

doi:10.3799/dqkx.2017.016

冀东—辽西中—晚三叠世柏杖子花岗质侵入岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因

熊乐¹, 石文杰¹, 李欢¹, 田宁¹, 陈冲², 周红智¹, 赵少卿¹, 李鹏宇¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116

摘要:关于冀东—辽西中—晚三叠世具有埃达克质岩石特征的花岗质岩石的源区性质,存在较大争议,且以往对位于其北东向隆起区内的柏杖子岩体的成因研究程度低.对柏杖子花岗质侵入岩进行了系统的年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究,结果显示:柏杖子岩体结晶年龄为 233 ± 3 Ma,岩石具有低 MgO、 $Mg^\#$ 和 Co、Ni、Cr 含量;富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,显示明显的 Pb、Th 正异常和 Nb、Ta、Ti、P 负异常;轻、重稀土元素分馏明显; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 为 $0.70445\sim 0.70524$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-7.3\sim -1.7$;锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-13.4\sim -5.9$.综合分析认为,高 Sr/Y 比值和低 Y 含量的柏杖子岩体属于华北克拉通正常厚度镁铁质下地壳熔融的产物,岩石高 Sr/Y 比值、低 Y 含量和 Nb-Ta 负异常特征为继承的华北克拉通下地壳内在性质,并具有与太古宙—古元古代 TTG 岩石系列相一致的 Nb-Ta 解耦特征,表明柏杖子岩体源区物质有 TTG 岩石的贡献;岩石 Sr-Nd-Hf 同位素组成和低相容元素含量特征同样表明岩浆来源于受改造的下地壳熔融.早中生代玄武岩底侵过程中幔源组分的加入对华北克拉通下地壳形成改造,同时提供热源诱发下地壳物质熔融,形成的熔体向浅表侵位,经历一定程度的斜长石分离结晶,并最终形成柏杖子岩体.

关键词:柏杖子花岗质侵入岩;冀东—辽西;三叠纪;岩浆源区;地质年代学;地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2017)02-0207-16

收稿日期: 2016-07-28

Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopes and Petrogenesis of Mid-Late Triassic Baizhangzi Granitic Intrusive Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Province

Xiong Le¹, Shi Wenjie¹, Li Huan¹, Tian Ning¹, Chen Chong², Zhou Hongzhi¹, Zhao Shaoqing¹, Li Pengyu¹

1. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China

Abstract: The source of the Mid-Late Triassic adakitic rocks remains controversial in the eastern Hebei-western Liaoning Province in recent years, and there is a lack of petrogenesis studies on the Baizhangzi granitic rocks within this NE-striking uplift. Zircon U-Pb and Hf isotope data, whole rock major and trace element and Sr, Nd isotope data are presented for the Baizhangzi granitic intrusive rocks in this paper. Zircon U-Pb dating yields a weighted mean age of 233 ± 3 Ma. The granitic rocks are featured with the high content of MgO and $Mg^\#$, and low content of Cr, Co, Ni. The granitic intrusive rocks are enriched in large-ion lithophile elements, depleted in high-field-strength elements (e.g. Nb, Ta, Ti, P), and display strong positive Pb, Th anomalies and negative Nb, Ta, Ti, P anomalies. Rare earth elements (REE) display right-dipping chondrite-normalized REE patterns, indicating significant fractionation between light REE and heavy REE. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values vary from 0.70445 to 0.70524 and -7.3 to -1.7 , respectively. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of zircons vary from -13.4 to -5.9 . It is concluded that the Baizhangzi granitic rocks were derived from partial melting of mafic lower continental crust of the NCC. The high Sr/Y, low Y and negative Nb-Ta anomalies are intrinsic characteristics of the lower continental crust. The Baizhangzi gra-

基金项目: 中国黄金集团地质科研项目 (No. 2012M521493).

作者简介: 熊乐 (1990-), 男, 博士, 从事矿产勘查以及矿床地球化学研究. ORCID: 0000-0001-8740-4021. E-mail: 601224101@qq.com

引用格式: 熊乐, 石文杰, 李欢, 等, 2017. 冀东—辽西中—晚三叠世柏杖子花岗质侵入岩地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因. 地球科学, 42(2): 207-222.

nitic rocks have decoupled Nb-Ta characteristics similar to the Archean-Paleoproterozoic TTG suites, which indicates that the Archean-Paleoproterozoic TTG rocks might have been involved in the magma source. The nonradiogenic Sr, scattered Nd-Hf isotopic compositions and low compatible trace element contents also suggest that the granitic rocks were derived from modified lower continental crust. The mafic lower continental crust has experienced modification by basaltic underplating during the Early Mesozoic, which led to formation of some juvenile crust materials. At the same time, melts produced by melting of the lower continental crust induced by basaltic underplating experienced fractional crystallization of plagioclase to some extent and intruded into the supercrust.

Key words: Baizhangzi granitic intrusive rocks; eastern Hebei-western Liaoning; Triassic; magma sources; geochronology; geochemistry.

0 引言

华北克拉通北缘发育大量的晚古生代—早中生代岩浆岩,其中晚二叠世—早三叠世(262~236 Ma)、中—晚三叠世(231~210 Ma)是 2 个重要的岩浆岩发育时期(邵济安等,2000a;阎国翰等,2000;吴福元等,2005;裴福萍等,2008;杨进辉和吴福元,2009;张拴宏等,2010;Zhang *et al.*,2012;Zhu *et al.*,2012)。晚二叠世—早三叠世岩浆岩主要岩性为含镁铁质岩石捕虏体、麻粒岩包体的花岗质侵入岩、闪长岩以及少量的碱性和基性侵入岩,地球化学、同位素特征显示花岗质岩石起源于下地壳的部分熔融,而镁铁质捕虏体为幔源玄武岩底侵作用的产物(邵济安等,2000a;Yang *et al.*,2012)。中—晚三叠世岩浆岩从碱性、中基性到酸性侵入岩及少量火山岩均有出露,广泛分布于兴蒙造山带、燕山褶皱带和辽东半岛。以往研究认为中—晚三叠世岩浆岩具有复杂的岩浆起源,包括大陆下地壳、软流圈地幔、富集岩石圈地幔和古老难熔的岩石圈地幔等组分(Yang *et al.*,2007;裴福萍等,2008;杨进辉和吴福元,2009;Ma *et al.*,2012),与软流圈物质上涌引起的基性岩浆底侵以及相关的壳幔相互作用有关。

冀东—辽西北东向隆起区内分布了多个中—晚三叠世中—酸性、碱性岩体,如都山杂岩(223~221 Ma)、大石柱杂岩(224 Ma)、柏杖子花岗质侵入岩(222 Ma)和河坎子正长岩(226~224 Ma)等(罗镇宽等,2003,2004;Yang *et al.*,2012;叶浩等,2014)。Yang *et al.*(2012)对河坎子正长岩研究认为,其与华北克拉通北缘其他地区中—晚三叠世碱性岩具有一致的源区,为富集的岩石圈地幔低程度部分熔融的产物。然而,对于冀东—辽西地区中—晚三叠世具有埃达克质岩石特征的花岗质岩石的源区性质,则存在较大的争议。叶浩等(2014)认为,都山杂岩和大石柱杂岩来源于正常厚度的古老下地壳部分熔融形成的熔体与少量富集岩石圈地幔和亏损

的软流圈地幔来源基性岩浆的混合作用形成。其他观点认为都山杂岩来源于华北克拉通加厚的下地壳(50~70 km)熔融,源岩为 TTG 岩石和少量变质玄武岩、变沉积岩的部分熔融,源区残留矿物组合为角闪石+石榴石±少量斜长石(吴鸣谦等,2014);或者源区含有部分新太古代结晶基底的变质岩(罗镇宽等,2003)。

柏杖子岩体位于大石柱杂岩北侧约 3 km,与都山杂岩和大石柱杂岩同处于冀东—辽西北东向隆起区内。由于以往针对柏杖子岩体成因研究程度低,缺乏详细的岩石地球化学及同位素地球化学研究。本文旨在通过对柏杖子岩体进行系统的同位素年代学、岩石地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学研究,探讨柏杖子岩体的源区性质,试图为冀东—辽西北东向隆起区内中—酸性岩浆岩成因研究提供借鉴,并对进一步认识华北克拉通三叠纪岩浆演化的深部动力学过程提供资料。

1 地质背景

华北克拉通是中国北方一个古老的地块,其最早的岩石记录可以追溯到古太古代(3.85~3.20 Ga;Liu *et al.*,1992;Song *et al.*,1996)。华北克拉通基底由太古代—早元古代变质岩构成,基底之上为中元古代—新生代盖层。综合岩石组合、地球化学、地质年代学、构造演化和 P - T - t 演化轨迹等特征,华北克拉通被划分为东部和西部 2 个地块,2 个地块之间所夹部分为华北中部造山带(图 1a;Zhao *et al.*,2001;曹正琦等,2016)。在早元古代晚期,东、西地块拼合之后,华北克拉通整体进入了一个长期稳定的发展阶段(Ernst,1988)。直到 0.98~0.60 Ga,火山岩携带的深源包体和少量地表基性岩浆所记录的新元古代事件,显示华北克拉通下地壳遭受了一定程度的改造作用(Zheng *et al.*,2004;郑建平等,2013)。

古生代—早中生代时期,华北克拉通内发育了

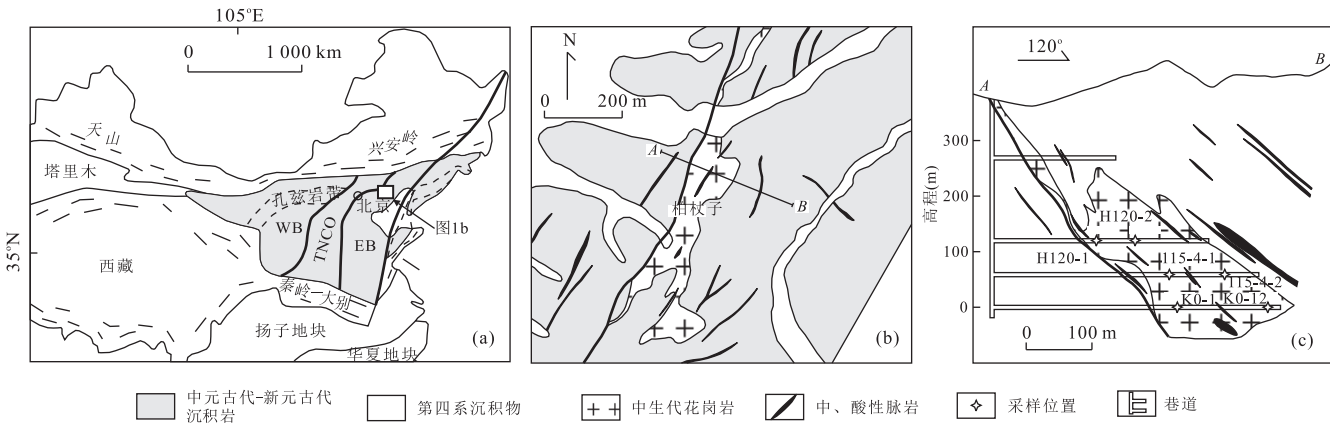


图 1 大地构造划分图(a)和柏杖子地区地质简图(b)和柏杖子地区地质剖面简图(c)

Fig.1 Tectonic setting(a) and geological sketch map of the Baizhangzi area (b) and profile of the Baizhangzi granitic rocks (c)
WB.华北克拉通西部地块;EB.华北克拉通东部地块;TNCO.华北中央造山带;图 a 据 Gao *et al.* (2004) 和 Zhao *et al.* (2005) 修改

广泛的岩浆活动.辽宁复县、山东蒙阴地区中奥陶世金伯利岩喷发之后,华北克拉通的整体抬升导致了晚奥陶世—中石炭世的缺失(郝奕玮等,2014).晚古生代时期,由于古亚洲洋的消减、闭合,华北克拉通北缘的构造、岩浆活动都受到中亚造山带活动的强烈影响.中亚造山带的形成是一个长期而复杂的过程,导致了华北克拉通北缘大量中石炭世—二叠纪岩浆岩的侵位(Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2012; 邵济安等, 2015).最终,索伦缝合带的形成,才表明古亚洲洋的完全闭合(Xiao *et al.*, 2003),之后主要表现为造山后的构造—岩浆过程,在兴蒙造山带、燕山褶皱带、辽东半岛广泛发育了中—晚三叠世碱性、中基性—酸性侵入岩(邵济安等, 2000a; 阎国翰等, 2000; 吴福元等, 2005; 杨进辉和吴福元, 2009; Zhang *et al.*, 2009a; Zhu *et al.*, 2012).

冀东—辽西地区位于华北克拉通北部,主体构造线呈 NE-NNE 向展布,区内地层、晚中生代盆地以及岩体的展布方向均呈 NE-NNE 向.区内分布了多个侵入岩体和数量众多的脉岩,包括都山杂岩体、大石柱杂岩体和柏杖子岩体(图 1b, 1c)等.岩体主要侵入到新太古代、中元古代地层之中.其中,都山杂岩体和大石柱杂岩体出露面积较大,前者为冀东地区最大的花岗岩基.柏杖子岩体与都山杂岩体同处于冀东 NE-NNE 向隆起区内,沿 NE 向断裂侵入中元古界长城系,岩体产状与 NE 向断裂一致,倾向南东.岩体下边界与长城系局部呈断层接触,上边界与长城系为侵入接触.柏杖子岩体呈岩株状产出,地表出露面积较小,约为 600 m×200 m,地表以下具有一定程度的膨大,但十分有限,两端呈岩脉状或

分枝岩脉状延伸,是柏杖子金矿区的重要含矿围岩.柏杖子岩体整体岩性均一,无明显成分及矿物粒度分带特征,野外调查过程中未见包体及围岩捕掳体.局部断裂构造切穿部位岩石具有较高程度的破碎,常见后期煌斑岩脉沿断裂构造侵入柏杖子岩体之中,岩石整体无明显变形特征.

2 样品和分析方法

柏杖子岩体岩性为花岗岩—石英二长岩过渡类型,岩石呈肉红色—浅红色,似斑状结构(深部为中粒结构),致密块状构造.主要矿物为钾长石、斜长石、石英和黑云母(图 2),钾长石含量约为 45%,斜长石含量约为 30%,石英含量约为 15%,黑云母含量约为 5%;副矿物有磷灰石、磁铁矿、锆石.靠近断裂部位岩石表现出一定程度破碎特征,具有硅化蚀变,颜色呈浅红色,岩石中有少量浸染状分布的自形黄铁矿;局部强烈硅化、黄铁矿化者,颜色可呈灰白色.

为了避开地表风化等因素对岩石地球化学分析结果的影响,柏杖子岩体样品均取自坑道内,尽量选取新鲜、无硅化蚀变的岩石样品,具体取样位置见图 1c.样品 H120-1 取自矿区 120 m 中段,用于锆石 U-Pb 定年.

测试分析前先将锆石镶嵌于环氧树脂靶之中,锆石原位 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,激光剥蚀束斑大小为 32 μm, ICP-MS 为 Agilent 7500a.详细的仪器参数、操作流程和数据处理方法描述见 Liu *et al.* (2008, 2010).离线数据处理采用

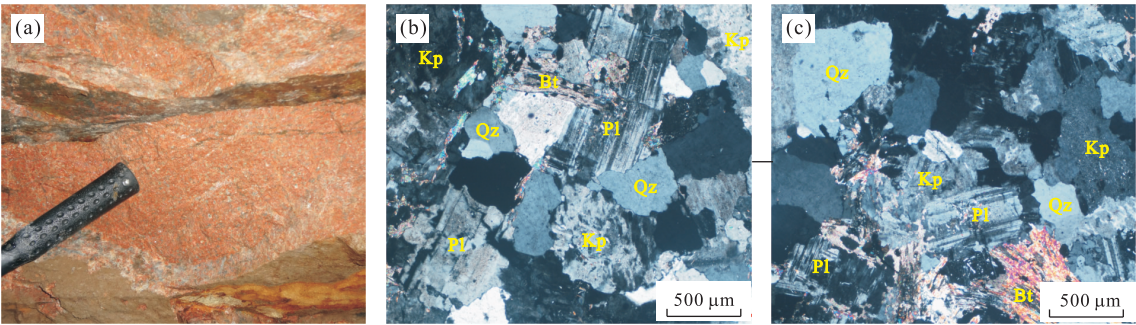


图 2 野外露头照片(a)和镜下显微照片(b)、(c)

Fig.2 Outcrop photograph (a) and thin section photomicrograph (b), (c) for Baizhangzi granitic rocks

Qz.石英;Kp.钾长石;Pl.斜长石;Bt.黑云母

软件 ICPMSDataCal 9.0 完成(Liu *et al.*, 2008).谐和图的绘制和 U-Pb 年龄计算采用 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2003).

在全岩主、微量元素测定之前,将样品研磨至小于 200 目并混匀.主量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司采用荧光光谱仪(ME-XRF06)完成.分析精度优于 3%.微量元素分析在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室采用 Optima 9500 型 ICP-TOF-MS 进行.分析前先将样品放置于 Teflon 坩埚中并加入 HNO₃ 和 HF,然后放置于烘箱中在 190 °C 条件下加热 48 h;在 115 °C 条件下蒸干后,再次加入 HNO₃ 溶解并蒸干;最后再加入浓度 30% HNO₃ 在 190 °C 条件下加热 12 h;最后将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用浓度 2% HNO₃ 进行稀释.测试过程中对标样 BCR-2 和 GSR-3 的分析表明精度优于 8%.

Sr、Nd 同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 Finnigan MAT261 完成.在密封坩埚中使用 HF+HNO₃ 混合酸在 110~200 °C 下将样品溶解.⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119 4 进行标准化,本次实验 GBW04411 的 Sr 同位素测定结果为 0.759 92 ±

0.000 10(2σ).¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 进行标准化,La Jolla 的 Nd 同位素测定结果为 0.511 845 ± 0.000 012(2σ).详细的实验条件和操作流程参照 Ling *et al.*(2009).

锆石原位 Hf 同位素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用激光剥蚀系统(GeoLas 2005)与 MC-ICP-MS(Neptune Plus)联用分析完成.激光剥蚀束斑大小为 44 μm.具体的仪器参数、操作流程描述见 Hu *et al.*(2012).¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的同位素干扰利用¹⁷³Yb 进行校正,¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb 比值采用 0.787 6 (McCulloch *et al.*, 1977).少量¹⁷⁶Lu 对¹⁷⁶Hf 的同位素干扰利用¹⁷⁵Lu 进行校正,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu 比值采用推荐值 0.026 56 (Blichert-Toft *et al.*, 1997).离线数据处理采用软件 ICPMSDataCal 9.0 完成(Liu *et al.*, 2009).

3 结果分析

3.1 锆石 U-Pb 定年

花岗岩样品 H120-1 中锆石透明、自形,呈淡黄色.单颗锆石长 50~110 μm,长宽比值为 1~2(图 3).CL 图像中锆石偏暗,除个别锆石无内部结构之

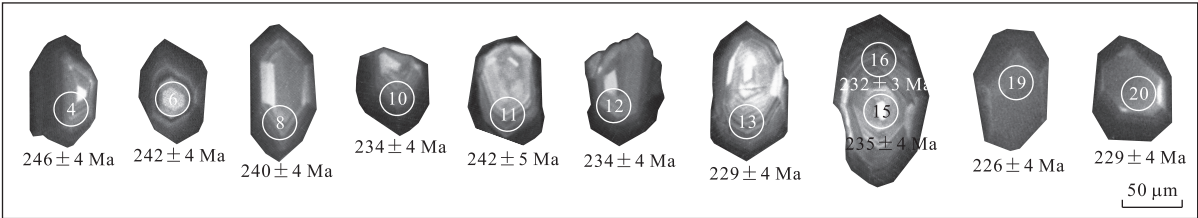


图 3 锆石 CL 图像

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons

白色圆圈代表锆石 U-Pb 测年点,数字为测点编号

表 1 柏杖子花岗岩侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据
Table 1 LA-ICP-MS zircons U-Pb dating data of Baizhangzi granitic rocks

点号	Pb ^a (10 ⁻⁶)	Th ^a (10 ⁻⁶)	U ^a (10 ⁻⁶)	Th/U	同位素比值										年龄(Ma)					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	2σ
H120-1-1	430	1 291	1 328	0.97	0.052 95	0.002 84	0.269 10	0.015 05	0.036 83	0.000 76	0.011 49	0.000 42	328	116	242	12	233	5	231	8
H120-1-2	357	1 046	994	1.05	0.050 61	0.003 11	0.249 02	0.015 56	0.035 54	0.000 65	0.011 59	0.000 38	233	145	226	13	225	4	233	8
H120-1-3	542	1 649	1 310	1.26	0.053 23	0.002 87	0.266 43	0.015 05	0.036 22	0.000 67	0.011 32	0.000 37	339	122	240	12	229	4	228	7
H120-1-4	430	1 195	1 226	0.97	0.052 35	0.002 95	0.280 30	0.015 88	0.038 84	0.000 63	0.012 36	0.000 39	302	132	251	13	246	4	248	8
H120-1-5	403	1 213	1 207	1.00	0.049 67	0.002 74	0.252 95	0.014 02	0.036 94	0.000 68	0.011 56	0.000 38	189	123	229	11	234	4	232	8
H120-1-6	475	1 385	1 290	1.07	0.051 10	0.002 90	0.269 32	0.014 72	0.038 29	0.000 68	0.011 62	0.000 40	256	131	242	12	242	4	234	8
H120-1-7	349	1 070	1 111	0.96	0.053 37	0.002 87	0.272 40	0.014 95	0.036 91	0.000 74	0.011 21	0.000 43	346	122	245	12	234	5	225	9
H120-1-8	350	1 022	1 049	0.97	0.051 57	0.003 10	0.269 02	0.015 77	0.037 85	0.000 69	0.011 46	0.000 42	265	137	242	13	240	4	230	8
H120-1-9	484	1 379	1 547	0.89	0.051 53	0.002 78	0.279 17	0.015 99	0.039 16	0.000 77	0.012 11	0.000 40	265	92	250	13	248	5	243	8
H120-1-10	369	1 081	1 272	0.85	0.052 41	0.002 98	0.267 23	0.015 11	0.036 94	0.000 68	0.011 70	0.000 40	302	130	240	12	234	4	235	8
H120-1-11	458	1 307	1 299	1.01	0.051 07	0.002 75	0.270 30	0.014 43	0.038 31	0.000 73	0.011 91	0.000 38	243	121	243	12	242	5	239	8
H120-1-12	377	1 118	1 009	1.11	0.050 45	0.002 88	0.257 46	0.014 44	0.036 96	0.000 58	0.011 41	0.000 37	217	133	233	12	234	4	229	7
H120-1-13	549	1 660	1 811	0.92	0.053 18	0.002 61	0.265 20	0.011 99	0.036 24	0.000 58	0.011 23	0.000 35	345	111	239	10	229	4	226	7
H120-1-14	526	1 434	1 557	0.92	0.050 50	0.002 87	0.279 52	0.015 46	0.040 20	0.000 71	0.012 48	0.000 42	217	131	250	12	254	4	251	8
H120-1-15	287	786	868	0.91	0.049 94	0.003 45	0.255 68	0.017 18	0.037 17	0.000 69	0.012 18	0.000 43	191	156	231	14	235	4	245	9
H120-1-16	636	1 806	2 171	0.83	0.052 33	0.002 24	0.265 25	0.011 13	0.036 68	0.000 52	0.011 85	0.000 35	298	98	239	9	232	3	238	7
H120-1-17	409	1 168	1 362	0.86	0.050 26	0.002 91	0.261 91	0.015 18	0.037 72	0.000 62	0.011 98	0.000 41	206	133	236	12	239	4	241	8
H120-1-18	314	727	746	0.97	0.074 78	0.005 58	0.639 08	0.079 67	0.055 52	0.003 96	0.015 17	0.000 90	1 063	150	502	49	348	24	304	18
H120-1-19	362	1 076	1 161	0.93	0.052 32	0.003 12	0.258 18	0.015 88	0.035 72	0.000 65	0.011 64	0.000 43	298	132	233	13	226	4	234	9
H120-1-20	296	863	826	1.05	0.050 77	0.003 26	0.252 64	0.015 90	0.036 19	0.000 65	0.011 54	0.000 40	232	148	229	13	229	4	232	8

注:上标 a 代表样品数据与标样 GJ-1 数据对比计算而来。

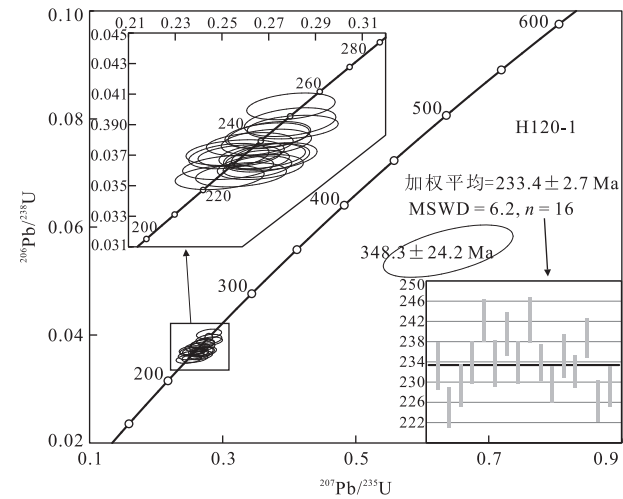


图 4 柏杖子花岗质侵入岩锆石 U-Pb 定年谐和图
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagram of Baizhangzi granitic rocks

外,其余锆石都具有典型的岩浆震荡环带.LA-ICP-MS 分析样品 H120-1 中锆石颗粒为 19 个,数据点共 20 个(表 1).分析点 H120-1-18 偏离了谐和曲线, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为早石炭世($348\pm 24\text{ Ma}$),谐和程度低,其余点年龄均谐和(图 4).剩余 19 个分析点被分为 2 组,其中一组 3 个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄处于 246~254 Ma,与早三叠世的岩浆活动和下地壳麻粒岩相变质作用事件相一致(邵济安等,2000b;王芳等,2009; Zhang *et al.*, 2009a); 另一组分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄处于 225~242 Ma,加权平均年龄为 $233\pm 3\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=6.2, n=16$),为中三叠世,代表了岩浆结晶年龄.

3.2 主量和微量元素

柏杖子岩体 SiO_2 含量分布集中,为 66.1%~68.0%;具有高 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (9.65%~9.91%) 和 Al_2O_3 (14.6%~15.5%) 含量,低 P_2O_5 (0.14%~0.20%)、 TiO_2 (0.26%~0.29%) 和 MgO (0.58%~0.77%), $\text{Mg}^\# = 27\sim 33$ 含量的特点(表 2). $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值(0.90~0.97)略小于 1,在图 5 中落入石英二长岩和花岗岩交界区域.图 6a 显示富集大离子亲石元素(LILE,K,Rb,Ba,U)、亏损高场强元素(HFSE,Nb,Ta,Ti,P),具有较强的 Nb、Ta、Ti、P 负异常和较强的 Pb、Th 正异常.图 6b 显示一致的右倾分布型式.强烈富集轻稀土元素(LREE),(La/Yb)_N 比值为 58~71,(Gd/Yb)_N 比值为 3.8~4.5,并具有一定程度的 Eu ($\delta\text{Eu}=0.78\sim 0.89$) 负异常.稀土元素总量(ΣREE) 变化范围较小,为 $366\times 10^{-6}\sim 441\times 10^{-6}$.

3.3 Sr-Nd 同位素

根据锆石 U-Pb 测年结果,柏杖子岩体

表 2 柏杖子花岗质侵入岩主量元素(%) 和微量元素(10^{-6})含量数据
Table 2 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) contents for Baizhangzi granitic rocks

样品	H120-1	H120-2	K0-1	K0-12	115-4-1	115-4-2
SiO ₂	66.10	67.03	67.73	67.42	66.80	67.98
Al ₂ O ₃	15.49	15.19	14.93	15.04	14.63	14.72
Fe ₂ O ₃	3.09	3.55	2.95	3.27	3.06	3.21
CaO	1.32	1.21	1.42	1.50	1.28	1.23
MgO	0.77	0.73	0.58	0.73	0.59	0.59
Na ₂ O	4.69	4.68	4.79	4.82	4.66	4.69
K ₂ O	5.22	4.97	4.96	5.07	5.01	5.04
TiO ₂	0.29	0.28	0.26	0.26	0.27	0.26
MnO	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.14	0.20	0.14	0.14
LOI	2.14	1.50	2.10	1.55	2.20	1.71
Total	99.60	99.55	100.10	100.20	98.90	99.80
Mg [#]	33.1	28.9	28.0	30.7	27.6	26.7
Li	4.0	6.8	1.5	3.5	1.8	3.2
Be	3.91	4.36	4.70	4.71	4.71	4.81
Sc	9.20	5.44	12.71	9.57	7.65	9.55
V	42.6	42.3	40.3	39.9	40.0	39.4
Cr	15.8	13.1	13.1	13.1	12.8	12.5
Ni	2.9	1.6	1.2	1.0	1.5	0.9
Co	3.66	3.32	2.95	2.89	3.20	3.37
Cu	12.7	21.9	11.7	16.6	12.9	7.4
Zn	18.5	17.1	14.7	13.4	15.3	15.6
Ga	19.4	20.1	19.7	19.4	19.8	19.3
Rb	188	183	183	176	205	211
Sr	610	592	460	481	495	474
Y	12.37	11.56	11.01	12.10	10.98	10.46
Zr	380	387	384	342	333	315
Nb	18.85	19.93	23.28	21.05	23.71	22.56
Cd	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
Ba	1996	1428	1705	2545	1633	1263
La	119.92	104.95	115.40	121.69	102.55	100.78
Ce	212.48	186.52	197.06	208.49	181.32	183.68
Pr	19.69	17.05	17.72	18.95	16.55	14.83
Nd	62.55	54.00	54.52	58.59	51.36	46.38
Sm	9.68	8.14	8.61	10.17	8.09	7.16
Eu	2.30	1.93	1.98	2.56	1.91	1.66
Gd	6.83	6.25	6.30	6.76	5.98	5.48
Tb	0.77	0.69	0.68	0.72	0.67	0.62
Dy	2.97	2.63	2.61	2.76	2.47	2.35
Ho	0.54	0.49	0.47	0.50	0.46	0.45
Er	1.48	1.31	1.31	1.38	1.26	1.23
Tm	0.21	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19
Yb	1.41	1.30	1.27	1.24	1.21	1.19
Lu	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20
Hf	8.40	7.87	7.95	7.38	7.18	7.21
Ta	3.02	2.83	2.81	2.83	2.78	2.83
Pb	45.7	35.6	27.9	22.8	168.2	35.3
Th	13.08	12.33	17.01	12.53	15.39	13.88
U	2.65	2.98	2.54	3.43	3.62	3.60
REE	441.08	385.66	408.34	434.20	374.22	366.21
δEu	0.82	0.80	0.79	0.89	0.80	0.78
(La/Yb) _N	60.8	57.9	65.3	70.5	60.5	60.6
(Gd/Yb) _N	4.0	4.0	4.1	4.5	4.1	3.8

注: $\text{Mg}^\# = 100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, 原子个数之比.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ (初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均校正至 230Ma(表 3).其中, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 分布集中,为

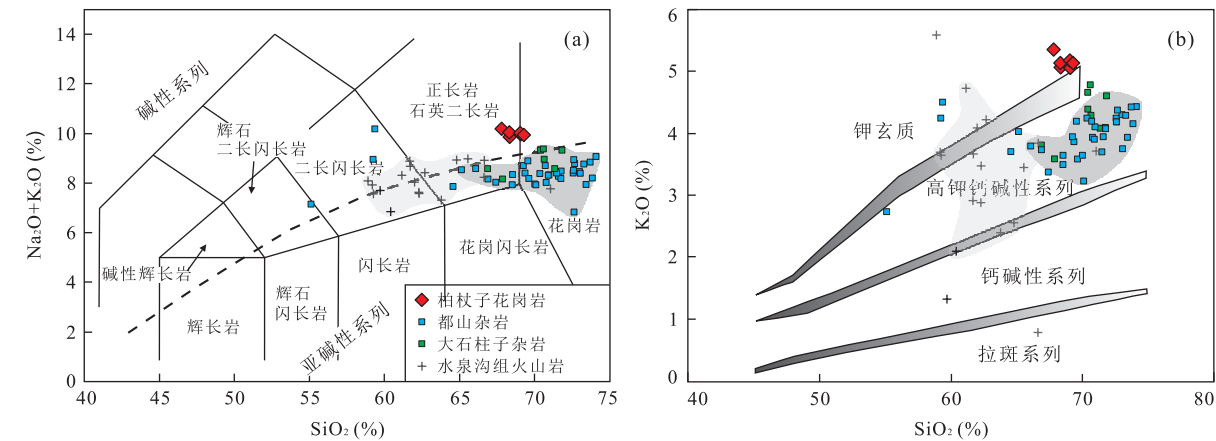


图 5 柏杖子花岗质侵入岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 关系(a)和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 关系(b)

Fig.5 The $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ relations (a) and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ relations (b) of Baizhangzi granitic rocks

图中浅灰色阴影区域代表水泉沟组范围,深灰色阴影区域代表都山和大石柱子杂岩范围;分类方案采用 le Maitre *et al.* (1989) 推荐分类;都山杂岩体数据来源于叶浩等(2014)和吴鸣谦等(2014);部分大石柱子杂岩体数据来源于叶浩等(2014);水泉沟组火山岩数据来源于邵济安等(2007)和 Ma *et al.* (2012)

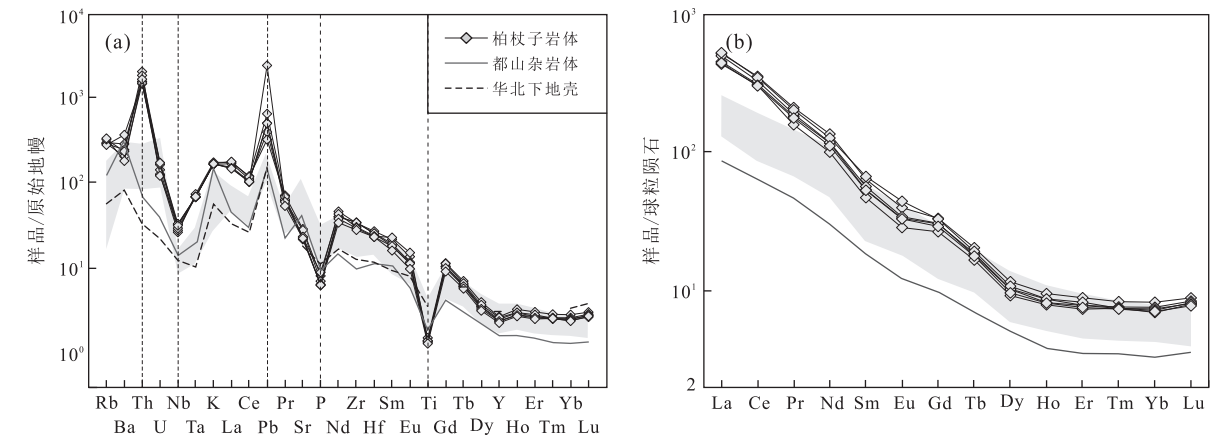


图 6 柏杖子花岗质侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素分布模式(b)

Fig.6 PM-normalized trace element spider diagram and chondrite-normalized REE pattern of Baizhangzi granitic rocks 原始地幔与球粒陨石标准化值来源于 Sun and McDonough(1989);都山杂岩体数据来源同图 5,图中灰色实线为平均值;水泉沟组火山岩数据(图中灰色区域)来源于 Ma *et al.* (2012);华北平均下地壳数据来源于 Gao *et al.* (1998)

表 3 柏杖子花岗质侵入岩 Sr-Nd 同位素组成数据

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of Baizhangzi granitic rocks

样品	Sm (10 ⁻⁶)	Nd (10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Sm/Nd}	Rb (10 ⁻⁶)	Sr (10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(<i>t</i>)
H120-1	9.68	62.6	0.093 5	0.512 121	3	-7.0	1 305	1 580	-0.52	188	610	0.892	0.707 764	6	0.704 834
H120-2	8.14	54.0	0.091 1	0.512 389	5	-1.7	948	1 149	-0.54	183	592	0.894	0.707 740	6	0.704 801
K0-1	8.61	54.5	0.095 5	0.512 124	6	-7.0	1 324	1 580	-0.51	183	460	1.151	0.708 488	4	0.704 706
K0-12	10.2	58.6	0.105 2	0.512 123	7	-7.3	1 443	1 605	-0.47	176	481	1.059	0.708 722	3	0.705 243
115-4-1	8.09	51.4	0.095 1	0.512 133	6	-6.9	1 308	1 565	-0.52	205	495	1.198	0.708 585	4	0.704 648
115-4-2	7.16	46.4	0.093 3	0.512 122	5	-7.0	1 302	1 578	-0.53	211	474	1.288	0.708 677	3	0.704 445

注:ε_{Nd}(*t*)采用现今 CHUR 比值¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 638 和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.196 6 计算(Hamilton *et al.*, 1983);*t*_{DM}和*t*_{DM2}采用现今亏损地幔比值¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.513 15 和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.213 5 计算(Goldstein *et al.*, 1984;Peucat *et al.*, 1989);¹⁴⁷Sm 衰变常数采用 6.54×10⁻¹² a⁻¹.

0.704 45~0.705 24.样品 H120-2 具有较高的 ε_{Nd}(*t*) 值为 -1.7,其余样品 ε_{Nd}(*t*) 值均一,变化范围为 -7.3~-6.9;相对于亏损地幔的两阶段 Nd 同位素模式年龄(*t*_{DM2})介于 1.61~1.15Ga.柏杖子岩体样

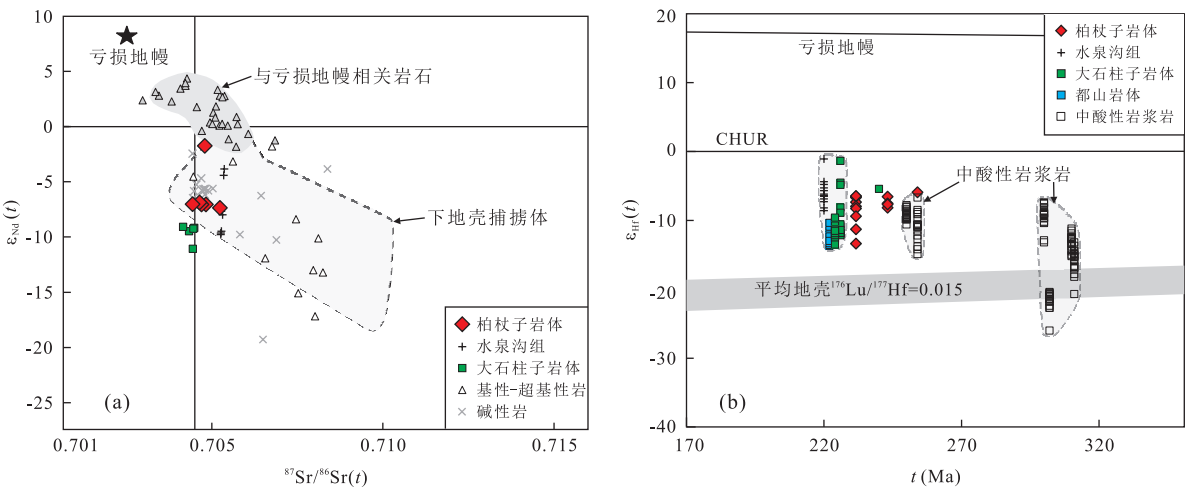


图 7 柏杖子岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系(a)和柏杖子岩体 Hf 同位素演化(b)

Fig.7 The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t (b) of Baizhangzi granitic rocks

a.水泉沟组火山岩数据来源于 Ma *et al.*(2012);部分大石柱子岩体数据来源于叶浩等(2014);基性-超基性岩数据来源于 Zhang *et al.*(2009b)和陈斌等(2008);早中生代碱性岩数据来源于阎国翰等(2000)和 Yang *et al.*(2012);早中生代华北下地壳麻粒岩和堆晶岩捕掳体数据来源于邵济安等(2006)和余宏全等(2006);与亏损地幔相关岩石数据来源于 Wu *et al.*(2004)和 Gao *et al.*(2004);亏损地幔(以 MORB 为代表)数据来源于 Zindler and Jagoutz(1988);b.都山杂岩数据来源于叶浩等(2014);中酸性岩浆岩数据来源于王芳等(2009)和 Zhang *et al.*(2009a);平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 演化区域用于对比

表 4 柏杖子花岗质侵入岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素数据

Table 4 LA-MC-ICP-MS in-situ zircons Hf isotopic results of Baizhangzi granitic rocks

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$t(\text{Ma})$	Hf(0)	2σ	Hf(t)	2σ	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$
H120-1-1	0.028 20	0.000 95	0.001 03	0.000 04	0.282 46	0.000 06	231	-11.6	2.2	-6.7	2.2	1 160
H120-1-2	0.023 54	0.000 46	0.000 87	0.000 01	0.282 44	0.000 07	231	-12.4	2.4	-7.3	2.4	1 182
H120-1-3	0.023 16	0.000 55	0.000 88	0.000 02	0.282 27	0.000 06	231	-18.4	2.1	-13.4	2.1	1 414
H120-1-4	0.028 44	0.001 09	0.001 06	0.000 04	0.282 45	0.000 09	243	-11.8	3.3	-6.6	3.3	1 166
H120-1-5	0.023 82	0.000 79	0.000 88	0.000 03	0.282 46	0.000 05	254	-11.4	1.9	-5.9	2.0	1 146
H120-1-6	0.043 07	0.003 99	0.001 46	0.000 11	0.282 42	0.000 16	231	-12.9	5.5	-8.0	5.5	1 221
H120-1-7	0.025 42	0.000 57	0.000 93	0.000 02	0.282 42	0.000 05	243	-12.8	1.8	-7.5	1.9	1 201
H120-1-8	0.024 59	0.000 51	0.000 90	0.000 02	0.282 41	0.000 05	231	-13.3	2.0	-8.3	2.0	1 219
H120-1-9	0.028 76	0.000 61	0.001 06	0.000 02	0.282 41	0.000 12	243	-13.4	4.3	-8.1	4.4	1 227
H120-1-10	0.028 60	0.001 45	0.001 02	0.000 02	0.282 46	0.000 16	231	-11.5	5.8	-6.5	5.8	1 153
H120-1-11	0.033 06	0.000 79	0.001 20	0.000 03	0.282 42	0.000 07	243	-12.9	2.6	-7.7	2.6	1 213
H120-1-12	0.027 18	0.000 65	0.000 99	0.000 03	0.282 46	0.000 07	231	-11.4	2.4	-6.5	2.4	1 151
H120-1-13	0.027 39	0.000 23	0.001 00	0.000 00	0.282 38	0.000 07	231	-14.4	2.7	-9.4	2.7	1 265
H120-1-14	0.022 87	0.000 62	0.000 84	0.000 02	0.282 32	0.000 07	231	-16.3	2.6	-11.3	2.6	1 333
H120-1-15	0.027 17	0.001 34	0.001 13	0.000 05	0.281 24	0.000 04	231	-54.5	1.4	-49.6	1.5	2 801

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 采用现今 CHUR 比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\,785$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.033\,6$ 计算(Bouvier *et al.*, 2008); t_{DM} 采用现今亏损地幔比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.283\,294$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.039\,33$ 进行计算; ^{176}Lu 衰变常数采用 $1.867\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004).

品 Sr-Nd 处于早中生代华北下地壳麻粒岩(余宏全等, 2006)和堆晶岩(邵济安等, 2006)捕掳体范围内(图 7a), 具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 是柏杖子岩体样品的显著特点.

3.4 锆石 Hf 同位素

锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 4. 柏杖子岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为 $-13.4\sim-5.9$, 相对于亏损地幔的单阶段 Hf 同位素模式年龄(t_{DM})为 $1.41\sim1.15\text{ Ga}$, 与全岩 Nd 模式年龄 t_{DM2} 相一致. 锆石 H120-1-15 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

值低(-49.6), 未获得相关的 U-Pb 年龄, 其 t_{DM} 为 2.80 Ga , 可能代表继承的古老结晶基底锆石. 柏杖子岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均位于假定的 2.5 Ga 平均地壳 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$) 演化区域之上(图 7b).

4 岩浆成因

柏杖子岩体具有高 K_2O 含量 ($4.96\%\sim5.22\%$), 低 MgO ($0.58\%\sim0.77\%$)、 Co ($2.9\times$

$10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-6}$)、Ni($0.9 \times 10^{-6} \sim 2.9 \times 10^{-6}$)和 Cr($12.5 \times 10^{-6} \sim 15.8 \times 10^{-6}$)含量的特征表明其主要来源可能是地壳物质熔融产生的熔体.岩石有较高的 Sr/Y 比值($39.7 \sim 51.2$)和低 Y 含量($10.46 \times 10^{-6} \sim 12.37 \times 10^{-6}$),在图 8a 中落入埃达克质岩石区域范围.近年来,随着对具有埃达克质特征岩石研究的不断深入,主要形成了以下几种观点:(1)年轻洋壳板片形成熔体与地幔楔橄榄岩相互作用(Kay, 1978);(2)加厚镁铁质下地壳的熔融(Atherton and Petford, 1993);(3)拆沉下地壳的熔融(Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004);(4)含水地幔橄榄岩形成的熔体(Stern and Hanson, 1991; Macpherson *et al.*, 2006);(5)亏损地幔来源熔体受下地壳物质混染(Fu *et al.*, 2012);(6)下地壳物质熔融(Ma *et al.*, 2012, 2015).

柏杖子岩体不可能由年轻俯冲洋壳板片的产生熔体与地幔橄榄岩相互作用形成.中亚造山带内大量晚石炭世—二叠纪钙碱性岩浆岩的发育表明古亚洲洋在二叠纪末已经闭合(Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007),古亚洲洋板片的俯冲时间与柏杖子岩体形成时间相差至少在 20 Ma 以上,并不能满足中—晚三叠世存在热的年轻洋壳这一条件.此外,柏杖子岩体与洋壳板片在 Sr-Nd 同位素组成方面也存在显著差异(图 7a).前已述及,柏杖子岩体高 K_2O 含量,低 MgO、Co、Ni 和 Cr 含量的特征表明其源区以地壳物质为主,其不可能由地幔玄武岩直接演化而来.所以,柏杖子岩体只可能来源于拆沉下地壳的熔融、加厚镁铁质下地壳的熔融或下地壳物

质熔融.

假设岩石来源于华北克拉通拆沉下地壳的熔融,那么所形成的熔体在上升过程中应该和地幔橄榄岩相互作用形成高 Mg、Cr、Ni 相容元素特征(Gao *et al.*, 2004),但这与所观测到的事实不相符.因此,柏杖子岩体可能主要来源于加厚镁铁质下地壳或下地壳物质的熔融过程.郑建平等(2004)对复县古生代金伯利岩基性捕虏体的研究表明,早古生代华北克拉通北缘地壳的厚度 >30 km.在随后蒙古地体与华北克拉通的拼合过程中,中—晚二叠世燕山地区经历了 SN 向的缩短变形(林少泽等, 2013).但是在这一过程中,对于华北克拉通北缘是否能够形成加厚的镁铁质下地壳(>45 km),仍然没有充足的地质证据加以支撑.假使华北克拉通北缘在早中生代存在加厚的镁铁质下地壳,并在热源驱动下熔融产生柏杖子岩体,根据 Ma *et al.*(2015)对华北克拉通镁铁质下地壳(>45 km)的模拟结果,所产生熔体($<25\%$ 熔融程度)将显示极低的 HREE、Y 含量($<6.0 \times 10^{-6}$)和高 Sr/Y 比值(>190),这显然与柏杖子岩体微量元素特点不相符.然而,二辉麻粒岩、含斜长石辉石岩熔融(≤ 33 km 和 $<25\%$ 熔融程度)所产生熔体则能显示与柏杖子岩体相一致的 HREE、Y 含量和 Sr/Y 比值特征.此外,根据 Huang and He(2010)计算结果,当岩浆源区具有平均下地壳 Gd/Yb 比值时,所产生熔体的 $(Gd/Yb)_N$ 比值可达 5.8;而更深层次的镁铁质下地壳熔融并且残留矿物相中存在石榴子石时,产生熔体的 $(Gd/Yb)_N$ 比值将更高(Wang *et al.*, 2007),但柏杖子岩体 $(Gd/Yb)_N$

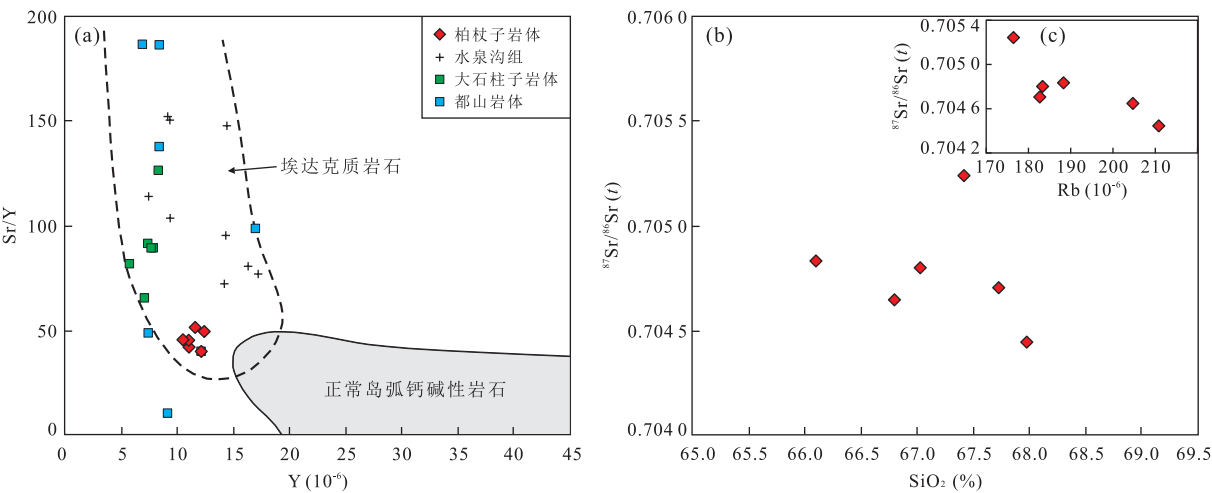


图 8 Sr/Y-Y 关系(a)和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(t)-SiO₂(Rb)关系
Fig.8 The Sr/Y-Y relations (a) and initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs. SiO₂ and Rb diagrams
水泉沟组火山岩和都山杂岩数据来源同图 8

Yb)_N 比值为3.8~4.5,因此,即使华北克拉通北缘早中生代存在加厚的镁铁质地壳,也不可能由其在熔融过程中产生柏杖子岩体的微量元素特征,而该特征应该是华北克拉通正常下地壳的内在性质,与同时代水泉沟组火山岩相似(图 6a, 6b),岩石为正常厚度下地壳物质熔融形成.

除此之外,岩石显著的 Nb-Ta 负异常应该也是继承了岩浆源区性质,因为 Gao *et al.* (1998) 根据古老麻粒岩地体估算的华北平均下地壳数据也具有显著的 Nb-Ta 负异常.但明显不同的是柏杖子岩体存在明显的 Nb-Ta 解耦(Nb/Ta = 6.2~8.5),相邻地区的大石柱岩体也具有类似特点,而冀东隆起区和建平隆起区之间的水泉沟组火山岩 Nb-Ta 解耦则不明显(图 6a).以往研究多数表明源区残留相中金红石和角闪石的出现是影响 Nb/Ta 比值的主要因素,残留相中金红石的出现会引起熔体中 Nb/Ta 比值的升高(刘勇胜和高山,2007),而角闪石的出现则会引起 Nb/Ta 比值的降低(Foley *et al.*, 2002).实际上,大陆下地壳范围内角闪石是作为一种常见造岩矿物而存在的,考虑到这样一个事实,很难将岩石的这种 Nb-Ta 强烈解耦简单地归因于源区角闪石的残留.由于华北克拉通范围内太古宙—古元古代 TTG 岩石系列分布广泛,而且是华北克拉通基底的重要组成部分.为此,本文统计了华北克拉通范围内广泛出露的太古宙—古元古代 TTG 岩石 Nb/Ta 比值分布,发现绝大部分 TTG 岩石 Nb/Ta 比值低于原始地幔值(17.39; Sun and McDonough, 1989),而阜平杂岩、南营花岗质片麻岩和涑水杂岩与柏杖子岩体 Nb/Ta 比值相一致(图 9).综合上述分析,柏杖子岩体 Nb-Ta 负异常及解耦特征也是继承了下地壳源区性质.

柏杖子岩体具有低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*t*) (0.704 45~0.705 24) 和较大的 ε_{Nd} (*t*) 变化范围 (−7.3~−1.7),这种 EM1 型同位素组成可以由下地壳或者富集岩石圈地幔引起.柏杖子岩体 Sr-Nd 同位素组成与华北北缘早中生代广泛发育的碱性岩相似(图 7a 和图 10b),该时期碱性岩被认为主要来源于富集的岩石圈地幔(阎国翰等,2000;牟保磊等,2001;韩宝福等,2004; Yang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012).尽管两者 Sr-Nd 同位素组成相似,但柏杖子岩体高 K₂O,低 MgO、Co、Ni 和 Cr 的特征表明其源区以地壳物质为主,而不可能由岩石圈地幔玄武岩浆混染下地壳物质形成.虽然相邻地区都山杂岩和大石柱杂岩内局部发现了辉石岩和闪长质包体(叶浩等,2014),表明有基性岩浆的注入,柏杖子岩

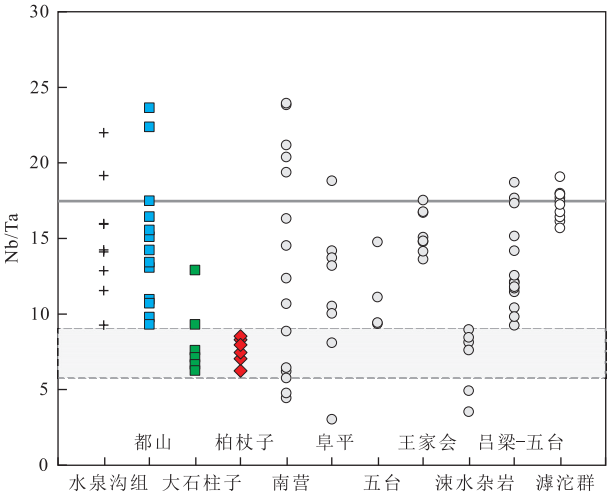


图 9 冀东—辽西地区中—晚三叠世岩浆岩与太古宙—古元古代 TTG 岩石 Nb/Ta 比值分布范围

Fig.9 Distribution of Nb/Ta ratios of Middle to Late Triassic magma rocks in eastern Hebei-western Liaoning and of Archean-Paleoproterozoic TTG rocks

水泉沟组火山岩、都山杂岩和部分大石柱岩体数据来源同图 8;阜平杂岩中南营花岗质片麻岩数据来源于 Liu *et al.* (2005);阜平杂岩和五台杂岩数据来源于 Liu *et al.* (2004);王家会花岗岩数据来源于王月然等(2005);涑水杂岩数据来源于张瑞英等(2013);吕梁—五台地区花岗岩、片麻岩、杂岩数据来源于 Chen *et al.* (2006);滹沱群变质玄武岩数据来源于杜利林等(2009);灰色实线代表原始地幔 Nb/Ta 比值 17.39(Sun and McDonough, 1989);浅灰色阴影区域代表柏杖子岩体 Nb/Ta 比值范围

体⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*t*)与 SiO₂ 和 Rb 也呈现一定程度的负相关性(图 8b),这种负相关性有可能是少量基性岩浆的注入形成,但考虑到岩石 SiO₂ 含量变化范围很窄,此处笔者认为下地壳源区组成的不均一应是对这种负相关性更合理的解释.此外,柏杖子岩体 Sr-Nd 组成也处于早中生代华北下地壳麻粒岩(余宏全等,2006)和堆晶岩(邵济安等,2006)捕掳体范围内(图 7a),ε_{Nd} (*t*)值与水泉沟组火山岩重叠,落入华北克拉通东部地块新太古代—古元古代镁铁质岩石演化区域内(图 10a).

再者,图 10b 和图 7b 中 Nd 和 Hf 同位素随时间均表现出一致的演化趋势,中—晚三叠世岩浆岩相比于晚石炭世—二叠纪末岩浆岩具有更高的 ε_{Nd} (*t*)和 ε_{Hf} (*t*)值,这种系统性的 ε_{Nd} (*t*)和 ε_{Hf} (*t*)值升高,代表了幔源岩浆活动的加强.柏杖子岩体年轻的 Nd 模式年龄(1.61~1.15 Ga)和锆石 Hf 模式年龄(1.41~1.15 Ga)也显示出幔源组分的贡献.从 ε_{Nd} (*t*)值 (−7.3~−1.7)和 ε_{Hf} (*t*)值 (−13.4~−5.9)分布范围来看,这种幔源组分没有显示出亏损特征,可能代表

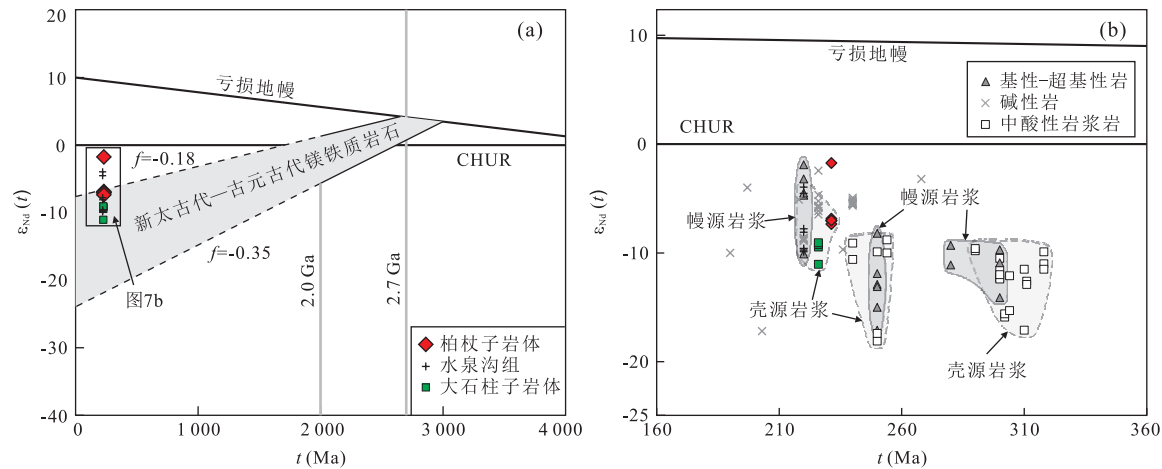


图 10 柏杖子岩体 Nd 同位素演化图解(a)和晚古生代—早中生代岩浆岩 Nd 同位素演化图解(b)

Fig.10 The $\epsilon_{Nd}(t)$ - t relations of Baizhangzi granitic rocks (a) and $\epsilon_{Nd}(t)$ - t relations of other Late Paleozoic-Early Mesozoic igneous rocks (b)

图 a 中灰色区域数据来源于 Wu *et al.* (2005), 下部边界演化线 ($f_{Sm/Nd} = -0.35$) 为对镁铁质岩石的最小估计; 幔源基性—超基性岩数据来源于图 7, 水泉沟组火山岩数据和壳源中酸性岩浆岩数据来源于图 8, 碱性岩数据来源于阎国翰等 (2000)、牟保磊等 (2001)、韩宝福等 (2004) 和 Yang *et al.* (2012)

了富集岩石圈地幔或原始地幔组分。华北克拉通北缘早中生代广泛发育的碱性岩、基性—超基性岩都表明该时期地幔岩浆活动的存在 (阎国翰等, 2000; 田伟等, 2007; Fu *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012), 软流圈地幔上涌所引起的玄武质岩浆底侵是该时期幔源岩浆活动的主要机制。汉诺坝镁铁质麻粒岩包体中锆石年龄信息清晰地记载了这次玄武质岩浆底侵事件 (230~220 Ma; Liu *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013)。此外, 喀喇沁地区闪长岩中堆晶岩和镁铁质麻粒岩包体也记录了早中生代玄武质岩浆底侵事件 (邵济安等, 1999, 2000a)。玄武岩底侵过程中幔源组分的加入对华北克拉通下地壳进行了改造, 同时能够提供热源诱发下地壳物质熔融, 形成的熔体向浅表侵位形成柏杖子岩体。

柏杖子岩体地球化学特征显示高度富集 K、Rb、Ba、U 等大离子亲石元素和 LREE ($(La/Yb)_N = 58 \sim 71$), 表明早中生代遭受改造的下地壳物质熔融形成熔体之后, 还经历了一定程度的分异演化过程。一定程度的 $Eu(\delta Eu = 0.78 \sim 0.89)$ 和 Sr 负异常表明斜长石的分离结晶是重要的分异过程, 而 Nb-Ta 和 Ti 负异常则是继承了岩浆源区自身性质, 并非由含 Ti 矿物的分离结晶造成。

5 结论

通过对柏杖子花岗质侵入岩年代学、全岩地球

化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 笔者认为早中生代玄武质岩浆底侵过程中幔源组分的加入对华北克拉通下地壳形成改造, 同时提供热源诱发下地壳物质熔融, 形成的熔体向浅表侵位, 经历一定程度的斜长石分离结晶之后, 最终形成柏杖子岩体。岩体高 Sr/Y 比值、低 Y 含量、Nb-Ta 负异常是继承了华北克拉通下地壳的内在性质, 岩石的 Nb-Ta 解耦特征代表了岩浆源区有部分新太古宙—古元古代 TTG 岩石的贡献。

致谢: 辽宁凌源日兴矿业有限公司郑树泉对野外工作给予了大量帮助; 匿名审稿专家对文章提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示衷心感谢!

References

Atherton, M.P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144–146. doi:10.1038/362144a0

Blichert-Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248–260. doi:10.1007/s004100050278

Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57. doi:10.

- 1016/j.epsl.2008.06.010
- Cao, Z. Q., Zhai, W. J., Jiang, X. F., et al., 2016. About 2.5 Ga Tectono-Metamorphic Event in Southern Margin of North China Craton and Its Significance. *Earth Science*, 41(4): 570—585 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Liu, S. W., Wang, R., et al., 2006. Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Late Archean-Paleoproterozoic Granitoids in the Lüliang-Wutai Terrain, North China Craton, and Implications for Petrogenesis. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 80(6): 834—843. doi: 10.1111/j.1755—6724.2006.tb00306.x
- Chen, B., Tian, W., Liu, A. K., 2008. Petrogenesis of the Xiaozhangjiakou Mafic-Ultramafic Complex, North Hebei: Constraints from Petrological, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Data. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 295—303 (in Chinese with English abstract).
- Du, L. L., Yang, C. H., Ren, L. D., et al., 2009. Petrology, Geochemistry and Petrogenesis of the Metabasalts of the Hutuo Group, Wutai Mountains, Shanxi, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 867—876 (in Chinese with English abstract).
- Ernst, W. G., 1988. Element Partitioning and Thermobarometry in Polymetamorphic Late Archean and Early-Mid Proterozoic Rocks from Eastern Liaoning and Southern Jilin Provinces, China. *American Journal of Science*, 288A: 293—340.
- Fu, L. B., Wei, J. H., Kusky, T. M., et al., 2012. Triassic Shoshonitic Dykes from the Northern North China Craton: Petrogenesis and Geodynamic Significance. *Geological Magazine*, 149(1): 39—55.
- Foley, S., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of Early Continental Crust Controlled by Melting of Amphibolite in Subduction Zones. *Nature*, 417(6891): 837—840. doi: 10.1038/nature00799
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892—897. doi: 10.1038/nature03162
- Gao, S., Luo, T. G., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959—1975. doi: 10.1016/s0016—7037(98)00121—5
- Goldstein, S. L., O'Nions, R. K., Hamilton, P. J., 1984. A Sm-Nd Isotopic Study of Atmospheric Dusts and Particulates from Major River Systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221—236. doi: 10.1016/0012—821x(84)90007—4
- Han, B. F., Kagami, H., Li, H. M., 2004. Age and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Guangtoushan Alkaline Granite, Hebei Province, China: Implications for Early Mesozoic Crust-Mantle Interaction in North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1375—1388 (in Chinese with English abstract).
- Hamilton, P. J., O'Nions, R. K., Bridgwater, D., et al., 1983. Sm-Nd Studies of Archean Metasediments and Metavolcanics from West Greenland and Their Implications for the Earth's Early History. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(2): 263—272. doi: 10.1016/0012—821x(83)90089—4
- Hao, Y. W., Luo, M. S., Xu, Z. L., et al., 2014. Division of Sedimentary Basins and Its Tectonic Evolution in North China from Neoproterozoic to Mesozoic. *Earth Science*, 39(8): 1230—1242 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012. Improved in situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391—1399. doi: 10.1039/c2ja30078h
- Huang, F., He, Y. S., 2010. Partial Melting of the Dry Mafic Continental Crust: Implications for Petrogenesis of C-Type Adakites. *Chinese Science Bulletin*, 55(22): 2428—2439. doi: 10.1007/s11434—010—3224—2
- Kay, R. W., 1978. Aleutian Magnesian Andesites: Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1—2): 117—132. doi: 10.1016/0377—0273(78)90032—x
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Duxon, A., 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms; Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematic of Igneous Rocks. Blackwell, Oxford.
- Lin, S. Z., Zhu, G., Yan, L. J., et al., 2013. Structural and Chronological Constraints on a Late Paleozoic Shortening Event in the Yanshan Tectonic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 58(34): 3597—3609 (in Chinese).
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3—4): 640—658. doi: 10.1016/j.lithos.2009.07.001
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339—342. doi: 10.1130/0091—7613(1992)020<0339:romcit>2.3.co;2
- Liu, S. W., Pan, Y. M., Xie, Q. L., et al., 2004. Archean Geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Con-

- straints from Geochemistry of Two Contrasting Series of Granitoids in the Fuping and Wutai Complexes. *Precambrian Research*, 130(1–4): 229–249. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.001
- Liu, S.W., Pan, Y.M., Xie, Q.L., et al., 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying Granitic Gneisses in the Fuping Complex: Implications for the Tectonic Evolution of the Central Zone, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 643–658. doi: 10.1016/j.jseas.2003.10.010
- Liu, Y.S., Gao, S., 2007. High Nb/Ta Ratios of the Mesozoic Basalts from North China: Records of Continental Crust Recycling. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1): 19–28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Zong, K.Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. doi: 10.1007/s11434-010-3052-4
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2009. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Luo, Z.K., Li, J.J., Guan, K., et al., 2004. SHRIMP Zircon U-Pb Age of the Granite at Baizhangzi Gold Field in Lingyuan, Liaoning Province. *Geological Survey and Research*, 27(2): 82–85 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.K., Miao, L.C., Guan, K., et al., 2003. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Dushan Granitic Batholith and Related Granite-Porphyry Dyke, Eastern Hebei Province, China, and Their Geological Significance. *Geochimica*, 32(2): 173–180 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Zheng, J.P., Griffin, W.L., et al., 2012. Triassic “Adakitic” Rocks in an Extensional Setting (North China): Melts from the Cratonic Lower Crust. *Lithos*, 149: 159–173. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.017
- Ma, Q., Zheng, J.P., Xu, Y.G., et al., 2015. Are Continental “Adakites” Derived from Thickened or Foundered Lower Crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 125–133. doi: 10.1016/j.epsl.2015.02.036
- Macpherson, C.G., Dreher, S.T., Thirlwall, M.F., 2006. Adakites Without Slab Melting: High Pressure Differentiation of Island Arc Magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581–593.
- McCulloch, M.T., Rosman, K.J.R., de Laeter, J.R., 1977. The Isotopic and Elemental Abundance of Ytterbium in Meteorites and Terrestrial Samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(12): 1703–1707. doi: 10.1016/0016-7037(77)90202-2
- Mu, B.L., Shao, J.A., Chu, Z.Y., et al., 2001. Sm-Nd Age and Sr, Nd Isotopic Characteristics of the Fanshan Potassic Alkaline Ultramafite-Syenite Complex in Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 358–365 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F.P., Xu, W.L., Yu, Y., et al., 2008. Petrogenesis of the Late Triassic Mayihe Pluton in Southern Jilin Province: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(3): 351–362 (in Chinese with English abstract).
- Peucat, J.J., Vidal, P., Bernard-Griffiths, J., et al., 1989. Sr, Nd, and Pb Isotopic Systematics in the Archean Low- to High-Grade Transition Zone of Southern India: Syn-Accretion vs. Post-Accretion Granulites. *The Journal of Geology*, 97: 537–549. doi: 10.1086/629333
- Shao, J.A., Chen, F.K., Lu, F.X., et al., 2006. Mesozoic Pulsative Upwelling Diapirs of Asthenosphere in West Liaoning Province. *Earth Science*, 31(6): 807–816 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Han, Q.J., Zhang, L.Q., et al., 1999. Discovery of Early-Mesozoic Accumulation Complexes in Eastern Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44(5): 478–485 (in Chinese).
- Shao, J.A., Lu, F.X., Li, W.P., 2007. Mesozoic Intracontinental Andesites Formed by Underplating in West Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 701–708 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Tian, W., Zhang, J.H., 2015. Early Permian Cumulates in Northern Margin of North China Craton and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 40(9): 1441–1457 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Zhang, R.H., Han, Q.J., et al., 2000a. Geochronology of Cumulate Xenoliths and Their Host Diorites from Harqin, Eastern Nei Mongol. *Geochimica*, 29(4): 331–336 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Han, Q.J., Li, H.M., 2000b. The Discovery of Early Mesozoic Granulite Xenoliths in North China Cra-

- ton. *Science in China (Series D)*, 30(Suppl.):148—153 (in Chinese).
- She, H. Q., Wang, Y. W., Li, Q. H., et al., 2006. The Mafic Granulite Xenoliths and Its Implications to Mineralization in Chaihulanzi Gold Deposit, Inner Mongolian, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(6):863—875 (in Chinese with English abstract).
- She, Z. B., Yang, F. Y., Liu, W., et al., 2016. The Termination and Aftermath of the Lomagundi-Jatuli Carbon Isotope Excursions in the Paleoproterozoic Hutuo Group, North China. *Journal of Earth Science*, 27(2):297—316. doi: 10.1007/s12583-015-0654-4
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1—3):79—94. doi: 10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4):311—324. doi: 10.1016/s0012-821x(04)00012-3
- Stern, R. A., Hanson, G. N., 1991. Archean High-Mg Granodiorite: A Derivative of Light Rare Earth Element-Enriched Monzodiorite of Mantle Origin. *Journal of Petrology*, 32(1):201—238. doi: 10.1093/petrology/32.1.201
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications*, 42(1):313—345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tian, W., Chen, B., Liu, C. Q., et al., 2007. Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Composition of the Xiaozhangjiakou Ultramafic Pluton in Northern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3):583—590 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Chen, F. K., Hou, Z. H., et al., 2009. Zircon Ages and Sr-Nd-Hf Isotopic Composition of Late Paleozoic Granitoids in the Chongli-Chicheng Area, Northern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):3057—3074 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10):2609—2636. doi: 10.1016/j.gca.2007.03.008
- Wang, Y. R., Liu, S. W., Li, Q. G., et al., 2005. Late Paleoproterozoic Geodynamic Setting in Wutai Mountains: Constraints from Geochemistry of Wangjiahui Granitoids. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41(6):840—850 (in Chinese with English abstract).
- Windley, B. F., Alexeev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society, London*, 164(1):31—47. doi: 10.1144/0016-76492006-022
- Wu, F. Y., Wilde, S. A., Zhang, G. L., et al., 2004. Geochronology and Petrogenesis of the Post-Orogenic Cu-Ni Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Complexes in Jilin Province, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5):781—797. doi: 10.1016/s1367-9120(03)00114-7
- Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Granitic Magmatism in the Liaodong Peninsula Northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):305—317 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005. Nd Isotopic Constraints on Crustal Formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5):523—545. doi: 10.1016/j.jseas.2003.10.011
- Wu, M. Q., Zhao, G. C., Gao, J. W., et al., 2014. Geochemical Characteristics of the Dushan Complex and Their Geological Significance. *Geology in China*, 41(1):108—121 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6):1484—1505. doi: 10.1029/2002tc001484
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30(12):1111—1114. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2
- Yan, G. H., Mu, B. L., Xu, B. L., et al., 2000. Geochronology and Sr-Nd-Pb Isotopic Characters of Triassic Alkaline Rocks in the Yanliao-Yinshan Area and Its Tectonic Implications. *Science in China (Series D)*, 30(4):383—387 (in Chinese).
- Yang, J. H., Sun, J. F., Chen, F. K., et al., 2007. Sources and Petrogenesis of Late Triassic Dolerite Dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for Post-Collisional Lithosphere Thinning of the Eastern North China Craton. *Journal of Petrology*, 48(10):1973—1997. doi: 10.1093/petrology/egm046
- Yang, J. H., Sun, J. F., Zhang, M., et al., 2012. Petrogenesis of Silica-Saturated and Silica—Undersaturated Syenites in

- the Northern North China Craton Related to Post-Collisional and Intraplate Extension, *Chemical Geology*, 328 (18): 149–167. doi:10.1016/j.chemgeo.2011.09.011
- Yang, J. H., Wu, F. Y., 2009. Triassic Magmatism and Its Relation to Decratonization in the Eastern North China Craton. *Science in China (Series D)*, 39(7): 910–921 (in Chinese).
- Ye, H., Zhang, S. H., Zhao, Y., et al., 2014. Petrogenesis and Emplacement Deformation of the Late Triassic Dushan Composite Batholith in the Yanshan Fold and Thrust Belt: Implications for the Tectonic Settings of the Northern Margin of the North China Craton During the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 21(4): 275–292 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Zhu, R. X., Santosh, M., et al., 2013. Episodic Widespread Magma Underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for Craton Destruction. *Gondwana Research*, 23(1): 95–107. doi:10.1016/j.gr.2011.12.006
- Zhang, R. Y., Zhang, C. L., Sun, Y., 2013. Crustal Reworking in the North China Craton at ~ 2.5 Ga: Evidence from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Whole-Rock Geochemistry of the TTG Gneisses in the Zhongtiao Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2265–2280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Song, B., et al., 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic Intrusive Suites from the Northern Margin of the North China Craton: Geochronology, Petrogenesis, and Tectonic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1–2): 181–200. doi:10.1130/b26157.1
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, X. C., et al., 2009b. Late Paleozoic to Early Mesozoic Mafic-ultramafic Complexes from the Northern North China Block: Constraints on the Composition and Evolution of the Lithospheric Mantle. *Lithos*, 110(1–4): 229–246. doi:10.1016/j.lithos.2009.01.008
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J. M., et al., 2010. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824–842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 2012. Early Mesozoic Alkaline Complexes in the Northern North China Craton: Implications for Cratonic Lithospheric Destruction. *Lithos*, 155: 1–18. doi:10.1016/j.lithos.2012.08.009
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107 (1–2): 45–73. doi:10.1016/s0301-9268(00)00154-6
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136 (2): 177–202. doi:10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2004. U-Pb and Hf-Isotope Analysis of Zircons in Mafic Xenoliths from Fuxian Kimberlites: Evolution of the Lower Crust beneath the North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(1): 79–103. doi:10.1007/s00410-004-0587-x
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., Ma, Q., et al., 2012. Accretion and Reworking beneath the North China Craton. *Lithos*, 149: 61–78. doi:10.1016/j.lithos.2012.04.025
- Zheng, J. P., Ping, X. Q., Xia, B., et al., 2013. The Weak Neoproterozoic Thermal Records in North China and Its Significances for the Lithospheric Thickness. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2456–2464 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Yu, C. M., Lu, F. X., et al., 2004. Geochemical and Geochronological Characteristics of Meta-Basaltic Xenoliths: Implications for the Evolution of Continental Lower Crust in Early Time. *Science in China (Series D)*, 34(5): 412–422 (in Chinese).
- Zhu, R. X., Yang, J. H., Wu, F. Y., 2012. Timing of Destruction of the North China Craton. *Lithos*, 149(15): 51–60. doi:10.1016/j.lithos.2012.05.013
- Zindler, A., Emil, J., 1988. Mantle Cryptology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(2): 319–333. doi:10.1016/0016-7037(88)90087-7

附中文参考文献

- 曹正琦, 翟文建, 蒋幸福, 等, 2016. 华北克拉通南缘约 2.5 Ga 构造变质事件及意义. *地球科学*, 41(4): 570–585.
- 陈斌, 田伟, 刘安坤, 2008. 冀北小张家口基性—超基性杂岩的成因: 岩石学、地球化学和 Nd-Sr 同位素证据. *高校地质学报*, 14(3): 295–303.
- 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 等, 2009. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义. *地质通报*, 28(7): 867–876.
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民, 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. *岩石学报*, 20(6): 1375–1388.
- 郝奕玮, 骆满生, 徐增连, 等, 2014. 华北陆块新元古代—中生

- 代沉积盆地划分及其构造演化. 地球科学, 39(8): 1230—1242.
- 林少泽, 朱光, 严乐佳, 等, 2013. 燕山构造带晚古生代挤压变形事件的构造与年代学证据. 科学通报, 58(34): 3597—3609.
- 刘勇胜, 高山, 2007. 华北地区中生代玄武岩高 Nb/Ta 值对地壳岩石再循环的直接记录. 矿物岩石地球化学通报, 26(1): 19—28.
- 罗镇宽, 李俊健, 关康, 等, 2004. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质调查与研究, 27(2): 82—85.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等, 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义. 地球化学, 32(2): 173—180.
- 牟保磊, 邵济安, 储著银, 等, 2001. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩—正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr、Nd 同位素特征. 岩石学报, 17(3): 358—365.
- 裴福萍, 许文良, 于洋, 等, 2008. 吉林南部晚三叠世蚂蚁河岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 38(3): 351—362.
- 邵济安, 陈福坤, 路凤香, 等, 2006. 辽西中生代软流圈底辟体的脉动式上涌. 地球科学, 31(6): 807—816.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等, 1999. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现. 科学通报, 44(5): 478—485.
- 邵济安, 路凤香, 李伍平, 2007. 辽西中生代陆内底侵作用背景下形成的安山岩. 岩石学报, 23(4): 701—708.
- 邵济安, 田伟, 张吉衡, 2015. 华北克拉通北缘早二叠世堆晶岩及其构造意义. 地球科学, 40(9): 1441—1457.
- 邵济安, 张任祜, 韩庆军, 等, 2000a. 内蒙古喀喇沁堆晶岩捕虏体和寄主闪长岩的同位素年龄. 地球化学, 29(4): 331—336.
- 邵济安, 韩庆军, 李惠民, 2000b. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学(D 辑), 30(增刊): 148—153.
- 余宏全, 王义文, 李庆环, 等, 2006. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿基性麻粒岩包体特征及其成矿动力学意义. 地质学报, 80(6): 863—875.
- 田伟, 陈斌, 刘超群, 等, 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(3): 583—590.
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 等, 2009. 华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(11): 3057—3074.
- 王月然, 刘树文, 李秋根, 等, 2005. 五台山古元古代晚期的动力学背景: 王家会花岗岩地球化学的制约. 北京大学学报(自然科学版), 41(6): 840—850.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11(3): 305—317.
- 吴鸣谦, 赵国春, 高建伟, 等, 2014. 河北都山杂岩体地球化学特征及其地质意义. 中国地质, 41(1): 108—121.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等, 2000. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征及意义. 中国科学(D 辑), 30(4): 383—387.
- 杨进辉, 吴福元, 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. 中国科学(D 辑), 39(7): 910—921.
- 叶浩, 张拴宏, 赵越, 等, 2014. 燕山褶皱带晚三叠世都山复式岩基成因及侵位变形: 华北北缘中生代早期构造背景的制约. 地学前缘, 21(4): 275—292.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等, 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824—842.
- 张瑞英, 张成立, 孙勇, 2013. 华北克拉通~2.5 Ga 地壳再造事件: 来自中条山 TTG 质片麻岩的证据. 岩石学报, 29(7): 2265—2280.
- 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等, 2004. 辽宁金伯利岩变基性岩石捕虏体地球化学及锆石年代学: 示踪华北下地壳早期演化. 中国科学(D 辑), 34(5): 412—422.
- 郑建平, 平先权, 夏冰, 等, 2013. 华北深部岩石圈存在弱的新元古代热活动的同位素年代学信息: 证据及意义. 岩石学报, 29(7): 2456—2464.