023 | 0.282870 | 0.283060 | 3.7 | 9.3 | 540 | 624 | 37 | 681 | -0.95 | | |
| 13NK38-16 | 265 | 0.04 | 0.001 | 0.282905 | 0.000028 | 0.282898 | 0.283060 | 4.7 | 10.3 | 497 | 569 | 34 | 617 | -0.96 | | |
| 13NK38-18 | 266 | 0.07 | 0.002 | 0.282945 | 0.000027 | 0.282933 | 0.283059 | 6.1 | 11.5 | 453 | 508 | 30 | 527 | -0.93 | | |
| 13NK38-19 | 267 | 0.04 | 0.001 | 0.282918 | 0.000025 | 0.282911 | 0.283058 | 5.1 | 10.8 | 480 | 545 | 33 | 589 | -0.96 | | |
| 13NK38-21 | 266 | 0.04 | 0.001 | 0.282951 | 0.000021 | 0.282945 | 0.283059 | 6.3 | 12.0 | 430 | 481 | 29 | 513 | -0.96 | | |
| 13NK38-22 | 265 | 0.03 | 0.001 | 0.282908 | 0.000022 | 0.282904 | 0.283060 | 4.8 | 10.5 | 486 | 556 | 33 | 611 | -0.97 | | |
| 13NK38-27 | 263 | 0.03 | 0.001 | 0.282929 | 0.000025 | 0.282923 | 0.283061 | 5.5 | 11.1 | 460 | 522 | 31 | 566 | -0.97 | | |

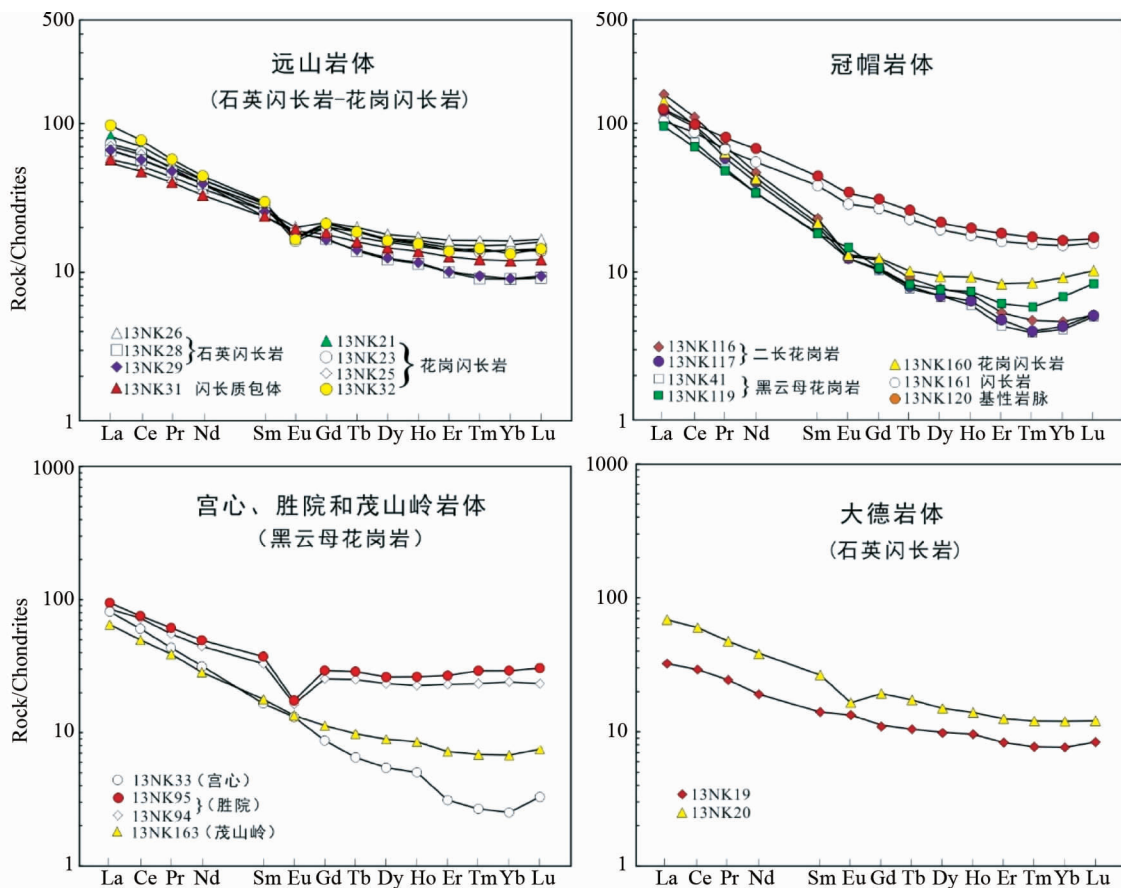


图4 朝鲜半岛半岛图们江褶皱带与冠帽地块显生宙花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

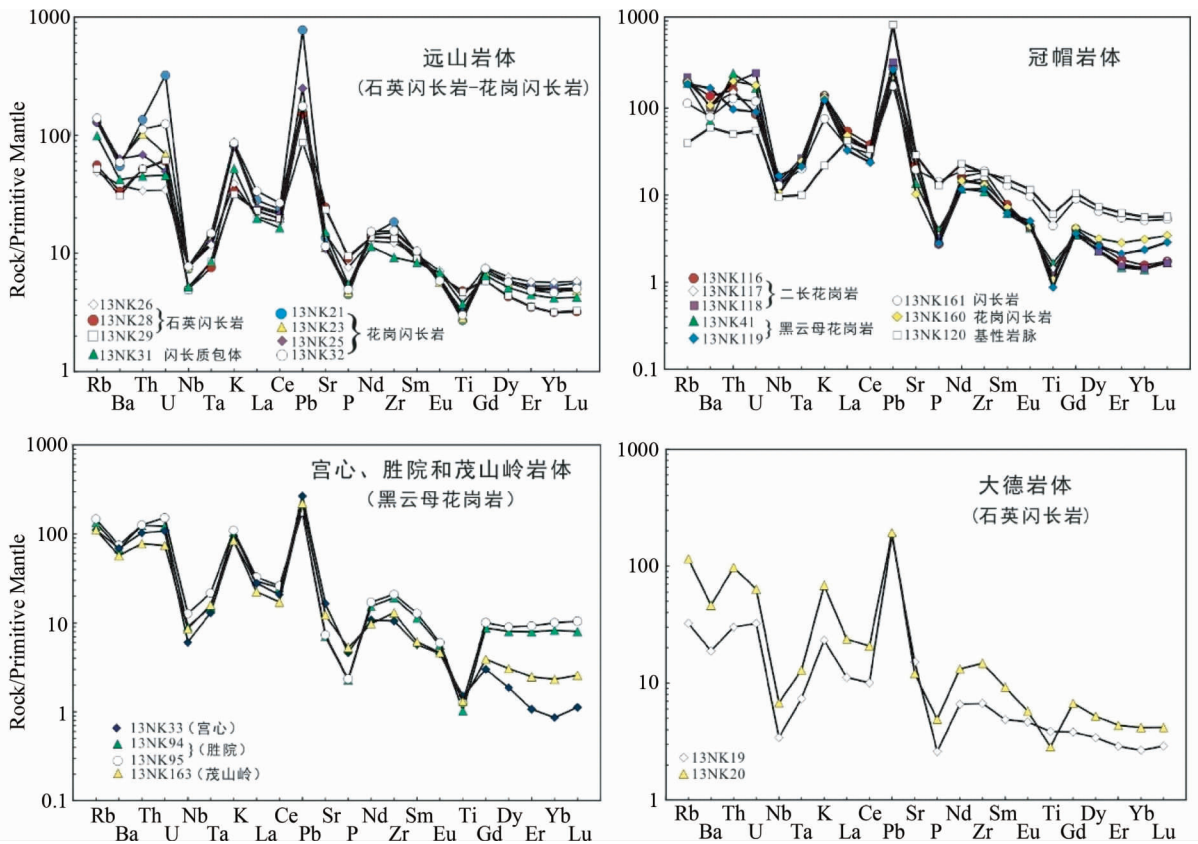


图5 朝鲜图们江褶皱带和冠帽地块中生代花岗岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

龄(t_{DM}^C)为 362 ~ 682Ma, 平均年龄为 552Ma。样品 13NK28 中的岩浆结晶锆石 Hf 同位素变化较小, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282901 ~ 0.283007, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄分别为: 8.7 ~ 12.2、403 ~ 594Ma ($t_{DM2}(\text{Hf})$), 437 ~ 673Ma (t_{DM}^C)。其余 3 颗捕获锆石具有相对低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄分别为: -3.6 ~ 9.5、564 ~ 1273Ma ($t_{DM2}(\text{Hf})$), 622 ~ 1500Ma (t_{DM}^C)。

宫心 (13NK33)、胜院 (13NK94) 和茂山岭 (13NK163) 黑云母花岗岩的锆石具有相似的 Hf-O 同位素特征: Hf 同位素变化较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 集中分布在 0.282843 ~ 0.283035, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) 分别为 6.1 ~ 13.3 和 365 ~ 691Ma; O 同位素组成相对比较均一, $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 6.4‰ ~ 7.4‰。

总之, 上述岩体中的岩浆结晶锆石以具有正且高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) 为特征, 且 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值随着侵位年龄变年轻而呈现出逐渐降低的趋势, 对应的二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) 逐渐增大; O 同位素组成比较均一, $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在 5.8‰ ~ 7.4‰。

5.3.2 冠帽地块中生代花岗岩的 Hf-O 同位素特征

本文对冠帽地块中出露面积最大的冠帽杂岩体及其东

南部的 1 个片麻状花岗岩样品进行了 Hf-O 同位素测试, 测试结果见表 3、图 7。

冠帽中粒二长花岗岩 (13NK116) 和斑状二长花岗岩 (13NK118) 中岩浆结晶锆石的 Hf、O 同位素变化较大, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.282366 ~ 0.282730 和 0.282317 ~ 0.282511, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -9.0 ~ 3.9 和 -10.9 ~ -4.2, Hf 二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) 变化范围分别为 889 ~ 1556Ma 和 1315 ~ 1651Ma, Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM}^C) 的平均值分别为 1511Ma 和 1680Ma; O 同位素组成 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 7.3‰ ~ 9.2‰ 和 7.2‰ ~ 8.2‰。需要指出的是, 岩体中捕获锆石的 Hf-O 同位素特征与岩浆结晶锆石的相同, 可能暗示其来源于相同的源区。黑云母花岗岩 13NK41 和 13NK119 具有截然不同的 Hf 同位素特征, 其中 13NK41 具有高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (0.282802 ~ 0.282921)、正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (4.9 ~ 8.8)、年轻的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) (582 ~ 784Ma) 和 Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM}^C) (773Ma); 而 13NK119 则具有低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (0.282340 ~ 0.282492)、负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-9.7 ~ -4.5)、古老的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{DM2}(\text{Hf})$) (1342 ~ 1614Ma) 和 Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM}^C) (1692Ma)。

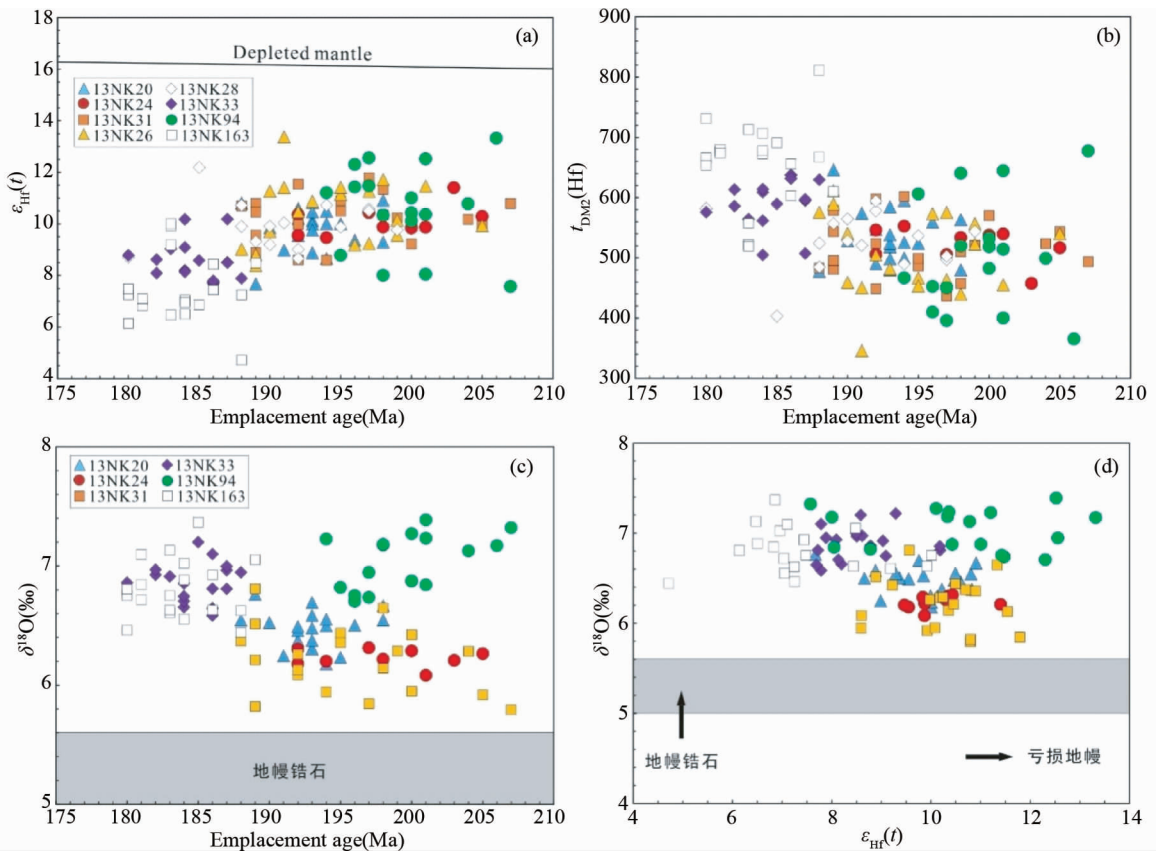


图6 朝鲜半岛图们江褶皱带显生宙花岗岩锆石 Hf-O 同位素特征

Fig.6 Hf-O isotopes of the zircons for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt, Korean Peninsula

13NK41 的 O 同位素组成相对比较均一, $\delta^{18}\text{O}$ 为 5.7‰ ~ 6.3‰, 13NK119 的 O 同位素组成为 $\delta^{18}\text{O}$ = 5.6‰ ~ 7.4‰。花岗闪长岩(13NK160)的岩浆结晶锆石和捕获锆石具有截然不同的 Hf 同位素特征, 其中岩浆结晶锆石的 Hf 同位素组成均一, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282861 ~ 0.282967, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 和 Hf 平均地壳模式年龄 ($t_{\text{DM}^{\text{C}}}^{\text{C}}$) 的平均值分别为 7.2 ~ 10.6、500 ~ 670Ma 和 640Ma, O 同位素组成为 $\delta^{18}\text{O}$ = 5.9‰ ~ 6.9‰; 捕获锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较低且变化较大, 为 0.282565 ~ 0.282807, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 和 Hf 平均地壳模式年龄 ($t_{\text{DM}^{\text{C}}}^{\text{C}}$) 的平均值分别 -2.3 ~ 6.5、763 ~ 1205Ma 和 1155Ma。闪长岩(13NK161)的 Hf 同位素变化较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282837 ~ 0.282937, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 6.2 ~ 9.7, Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 变化范围为 531 ~ 718Ma, Hf 平均地壳模式年龄 ($t_{\text{DM}^{\text{C}}}^{\text{C}}$) 的平均年龄为 773Ma, O 同位素组成相对比较均一, $\delta^{18}\text{O}$ 为 5.9‰ ~ 6.3‰。总的来看, 冠帽杂岩体的 Hf 同位素随侵位年龄呈现出两组截然不同的特征: 晚二叠世黑云母花岗岩和早三叠世二长花岗岩具有低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-10.9 ~ 3.8)、古老的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) (889 ~ 1651Ma); 侏罗纪的闪长岩、花岗闪长岩和黑云母花

岗岩具有正且高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (5.1 ~ 10.6)、年轻的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) (500 ~ 800Ma)。早三叠世花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高且分布较为分散, $\delta^{18}\text{O}$ 为 7.2‰ ~ 9.2‰, 晚二叠世和侏罗纪花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低 (5.6‰ ~ 7.4‰), 且侏罗纪花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布集中, 为 5.9‰ ~ 6.9‰。

片麻状花岗岩(13NK38)的岩浆结晶锆石 Hf 同位素变化范围较小, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ = 0.282864 ~ 0.282954, 所对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄分别为: 8.9 ~ 12.0、481 ~ 636Ma ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) 和 510 ~ 713Ma ($t_{\text{DM}^{\text{C}}}^{\text{C}}$)。捕获锆石的 Hf 同位素变化范围很大, 其中 1 个分析点具有低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-15.7)、古老的模式年龄 $t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$ (1972Ma) 和 $t_{\text{DM}^{\text{C}}}^{\text{C}}$ (2287Ma), 而另外 4 个分析点则具有与岩浆结晶锆石类似的 Hf 同位素组成特征: 正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (10.0 ~ 13.4) 和年轻的模式年龄 $t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$ (415 ~ 592Ma), 暗示其与岩浆锆石具有相同的源区。

将本文获得的 Hf 同位素数据综合在一起, 其柱状频谱图显示图们江褶皱带及冠帽地块显生宙花岗岩的 Hf 同位素随岩体的形成时代显示不同的特征 (图 8): 侏罗纪及部分晚二叠世花岗岩具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (4 ~ 13.5) 和年轻的 Hf 模式年龄 ($t_{\text{DM}2}(\text{Hf})$) < 0.8Ga, 而早三叠世和部分晚二叠世花岗岩具有低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-11 ~ 4) 和古老的 Hf 模式年龄

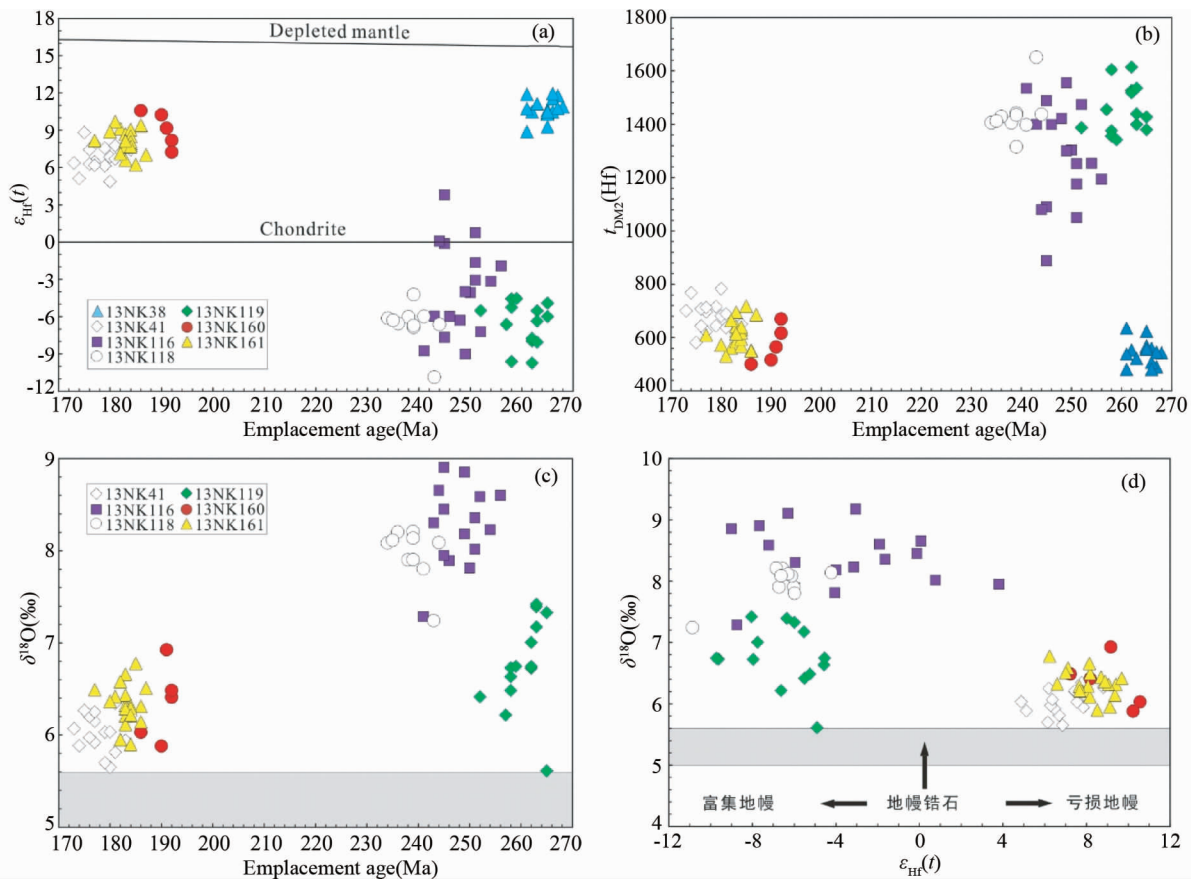


图7 朝鲜半岛冠帽地块显生宙花岗岩锆石 Hf-O 同位素特征

Fig.7 Hf-O isotopes of the zircons for Phanerozoic granites in the Kwanmo Massif, Korean Peninsula

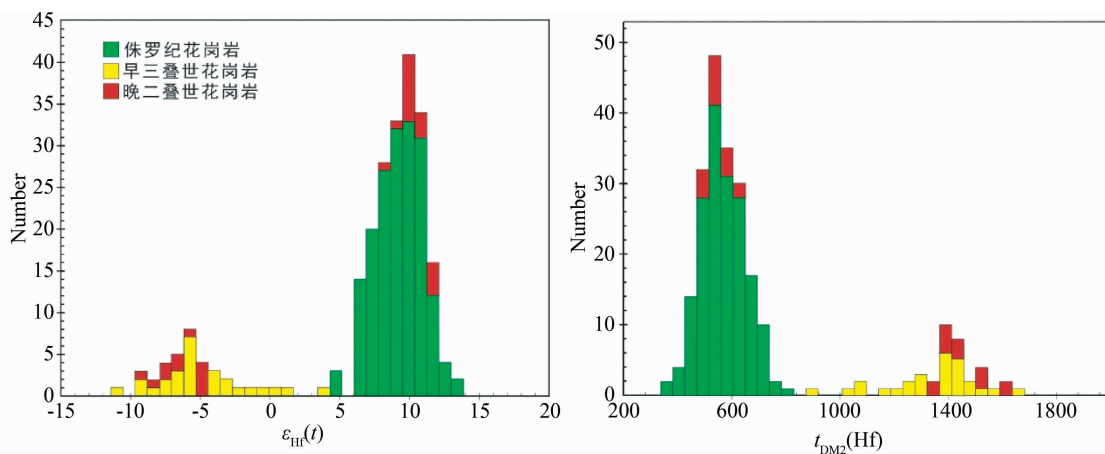


图8 朝鲜半岛图们江褶皱带和冠帽地块显生宙花岗岩锆石 Hf 同位素频谱图

Fig.8 Hf isotopes of the zircons for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

($t_{DM2}(Hf) > 0.9Ga$)。总的来看,本区不同时代花岗岩由老变新(晚二叠世-侏罗纪),明显表现出 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值升高及 Hf 模式年龄变小的趋势,显示花岗岩的时代变新,其源区较老地壳物质逐渐减少,新生地壳物质逐渐增多的特点。

6 讨论

6.1 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩的时代和岩浆形成期次

传统观点认为,朝鲜半岛北部图们江褶皱带出露大面积

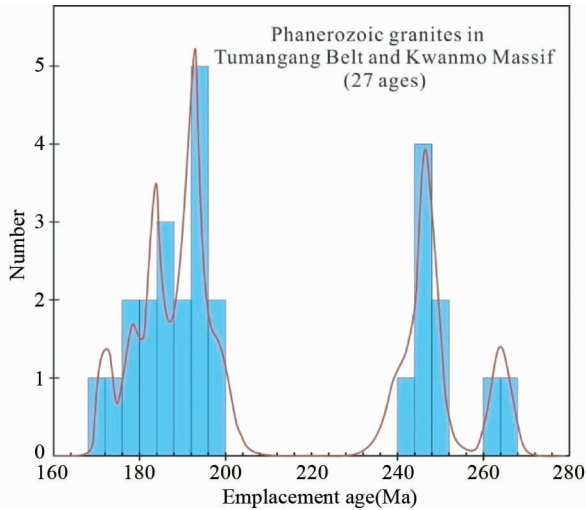


图9 朝鲜半岛图们江褶皱带和冠帽地块显生宙花岗岩年龄频谱图

Fig. 9 Age histogram diagrams for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

的晚古生代(二叠纪)-早中生代(三叠纪)花岗岩,且以二叠纪花岗岩为主体,而其南部的冠帽地块则以发育巨大的三叠纪花岗岩为特征。本文采用锆石原位微区 U-Pb 同位素测年技术,对朝鲜北部 6 个代表性岩体进行测试,获得的最新年代学数据表明,朝鲜半岛北部以中生代侏罗纪花岗岩为主体,古生代花岗岩仅零星出露。结合 Wu *et al.* (2007b) 发表的朝鲜北部花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及已获得的冠帽杂岩体西延至我国境内的百里坪岩体的侵位年龄(张艳斌等, 2004),我们获得朝鲜半岛北部花岗岩年龄频谱图(图 9)。图表显示,朝鲜北部地区花岗质岩浆活动明显分为 3 期:晚古生代二叠纪(265 ~ 263Ma),形成片麻状花岗岩及冠帽复式岩体的早期黑云母花岗岩;早中生代三叠纪(248 ~ 240Ma),形成冠帽杂岩体的主体岩性二长花岗岩;侏罗纪

(199 ~ 173Ma),形成大面积分布的黑云母花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等,代表性岩体为大德岩体、远山岩体和宫心岩体等。

6.2 岩浆源区及岩石成因

朝鲜北部冠帽地块及图们江造山带花岗岩具有 I 型花岗岩的物质成分特点,其主要矿物组合和副矿物组合分别为:钾长石 + 斜长石 + 石英 + 角闪石 + 黑云母,磁铁矿-磷灰石-锆石-榍石,且部分岩体内发育细粒闪长质包体。同时,岩石的地球化学特征也显示出相同的结论:岩石的铝指数(A/CNK) < 1.1,显示非 S 型花岗岩的特征,表明它们属于 I 型或 A 型花岗岩;P₂O₅ 的含量随着 SiO₂ 的升高而逐渐降低及 Pb 含量随着 SiO₂ 的升高而逐渐升高的特征(图略),也显示 I 型花岗岩的特征。岩石具有较低的 Zr、Nb、Y、La、Ce 等微量元素,其 Zr + Nb + Y + Ce (< 350 × 10⁻⁶) 和 10000 × Ga/Al (< 2.7) 较低,岩石成分点落在花岗岩区,仅个别样品具有较高的 FeO^T/MgO,岩石成分点落在分异型花岗岩区(图 10)。

图们江褶皱带中的花岗岩主要形成于侏罗纪,多为面积较大的花岗岩岩基,如远山岩体、宫心岩体、茅山岭岩体等。这些侏罗纪花岗岩都具有极为相似的 Hf-O 同位素特征:较高的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值和正的 ε_{Hf}(t) 值,且 ε_{Hf}(t) 值集中分布在 6 ~ 13 之间,反映了亏损的源区性质。其中远山石英闪长岩和胜院黑云母花岗岩的 ε_{Hf}(t) 值最高可达 13.3 ~ 13.5,与同时期亏损地幔的 ε_{Hf}(t) 接近,进一步表明亏损地幔参与了花岗岩成岩作用。O 同位素组成 δ¹⁸O 分布在 5.8‰ ~ 7.4‰,表明源区物质未经历过地表过程。结合上述岩体中锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄(346 ~ 812Ma),显示上述侏罗纪花岗岩的源区物质主要是新元古代-晚古生代期间从亏损地幔中增生的地壳物质。

冠帽地块中的花岗质岩浆活动频繁,包括晚二叠世、早三叠世和侏罗纪三期。其中早三叠世岩浆活动强烈,形成了大面积展布的二长花岗岩,构成了冠帽杂岩体的主体。上述

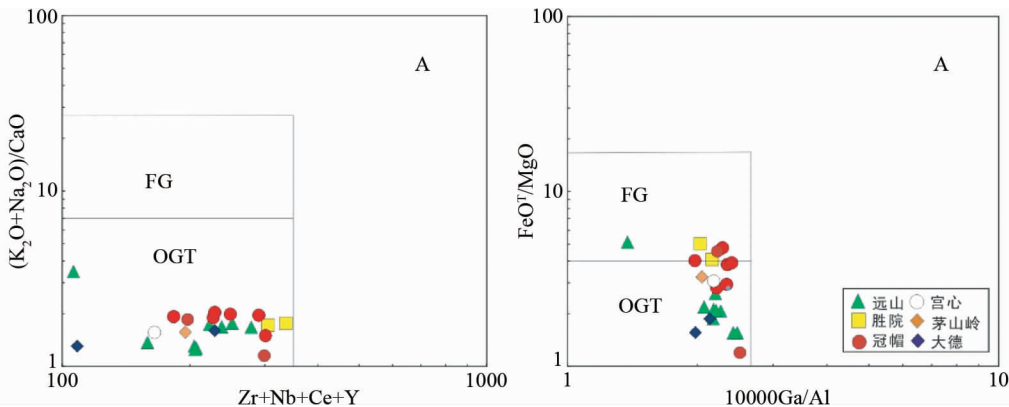


图 10 朝鲜半岛图们江褶皱带和冠帽地块显生宙花岗岩亚类判别图解

Fig. 10 Discrimination diagrams of sub categories of granite for Phanerozoic granites in the Tumangang Belt and Kwanmo Massif, Korean Peninsula

花岗岩呈现出两类不同的 Hf-O 同位素特征: 一类以晚二叠世片麻状花岗岩和侏罗纪花岗岩为代表, 具有正且高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (4.8 ~ 10.6)、年轻的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$) (500 ~ 800Ma), $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 为 5.6‰ ~ 7.4‰; 另一类以晚二叠世黑云母花岗岩和早三叠世二长花岗岩为代表, 具有低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-10.9 ~ 3.9)、古老的 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$) (889 ~ 1651Ma), $\delta^{18}\text{O}$ 值分布较为分散, 为 5.6‰ ~ 9.2‰。上述不同的 Hf-O 同位素特征, 反映其来自于不同的岩浆源区。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关图解及 Hf 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$) 指示, 晚二叠世片麻状花岗岩和侏罗纪花岗岩的源区物质为新元古代-晚古生代期间从亏损地幔中增生的地壳物质。晚二叠世黑云母花岗岩和早三叠世二长花岗岩以负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为主体, Hf 平均地壳模式年龄 (t_{DM}^{C}) 的平均值为 1511 ~ 1692Ma, 明显老于华北克拉通北部太古代花岗岩中锆石的 Hf 平均地壳模式年龄 (>1500Ma) (杨进辉等, 2006), 同时, 部分样品具有高的 $\delta^{18}\text{O}$ (7.2‰ ~ 9.2‰), 表明花岗岩的源岩物质是早前寒武纪地壳物质。另外, 部分锆石颗粒具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的 Hf 二阶段模式年龄, 暗示年轻的地壳物质也参与了岩体的形成过程。目前, 对零星分布在冠帽地块中的前寒武纪变质建造的最新研究表明 (张晓晖等, 2016b), 清津地区银德洞变质深成侵入杂岩形成于 2.54 ~ 2.52Ga, 从而明确冠帽地块局部存在老的地壳物质。因此, 我们推测上述花岗岩的源区物质主要来自古老地壳物质, 也有少量年轻地壳物质的贡献。

综上所述, 朝鲜半岛图们江褶皱带中的侏罗纪花岗岩、冠帽地块中晚二叠世片麻状花岗岩和侏罗纪花岗岩来自于新元古代-晚古生代期间从亏损地幔中增生的地壳物质的熔融, 而冠帽地块中晚二叠世和早三叠世花岗岩的源区物质主要为古老地壳物质, 也有少量年轻地壳物质的贡献。

6.3 朝鲜半岛北部花岗岩与吉黑造山带东部花岗岩

朝鲜半岛北部以发育大面积的显生宙花岗岩为特征, 与之相连的我国吉黑造山带也以花岗岩海著称。其中, 朝鲜半岛北部面积最大的冠帽杂岩体与我国和龙地区的百里坪花岗岩体相连, 组成了面积达 4800km² 的大岩基。研究表明, 两者具有相同的岩浆活动期次及相同的岩石组合 (张艳斌等, 2004); 晚二叠世开始最早一期岩浆活动, 之后在早三叠世形成岩体的主体, 后期又叠加有侏罗纪岩浆活动。因此, 它们属于同一岩体, 仅因为国界线被划分为两个岩体。

朝鲜半岛北部花岗岩与我国吉黑地区花岗岩在形成时代、岩石学、地球化学特征上有很大的相似性, 可以进行对比, 具体表现为:

(1) 岩体的形成时代: 本文的年代学数据表明, 朝鲜半岛北部以中生代侏罗纪花岗岩为主体, 还有少量的晚二叠世和早三叠世花岗岩。同样的, 吉黑东部地区花岗岩以中生代的晚三叠世和侏罗纪花岗岩为主体, 仅在华北地台北缘出露少量晚古生代花岗岩 (张艳斌, 2007)。因此, 朝鲜半岛北部与

我国吉黑地区的花岗质岩浆活动期次基本一致;

(2) 岩石学及地球化学特征: 朝鲜半岛北部及吉黑地区花岗岩都具有 I 型花岗岩的岩石组合特征及地球化学特征, 岩石属于钙-碱性系列和高钾钙碱性系列, 成因类型主要为 I 型。花岗岩的 Hf 同位素也显示相似的特征, 大部分岩体具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的二阶段 Hf 模式年龄, 仅少数分布在华北地台北缘的花岗岩具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较老的 Hf 模式年龄;

(3) 相似的源区: Hf 同位素特征表明, 朝鲜半岛北部与吉黑地区花岗岩具有相似的源区, 其正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的模式年龄, 表明岩浆源区是年轻的地壳物质, 且 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值很高, 接近于同时期亏损地幔的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 说明它们的源区是来自软流圈地幔的年轻地壳, 且软流圈地幔属于亏损型地幔。少数岩体具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较老的 Hf 模式年龄, 表明来源于古老地壳物质的重熔。

6.4 图们江褶皱带、冠帽地块与吉黑造山带

目前, 对朝鲜半岛北部图们江褶皱带和冠帽地块的构造属性还存在激烈的争论。对于图们江褶皱带, 大部分学者认为它是蒙古-鄂霍茨克褶皱带 (实际为中亚造山带) 的组成部分 (Paek *et al.*, 1996; 金炳成, 2012; 张晓晖等, 2016a), 还有部分学者认为它是复合构造地体, 称为咸北地块, 并将其与我国的佳木斯地块相对应 (梁道俊等, 2009)。对于冠帽地块, 部分学者认为它是太古代地层沉积之后从狼林地块分离出的块体 (Pak, 1955), 还有部分学者认为它与鞍山-吉南太古宙地体 (又称龙岗地块) 相对应, 其北缘的输城川断裂是造山带与中朝克拉通的边界断裂 (金炳成, 2012)。另外, 还有部分学者认为图们江褶皱带和冠帽地块同属蒙古-鄂霍茨克褶皱带, 并将其称为冠帽隆起与图们江沉降带 (Kim, 1986; Paek *et al.*, 1996)。

目前的研究资料表明, 冠帽地块与图们江褶皱带具有很多的相似性: (1) 具有相同的前寒武纪变质基底: 茂山群及相关的变质侵入杂岩, 且变质基底呈构造块体或包体产于显生宙花岗岩之中; (2) 具有相同的古生代沉积建造: 豆满群; (3) 显生宙花岗岩广泛发育, 出露面积达出露地质体的 70% 以上。上述特征表明, 冠帽地块和图们江褶皱带具有相同的地质演化历史, 应该归属于同一个整体。

关于部分学者提出的图们江褶皱带对应于佳木斯地块, 可归结为茂山群与麻山群、清津杂岩与黑龙江群的对比。图们江褶皱带中的茂山群是一套经历低角闪岩相-角闪岩相变质作用的火山沉积建造, 岩石组合主要包括条带状铁建造、石墨片岩、长英质片麻岩和斜长角闪岩。最新获得的锆石 U-Pb 年龄 2.3 ~ 2.1Ga 表明其形成时代为新太古-古元古代 (Kim *et al.*, 2006)。而佳木斯地体中的麻山群为一套含有少量紫苏辉石, 变质程度达高角闪岩相到麻粒岩相的变质岩系, 包括麻粒岩、变粒岩、片麻岩和大理岩, 具有孔兹岩系的特点。早期认为麻山群属于太古代 (黑龙江省地质矿产局,

1993),但越来越多的年代学证据表明(Wu *et al.*, 2000; Wilde *et al.*, 2000, 2003; 宋彪等, 1997), 麻山群的沉积时代应为中元古代,其麻粒岩相变质作用发生在 500Ma 左右。由此表明, 茂山群与麻山群在形成时代、岩石组合及变质程度上都存在差异, 两者不能进行对比。沿图们江褶皱带南缘输城川断裂带分布的清津超基性-基性混杂岩体, 主要组成为蛇纹岩、橄榄岩和辉石岩等, 与枕状拉斑玄武岩、细碧岩及硅质岩、杂色泥岩等密切伴生, 一直被认为是蛇绿岩(Kim *et al.*, 2004)。最新的研究显示, 岩石具有堆积岩特征, 纯橄岩中的橄榄石 Fo 指数达到 92.3 ~ 96.6, 单斜辉石为富 Ca 贫 Ti 的透辉石等, 表明岩体为阿拉斯加型基性-超基性杂岩, 并不是早期所认为的蛇绿岩。锆石 U-Pb 年龄表明岩体的侵入时代为三叠纪-早中侏罗世(250 ~ 172Ma)(张晓晖, 未发表)。黑龙江群是位于佳木斯地块牡丹江一带以蓝片岩(包括变质较浅的玄武岩类)、大理岩、超镁铁岩等为主的一套岩石组合, 是一套蛇绿混杂岩, 代表了东侧佳木斯与西侧松嫩地块间的拼合(Yan *et al.*, 1989; 张贻侠等, 1998)。获得的黑龙江群云母片岩中白云母 Ar-Ar 年龄 175 ~ 195Ma 代表了蓝片岩相变质作用的时期, 从而表明黑龙江群是中生代早侏罗世形成的蛇绿混杂岩(Wu *et al.*, 2000)。因此, 清津杂岩与黑龙江群具有不同的岩石组合和地球化学特征, 不能进行对比。以上论述表明, 图们江褶皱带不能对应于其北部的佳木斯地块。

冠帽地块与龙岗地块的对比, 两者最显著的区别是龙岗地块发育大面积的太古宙岩石, 如, 在鞍山-本溪地区 3.1 ~ 3.3Ga 的古侵入体及 2.5Ga 的花岗岩(Liu *et al.*, 1992; Wu *et al.*, 2008), 辽宁北部的抚顺-清原地区发育大面积 2.5Ga TTG 杂岩(万渝生等, 2005; Miao *et al.*, 2005; Grant *et al.*, 2009; 白翔等, 2014; Peng *et al.*, 2015)等。而冠帽地块仅零星出露新太古-古元古代的茂山群, 目前仅在清津地区发现 3 个 2.5Ga 的深成侵入岩。因此, 冠帽地块与龙岗地块具有完全不同的地质演化历史。

上面的论述表明, 朝鲜北部的冠帽地块、图们江褶皱带不能与北面的佳木斯地块相对比, 也不能与西面的龙岗地块相对应。而在上一节的讨论可知, 冠帽地块、图们江褶皱带的花岗岩与吉黑东部地区的花岗岩在形成时代、岩石成因等具有相似性, 可进行对比。而且, 区域对比研究表明, 它们在变质基底、沉积地层等方面也具有很大的相似性。从基底岩石特征来看, 吉黑地区与朝鲜半岛北部地区均以新太古代及新元古代变质岩为基底, 且都呈残块状出露在大面积的花岗岩海中。在吉黑东部的富尔河断裂带及古洞河断裂带附近出露色洛河群, 由晚太古代片麻岩、晚二叠世变质火山-沉积建造和片麻状花岗岩组成(李承东等, 2007a, b; Zhang *et al.*, 2008); 在朝鲜咸北地区输城川断裂带西南边出露茂山群和相关变质侵入杂岩, SIMS 锆石 U-Pb 同位素年龄指示变质杂岩形成于 2.54 ~ 2.52Ga, (张晓晖等, 2016b)。从沉积建造来看, 吉林东部延边地区与朝鲜咸北地区缺失中志留世至早

石炭世地层, 仅发育石炭系上统及二叠系地层。且朝鲜北部晚古生代鸡笼山腕足动物群与吉林东部, 特别延边地区晚古生代腕足动物群有可比性。由此表明, 在早-中二叠世时期吉黑东部地区与朝鲜东部地区属于同一沉积盆地。综合对比朝鲜东北部地区与中国吉黑地区基底特征、古生界沉积岩石组合和分布、化石组合特征、岩浆岩活动序列等, 朝鲜北部冠帽地块、图们江褶皱带与吉黑东部的吉黑造山带相对应, 同属中亚造山带。同时, 将冠帽地块与图们江褶皱带分隔开来的输城川断裂带也不是造山带与古老克拉通的分界, 且与其相连的富尔河-古洞河断裂带已被证实为不是华北地台与兴蒙造山带的边界断裂(张艳斌等, 2004), 因此, 富尔河-古洞河-输城川断裂带为一巨型逆冲推覆断裂带, 而真正的边界推测位于长白山火山以东或其附近, 向东延伸至白头山断裂带。

6.5 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩的形成背景

朝鲜半岛北部地区与我国吉黑地区共同位于“古亚洲洋构造体制”与“滨太平洋构造体制”叠加转换的区域, 地质演化历史极为复杂。由于对古亚洲洋构造域与环太平洋构造域的转换时间还存在争论(任纪舜等, 1990; 赵越等, 1994; 邵济安等, 1997; 汪新文, 1997; 和政军等, 1998; 李锦轶, 1998; Zhou *et al.*, 2010a, b), 对蒙古-鄂霍兹克海的演化还存在分歧(Cogné *et al.*, 2005; Gordienko, 1994; Kravchinsky *et al.*, 2002; Zonenshain *et al.*, 1990; Zorin *et al.*, 1995, 1998; Zorin, 1999), 因此难以明确晚古生代-中生代花岗岩形成的构造背景。

Wu *et al.* (2007a) 获得了佳木斯板块中蛇绿混杂岩(黑龙江群)的蓝片岩相变质作用时代为 175 ~ 195Ma, 从而表明佳木斯属于环太平洋带的增生地体, 由此推断古太平洋构造域至少在早侏罗世就已开始。因此, 朝鲜半岛北部与吉黑东部地区二叠纪-早三叠世花岗岩应形成于古亚洲洋构造体制下, 侏罗纪花岗岩则形成于环太平洋构造域演化阶段。

目前的研究表明, 在华北地台北缘存在古生代花岗岩带, 其东西向延伸达 2000km 以上, 呈现出板块俯冲形成的火成岩呈平行海沟带状展布的特点。朝鲜北部晚二叠-早三叠世花岗岩是该花岗岩带的东延。众多的研究表明, 西伯利亚板块与华北板块在晚古生代中石炭世(或泥盆纪)-早二叠世沿着艾比湖-伊林哈别尔-康古尔塔格-索伦山-西拉木伦河-长春-敦化-延吉一线, 由西向东逐渐碰撞拼合, 在兴蒙造山带东段于早二叠世末期对接完毕(任纪舜等, 1980; 王荃等, 1991; 邵济安等, 1991; 王东方等, 1992; 程裕淇, 1994)。对吉黑东部岩石建造的研究(Wu *et al.*, 2007a; 吴福元等, 2003), 如呼兰群变质作用峰期时间为晚二叠世(~250Ma), 具有顺时针演化的 PTt 轨迹特征, 代表挤压碰撞造山作用, 是两大板块碰撞拼合作用的产物; 区内所谓的晚古生代地层实际上是混杂岩中的岩块, 混杂作用的形成时代应在晚古生代末期, 并可能持续到早三叠世; 在华北地台北缘, 沿富尔河断裂

分布的色洛河群是主要由古生代和中生代火成岩组成的构造杂岩。其中的高镁安山岩侵入于晚古生代, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 252 ± 5 Ma, 其地球化学特征表明该岩石属于赞岐岩类, 其成因与板块消减作用有关, 表明华北地台北缘在晚古生代活动大陆边缘环境(李承东等, 2007b)。以上研究成果支持华北地台北缘是古亚洲洋最后闭合的地点所在, 其时代应在晚古生代末期-三叠纪早期。因此, 朝鲜半岛北部二叠纪-早三叠世花岗岩形成于古亚洲洋的俯冲闭合阶段, 由于两大板块的碰撞拼合, 在华北地台北缘形成以似斑状二长花岗岩和花岗闪长岩为主体岩性的花岗岩体。

朝鲜半岛北部地区侏罗纪花岗岩比较发育, 主体岩性为花岗闪长岩和二长花岗岩。目前的研究发现, 在我国的张广才岭、大兴安岭、燕辽、辽东-胶东、辽西地区、华南地区及朝鲜半岛南部的京畿地块、岭南地块及沃川带广泛分布有同时期的花岗岩(Wu *et al.*, 2000, 2004, 2005a, b; Zhang *et al.*, 2004; 杨进辉等, 2004; 葛文春等, 2005; 孙德有等, 2005; 孙涛, 2006; 隋振民等, 2007; Li *et al.*, 2007; 徐美君等, 2013; Zhai *et al.*, 2016), 表明此期花岗质岩浆活动在我国东北地区及朝鲜半岛广泛发育。侏罗纪花岗岩的岩石组合特征及地球化学特征表明, 该期花岗岩形成于统一的构造环境中, 且其成因类型全部为 I 型, 暗示其形成于挤压构造体制下。因此我们认为研究区侏罗纪花岗岩形成于太平洋板块俯冲的挤压体制下。

7 结论

本文通过对朝鲜半岛北部冠帽地块及图们江褶皱带显生宙花岗岩岩石学、年代学和地球化学的详细研究, 对该区花岗岩的形成时代、岩浆起源和演化、构造环境及其与大陆地壳生长关系等问题取得了如下新认识:

(1) 朝鲜半岛北部冠帽地块及图们江褶皱带花岗岩主要形成于中生代的侏罗纪, 而不是以前所认为的古生代。根据本文建立的花岗岩年代学格架, 可以将该区花岗质岩浆活动划分为三个阶段: 晚二叠世(265 ~ 263 Ma)、早三叠世(248 ~ 240 Ma) 和侏罗纪(199 ~ 173 Ma);

(2) 朝鲜半岛北部花岗岩以钙-碱性岩石系列为主, 其成因类型主要为 I 型, 极少数为高分异 I 型;

(3) 朝鲜半岛北部侏罗纪花岗岩的 Hf 同位素具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的 Hf 模式年龄, 而晚二叠世和早三叠世花岗岩通常具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和古老的模式年龄, 仅部分晚二叠世花岗岩显示出与侏罗纪花岗岩相同的 Hf 同位素特征;

(4) 花岗岩的 Hf-O 同位素特征表明, 朝鲜半岛图们江褶皱带中的侏罗纪花岗岩、冠帽地块中晚二叠世片麻状花岗岩和侏罗纪花岗岩来自于新元古代-晚古生代期间从亏损地幔中增生的地壳物质的熔融, 而冠帽地块中晚二叠世和早三叠世花岗岩主要来自于古老地壳物质的重熔;

(5) 在详细分析区域构造演化的基础上, 通过岩石组合

和地球化学研究, 我们认为朝鲜北部晚二叠世和早三叠世花岗岩形成于古亚洲洋闭合阶段, 由于西伯利亚板块与华北板块的碰撞拼合, 在华北地台北缘形成了同碰撞型花岗岩。侏罗纪中国东北及朝鲜开始进入环太平洋构造域演化阶段, 在太平洋板块俯冲的挤压体制下形成大面积的侏罗纪花岗岩。

致谢 感谢翟明国院士、侯泉林教授、李秋立研究员、彭澎研究员、张晓晖研究员在论文写作过程中给与的帮助。感谢中国科学院地质与地球物理研究所 SIMS 实验室刘宇、唐国强和凌潇潇在分析测试过程中提供的帮助。感谢刘富博士协助完成野外地质工作。感谢评审专家提供的深入而全面的评审意见, 使得本文更加完善。

References

- 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)
- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Davis DW, Aleinikoff JN, Valley JW, Mundil R, Campbell IH, Korsch RJ, Williams IS and Foudoulis C. 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205(1–2): 115–140
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. *Regional Geology of Heilongjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–734 (in Chinese)
- Cao L and Zhu D. 1999. The comparison and evolutionary phases of the Early Precambrian metamorphic rock system in eastern China-Korea palaeocontinent. *World Geology*, 18(2): 36–46 (in Chinese with English abstract)
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1–2): 1–26
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551
- Chen YQ. 1994. *Regional Geology of China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Cogné JP, Kravchinsky VA, Halim N and Hankard F. 2005. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia). *Geophysical Journal International*, 163(2): 813–832
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Rahman AAA. 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2097–2105
- Geological Institute, Academy of Sciences DPRK. 1993 (GIASDPRK). *Geological Map of Korea, Scale 1:1000000*. Pyongyang: Foreign Language Books Publishing House
- Gordienko IV. 1994. Paleozoic geodynamic evolution of the Mongol-Okhotsk fold belt. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 429–433
- Grant ML, Wilde SA, Wu FY and Yang JH. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. *Chemical Geology*, 261(1–2): 155–171
- He ZJ, Li JY, Niu BG and Ren JS. 1998. A Late Jurassic intense

- thrusting-uplifting event in the Yanshan-Yinshan area, northern China, and its sedimentary response. *Geological Review*, 44(4): 408–418 (in Chinese with English abstract)
- Kim BS. 2012. Characteristics of Paleozoic sedimentary from East China-Korean Peninsula and its tectonic evolution. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1–124 (in Chinese with English summary)
- Kim BS, Liu YJ, Han GQ and Jin CY. 2012. Late Paleozoic sedimentary characteristics in Yanji-Jilin-Hambuk area, Korea and its significance to tectonic evolution. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (Suppl. 1): 296–305 (in Chinese with English abstract)
- Kim JN *et al.* 2004. *Geology of Tumangang Orogeny*. Pyongyang: Kim II Sung University Press, 5–55 (in Korean)
- Kim JN, Baek LJ, Han RH *et al.* 2006. *Precambrian Geology*. Pyongyang: Kim II Sung University Press, 10–13 (in Korean)
- Kim JR. 1986. *Development of the Geological Structure in Korea*. Pyongyang: Publishing House of the Kim Chaek University Technology
- Kravchinsky VA, Cogné JP, Harbert WP and Kuzmin MI. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34–57
- Li CD, Zhang FQ, Miao LC, Xie HQ, Hua YQ and Xu YW. 2007a. Reconsideration of the Seluohe Group in Seluohe area, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(5): 841–847 (in Chinese with English abstract)
- Li CD, Zhang FQ, Miao LC, Xie HQ and Xu YW. 2007b. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Permian high-Mg andesites in Seluohe area, Jilin province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 767–776 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
- Li XH, Li XW, Wang XC, Li QL, Liu Y and Tang GQ. 2009. Role of mantle-derived magma in genesis of Early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China; In situ zircon Hf-O isotopic constraints. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1262–1278
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- Lyang TJ, Liu YJ, Li JJ, Bai JZ and Liu CX. 2009. Structural framework of Korean Peninsula in Middle Paleozoic-Early Mesozoic. *Global Geology*, 28(2): 157–165 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1. 02: A user manual*. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2:19
- Miao LC, Qiu YM, Fan WM, Zhang FQ and Zhai MG. 2005. Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jiapigou gold deposits, southern Jilin Province, China. *Ore Geology Reviews*, 26(1–2): 137–165
- Paek RJ, Kang HG and Jon GP. 1996. *Geology of Korea*. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1–631
- Pak Song UK. 1955. Stratigraphic outline of Korea. *Bulletin of the Academy of Science*, 4
- 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 Neoproterozoic arc. *Tectonophysics*, 662: 7–21
- Ren JS, Jiang CF, Zhang ZK and Qin DY. 1980. *The Geotectonic Evolution of China*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Ren JS, Chen TY, Niu BG, Liu ZG and Liu FR. 1990. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 1–217 (in Chinese)
- Ro SW and Pak SU. 1987. *Geology of Korea*. Pyongyang: Science Press (in Korean)
- Shao JA, Tang KD, Wang CY, Zang QJ and Zhang YP. 1991. The tectonic characteristics and evolution of Nadanhada Terrane. *Science in China (Series B)*, (7): 744–751 (in Chinese)
- Shao JA, Mou BL, He GQ and Zhang LQ. 1997. The geological process of the northern region of north China in the tectonic overprinting process of Palaeoasia and Pacific regimes. *Science in China (D)*, 27(5): 390–394 (in Chinese)
- Song B, Li JY, Niu BG and Xu WX. 1997. Single-grain zircon ages and its implications in biotite-plagioclase gneiss in Mashan Group in the eastern Heilongjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 306–312 (in Chinese with English abstract)
- Sui ZM, Ge WC, Wu FY, Zhang JH, Xu XC and Cheng RY. 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461–480 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Gao S and Lu XP. 2005. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin-Heilongjiang area, China. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263–275 (in Chinese with English abstract)
- Sun T. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332–335 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Yang C and Liu DY. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78–87 (in Chinese with English abstract)
- Wang DF, Chen CY, Yang S *et al.* 1992. *The Continental Geology in Northern Margin of Sino-Korean Platform*. Beijing: Seismological Publishing House, 1–105 (in Chinese)
- Wang LL. 2010. Tectonic framework and distribution of mineral resources in the Liaodong-Jilin-North Korea Paleoproterozoic fold belt. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Wang Q, Liu XY and Li JY. 1991. *Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China*. Beijing: Peking University Press (in Chinese)
- Wang XW. 1997. Meso-cenozoic tectonic event and evolution of northeastern Asia continental margin. *Geological Science and Technology Information*, 16(4): 9–15 (in Chinese with English abstract)
- Whitehouse MJ, Claesson S, Sunde T and Vestin J. 1997. Ion microprobe U-Pb zircon geochronology and correlation of Archaean gneisses from the Lewisian Complex of Gruinard Bay, northwestern Scotland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(20): 4429–4438
- 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
- Wiedenbeck M, Hanchar JM, Peck WH, Sylvester P, Valley J, Whitehouse M, Kronz A, Morishita Y, Nasdala L, Fiebig J, Franchi I, Girard JP, Greenwood RC, Hinton R, Kita N, Mason PRD, Norman M, Ogasawara M, Piccoli PM, Rhede D, Satoh H, Schulz-Dobrick B, Skår O, Spicuzza MJ, Terada K, Tindle A, Togashi S, Vennemann T, Xie Q and Zheng YF. 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9–39
- Wilde SA, Zhang XZ and Wu FY. 2000. Extension of a newly identified 500Ma metamorphic terrane in Northeast China; Further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 115–130

- Wilde SA, Wu FY and Zhang XZ. 2003. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi Massif. *Precambrian Research*, 122(1-4): 311-327
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1-2): 89-113
- Wu FY, Zhang XZ, Ma ZH and Sun DY. 2003. Piemontite-bearing chert in central Jilin: Characterizations and implications. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 391-396 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Jahn BM and Wilde S. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 731-744
- Wu FY, Yang JH, Wilde SA and Zhang XO. 2005. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chemical Geology*, 221(1-2): 127-156
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Yang JH, Lo CH, Wilde SA, Sun DY and Jahn BM. 2007a. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16(1): 156-172
- Wu FY, Han RH, Yang JH, Wilde SA, Zhai MG and Park SC. 2007b. 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
- Xu MJ, Xu WL, Wang F, Gao FH and Yu JJ. 2013. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354-368 (in Chinese with English abstract)
- Yan ZY, Tang KD, Bai JW and Mo YC. 1989. High pressure metamorphic rocks and their tectonic environment in northeastern China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3(1-4): 303-313
- Yang JH, Wu FY, Lo CH, Chung SL, Zhang YB and Wilde SA. 2004. Deformation age of Jurassic granites in the Dandong area, eastern China: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1205-1214 (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, 99-125
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Xie LW and Liu XM. 2006. In-situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou formations in the Zhang-Xuan area, Northeast China. *Earth Science*, 31(1): 71-80 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Zhang YB, Zhang XH, Wu FY, Peng P, Li QL, Hou QL, Li TS and Zhao L. 2016. Renewed profile of the Mesozoic magmatism in Korean Peninsula: Regional correlation and broader implication for cratonic destruction in the North China Craton. *Science China (Earth Science)*, 59(1): 1-34
- Zhang XH, Zhang YB, Yuan LL, Park HU, Yang JH and Kim JN. 2016a. Late Permian mafic volcanic rocks in the Hambuk massif, Korean Peninsula: Geochemistry, origin and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3070-3082 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Wang HZ, Park HU, Yang JH and Kim JN. 2016b. Basement affinity of the Kwanmo Massif, Korean Peninsula: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Undokdong meta-intrusive complex. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 2965-2980 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YB, Wu FY, Wilde SA, Zhai MG, Lu XP and Sun DY. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, Northeast China. *Island Arc*, 13(4): 484-505
- Zhang YB, Wu FY, Zhai MG and Lu XP. 2005. Tectonic setting of the Helong Block: Implications for the northern boundary of the eastern North China Craton. *Science in China (Series D)*, 48(10): 1599-1612
- Zhang YB. 2007. Petrogenesis of the granites and Phanerozoic crustal growth in eastern part of Jilin-Heilongjiang provinces. Post-Doctor Research Report. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- Zhang YB, Wu FY, Wilde SA, Zhai MG, Lu XP and Zhang HF. 2008. Geochronology and tectonic implications of the "Proterozoic" Seluohé Group at the northern margin of the North China Craton. *International Geology Review*, 50(2): 135-153
- Zhang YX, Sun YS, Zhang XZ and Yang BJ. 1998. The Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect of China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese) Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleothethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105-119 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleothethyan system to Paleopacific active continental margin in Eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105-119 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JB, Wilde SA, Zhang XZ, Zhao GC, Zheng CQ, Wang YG and Zhang XH. 2010a. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3-4): 230-246
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zhang XZ, Zheng CQ and Wang H. 2010b. New SHRIMP U-Pb zircon ages from the Heilongjiang high-pressure belt: Constraints on the Mesozoic evolution of NE China. *American Journal of Science*, 310(9): 1024-1053
- Zonenshain LP, Kuzmin MI, Natapov LM and Page BM. 1990. *Geology of the USSR: A Plate-tectonic Synthesis*. Washington DC: American Geophysical Union, *Geodynamics Series*, 21: 1-242
- Zorin YA, Belichenko VG, Turutanov EK, Mazukabzov AM, Sklyarov EV and Mordvinova VV. 1995. The East Siberia Transect. *International Geological Review*, 37: 154-175
- Zorin YA, Belichenko VG, Turutanov EK, Kozhevnikov VM, Sklyarov EV, Tomurtogoo O, Khosbatar P, Arvisbaatar N and Biambaa C. 1998. Terranes of East Mongolia and Central Trans-Baikal region and evolution of the Mongolia-Okhotsk fold belt. *Russian Geology and Geophysics*, 39(1): 11-25
- Zorin YA. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33-56

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
- 曹林, 朱东. 1999. 中朝古大陆东部早前寒武纪变质岩系对比及其演化阶段划分. *世界地质*, 18(2): 36-46
- 程裕淇. 1994. *中国区域地质概论*. 北京: 地质出版社
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, Rahman AAA. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. *科学通报*, 50(12): 1239-1247
- 和政军, 李锦轶, 牛宝贵, 任纪舜. 1998. 燕山-阴山地区晚侏罗世强

- 烈推覆-隆升事件及沉积相应. 地质论评, 44(4): 408-418
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-734
- 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, 1-124
- 金炳成, 刘永江, 韩国卿, 金才英. 2012. 吉林-延吉-朝鲜咸北地区晚古生代沉积特征及其构造演化意义. 吉林大学学报(地球科学版), 42(增刊): 296-305
- 李承东, 张福勤, 苗来成, 颀颀强, 花艳秋, 许雅雯. 2007a. 吉林色洛河群的重新认识. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 841-847
- 李承东, 张福勤, 苗来成, 颀颀强, 许雅雯. 2007b. 吉林色洛河晚二叠世高镁安山岩 SHRIMP 锆石年代学及其地球化学特征. 岩石学报, 23(4): 767-776
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44(4): 339-347
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约. 中国科学(D辑), 39(7): 872-887
- 梁道俊, 刘永江, 李俊杰, 白晶哲, 刘城先. 2009. 朝鲜半岛古生代中期-中生代早期构造格局. 世界地质, 28(2): 157-165
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化: 1: 400 万中国大地构造图简要说明. 北京: 科学出版社
- 任纪舜, 陈延愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1-217
- 邵济安, 唐克东, 王成源, 臧启家, 张允平. 1991. 那丹哈达地体的构造特征及演化. 中国科学(B辑), (7): 744-751
- 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学(D辑), 27(5): 390-394
- 宋彪, 李锦轶, 牛宝贵, 徐文喜. 1997. 黑龙江省东部麻山群黑云斜长片麻岩中锆石的年龄及其地质意义. 地球学报, 18(3): 306-312
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 23(2): 461-480
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约. 地学前缘, 12(2): 263-275
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25(3): 332-335
- 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
- 王东方, 陈从云, 杨森等. 1992. 中朝陆台北缘大陆构造地质. 北京: 地震出版社, 1-105
- 王靛靛. 2010. 辽吉朝古元古代褶皱带构造格架与矿产分布规律. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安哥拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社
- 汪新文. 1997. 东北亚大陆边缘中生代构造事件与演化序列. 地质科技情报, 16(4): 9-15
- 吴福元, 张兴洲, 马志红, 孙德有. 2003. 吉林省中部红帘石硅质岩的特征及意义. 地质通报, 22(6): 391-396
- 徐美君, 许文良, 王枫, 高福红, 于介江. 2013. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩质岩石的年代学与地球化学及其构造意义. 岩石学报, 29(2): 354-368
- 杨进辉, 吴福元, 罗清华, 钟孙霖, 张艳斌, Wilde SA. 2004. 辽宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约. 岩石学报, 20(5): 1205-1214
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 2006. 冀北张-宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素. 地球科学, 31(1): 71-80
- 张晓晖, 张艳斌, 袁玲玲, 朴贤旭, 杨正赫, 金正男. 2016a. 朝鲜咸北地区晚二叠世基性火山岩的地球化学特征: 岩石成因与地质意义. 岩石学报, 32(10): 3070-3082
- 张晓晖, 王浩铮, 朴贤旭, 杨正赫, 金正男. 2016b. 朝鲜半岛冠帽地块的基底属性, 来自银德洞变质侵入杂岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据. 岩石学报, 32(10): 2965-2980
- 张艳斌, 吴福元, 翟明国, 路孝平. 2004. 和龙地块的构造属性与华北地台北缘东段边界. 中国科学(D辑), 34(9): 795-806
- 张艳斌. 2007. 吉黑东部花岗岩的成因与显生宙地壳增生. 博士后研究报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所
- 张贻侠, 孙运生, 张兴洲, 杨宝俊. 1998. 中国满洲里-绥芬河地学断面. 北京: 地质出版社
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105-119