

延边官地铁矿构造背景与和龙地块太古宙地壳增生： 来自岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素证据

商青青¹, 任云生^{1*}, 陈 聪², 段明新³, 孙 琦¹, 薛世远⁴

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034
3. 武警黄金部队第三支队, 黑龙江哈尔滨 150086
4. 吉林省有色金属地质勘查局 603 队, 吉林延吉 133300

摘要: 延边地区官地铁矿床地处华北克拉通北缘与兴蒙造山带东段接合带附近的和龙地块北部, 是东北地区发现和开发较早的典型 BIF 型铁矿床之一。该矿床的主矿体呈层状、似层状、透镜状赋存于鞍山群甲山组上段。为确定该矿床的形成与变质时代以及构造背景, 重点对含矿岩系中的斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩进行岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学以及 Hf 同位素研究。原岩恢复表明, 斜长片麻岩的原岩为流纹英安质—英安质火山碎屑岩, 角闪斜长片麻岩的原岩为安山岩, 斜长角闪岩的原岩为玄武岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究发现, 官地地区在新太古代末—古元古代初期发生了岩浆作用 (2 508~2 483 Ma) 和变质事件 (2 472~2 459 Ma), 且该期岩浆—变质事件与铁矿的形成有着密切的联系。斜长角闪岩的原岩—玄武岩形成于弧后盆地环境, 反映了官地铁矿形成时的构造环境; 角闪斜长片麻岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -5.0~+4.2, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 3 182~2 889 Ma, 表明岩浆源区以中太古代古老地壳物质的熔融为主。通过与国内外典型 BIF 型铁矿床的对比研究认为, 官地铁矿属 Algoma 型 BIF, 与新太古代晚期华北克拉通大规模 BIF 成矿事件密切相关; 官地地区在新太古代初期 (2.8~2.7 Ga) 可能存在地壳增生事件; 和龙地块亲华北克拉通的构造属性, 为索伦—西拉木伦—长春缝合带的东延问题研究提供了新的证据。

关键词: Hf 同位素; 锆石 U-Pb 定年; 地壳增生; 官地铁矿; 和龙地块; 地球化学。

中图分类号: P597.3; P618.31 **文章编号:** 1000—2383(2017)12—2208—21 **收稿日期:** 2017—03—25

Tectonic Setting of Guandi Iron Deposit and Archean Crustal Growth of Helong Massif in NE China: Evidence from Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope

Shang Qingqing¹, Ren Yunsheng^{1*}, Chen Cong², Duan Mingxin³, Sun Qi¹, Xue Shiyuan⁴

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. Shenyang Center of Geology Survey, China Geological Survey, Shenyang 110034, China
3. No.3 Gold Geological Party of CAPG, Harbin 150086, China
4. The 603 Team of Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, Yanji 133300, China

Abstract: The Guandi iron deposit has been discovered and developed for several years and has been considered as a typical BIF-type iron deposit in Yanbian area, Northeast China. This deposit is located at the north part of the Helong massif, at the joint of the North China craton and the Xing'an-Mongolia orogenic belt. The stratiform and lenticular iron orebodies are dominantly hosted within the metamorphic rocks of Jiashan Formation, Anshan Group. In order to determine the formation age, metamorphic age and tectonic setting of the Guandi deposit, in this paper, the geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and zircon Hf isotope for the ore-hosting plagiogneiss, amphibole plagiogneiss and amphibolite were conducted. The results indicate that

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 课题 (No.2013CB429802); 吉黑东部地区资源远景调查评价 (No.12120113098300)。
作者简介: 商青青 (1991—), 女, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。ORCID:0000-0002-6038-411X。E-mail:2276353157@qq.com
*** 通讯作者:** 任云生, ORCID:0000-0002-5789-2834。E-mail:renys@jlu.edu.cn

引用格式: 商青青, 任云生, 陈聪, 等, 2017. 延边官地铁矿构造背景与和龙地块太古宙地壳增生, 42(12):2208—2228.

the protolith of the plagiogneiss is rhyodacite and dacite pyroclastic rock, the protolith of the amphibole plagiogneiss is andesite, the protolith of the amphibolite is basalt. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data imply that the Guandi area experienced the late Neoarchean to early Paleoproterozoic magmatic event (ca. 2 508~2 483 Ma) and metamorphic event (ca. 2 472~2 459 Ma), both of which have closely genetic relationship with the iron formation of the Guandi iron deposit. Geochemical characteristics of the ore-hosting amphibolite indicate that they formed in the back-arc basin setting, which is also interpreted as the tectonic setting of the Guandi iron deposit. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of zircon grains from amphibole plagiogneiss range from -5.0 to +4.2, and the corresponding two-stage Hf model ages (t_{DM2}) are from 3 182 Ma to 2 889 Ma, both of which indicate that the initial magma was mainly derived from the partial melting of the Mesoarchean crust. On the basis of comparison with several representative banded iron formations (BIFs) at home and abroad, it can be concluded that the Guandi iron deposit belongs to the Algoma-type BIFs, and was caused by the late Neoarchean large-scale BIF metallogenic event, which were widely developed in the North China craton. The Guandi area took place a crustal growth event at the early Neoarchean (2.8-2.7 Ga). Moreover, this paper proposes that the Helong massif has affinities to the North China Craton, which provides new evidence for the eastward termination of the Solonker-Xar Moron-Changchun suture in the Yanbian area.

Key words: Hf isotope; zircon U-Pb dating; crustal growth; Guandi iron deposit; Helong massif; geochemistry.

0 引言

条带状铁建造(BIF 型铁矿)是世界上最主要的铁矿资源类型,形成于 3.8~1.9 Ga(Huston and Logan,2004;沈保丰等,2005).我国的 BIF 铁矿主要分布于华北克拉通及其相邻区域,形成峰期为新太古代晚期(2.56~2.52 Ga)(张连昌等,2011;2012;翟明国,2012),与华北克拉通早前寒武纪岩浆活动高峰期(2.6~2.5 Ga)基本一致,但明显晚于包括华北克拉通在内的全球典型克拉通新太古代早期(2.8~2.7 Ga)地壳增生事件(Wu *et al.*,2005;翟明国,2010;Zhai and Santosh,2011;张连昌等,2012),其原因可能与新太古代晚期华北克拉通各陆块间发生强烈的侧向增生(板块俯冲-拼合)事件有关(沈其韩等,2005;Zhai *et al.*,2007;翟明国,2012;张连昌等,2013).

吉林省延边地区官地铁矿为东北地区发现和开发较早的典型 BIF 型铁矿床之一.由于该矿床地处华北克拉通北缘与兴蒙造山带接壤部位,该矿床的成矿时代、地质演化以及构造背景的研究,不仅对东北地区 BIF 型铁矿的理论研究、成矿规律总结具有重要意义,而且对区内早前寒武岩浆事件和地壳增生事件的深入探讨,以及确定该区构造归属具有重要启示意义.近年来,围绕该矿床的成矿地质条件、矿床特征和找矿方向取得了一些资料和成果(李兴国等,2010;李晨辉等,2011;卢秀全等,2014),但该矿床形成与变质时代以及构造背景等研究仍是空白.为此,本文重点选取官地矿区含矿岩系中的斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩以及斜长角闪岩,通过岩石

地球化学、锆石 U-Pb 年代学以及锆石 Hf 同位素分析,探讨该矿床的变质岩原岩类型、形成时限、地质演化、构造背景、岩浆源区以及区内太古宙地壳增生事件.

1 矿床地质特征

官地铁矿床位于华北克拉通北缘与兴蒙造山带东段接合带附近的和龙地块内(图 1).呈北西向展布的鞍山群是区内时代最老、分布最广的地层,构成和龙地块结晶基底,其自下而上可分为鸡南组、百日坪组与甲山组.其中,甲山组上段长英片麻岩层是官地铁矿区内的主要含矿地层,其主要岩性为斜长角闪岩、角闪长英片麻岩、长英片麻岩,局部夹斜长角闪岩、变粒岩(浅粒岩)、磁铁石英岩等.矿体主要赋存于大型向斜的核、翼交汇处,褶皱构造与矿体的形成有着密切的联系.区内北北西向大断裂和南西向小断裂对矿体具有不同程度的破坏作用.区内岩浆岩以花岗岩、闪长岩等脉岩为主,穿切区内主要含矿层位.

官地矿床的铁矿体主要呈层状、似层状、透镜状、扁豆状及簸箕状,产于甲山组上段长英片麻岩层,与围岩呈整合接触(图 2,图 3a).其含矿岩石以磁铁石英岩为主,其次为黑云长英片麻岩、长英质片麻岩、云母片岩、斜长浅粒岩等.矿石类型主要为条带状磁铁石英岩矿石,其次为块状磁铁角闪岩矿石.条带状磁铁石英岩中的硅质层(宽 2~3 mm)主要由石英和少量的磁铁矿组成,铁质层主要由磁铁矿和少量石英、角闪石组成;块状磁铁角闪岩主要由角闪石、磁铁矿和少量石英组成,其中角闪石含量约为 45%.

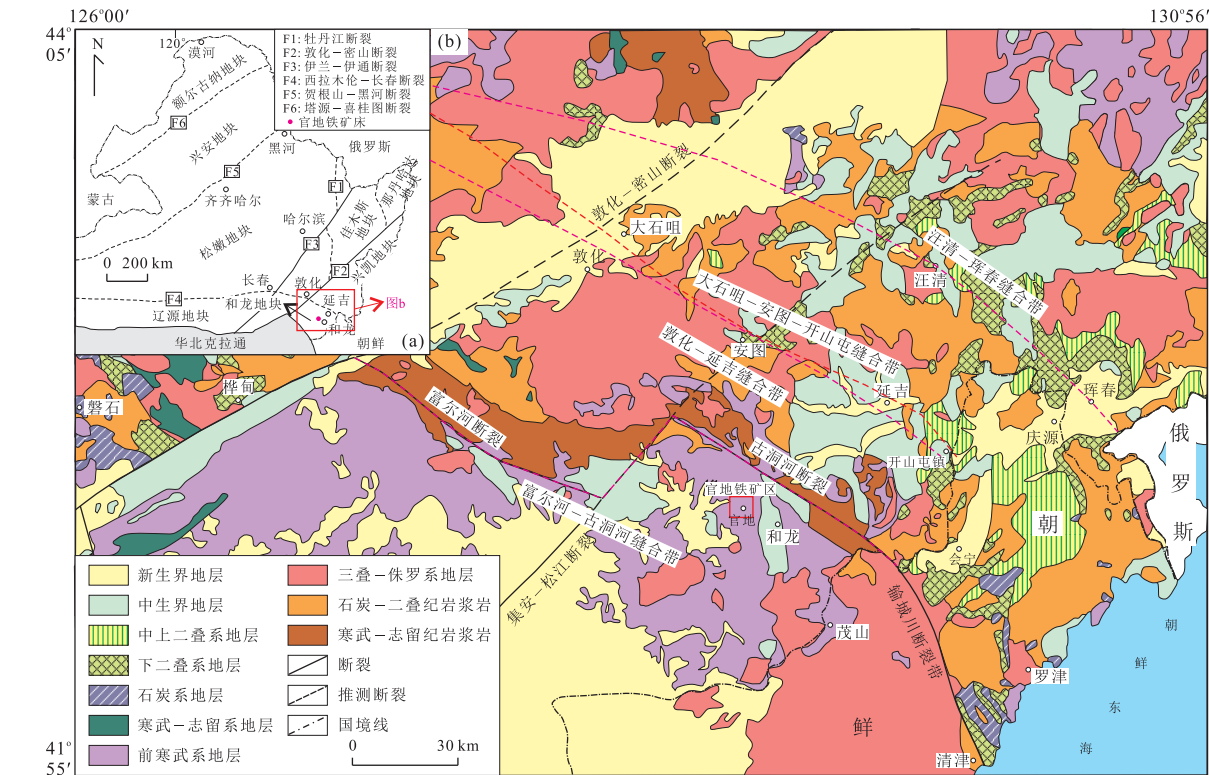


图 1 延边地区大地构造位置图(a)及区域地质图(b)

Fig.1 Tectonic location of NE China (a) and geological sketch map of Yanbian Area (b)

a.据金炳成(2012)修改;b.据 Wu et al.(2011)修改

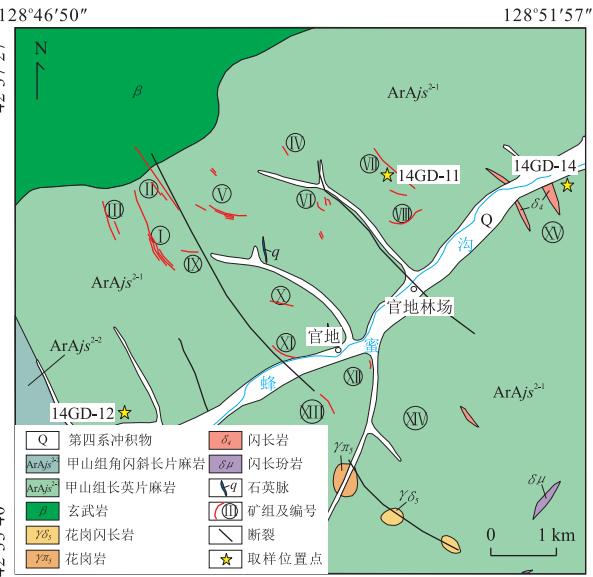


图 2 官地铁矿矿区地质图

Fig.2 Geological sketch of Guandi iron deposit

据吉林省有色金属地质勘查局 603 队(2013)修改

2 样品描述及测试方法

对矿区内含矿岩系中的斜长片麻岩(样品编号为

15GD-11)、角闪斜长片麻岩(样品编号为15GD-12)和斜长角闪岩(样品编号为15GD-14)进行主微量元素分析、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年和 Hf 同位素分析. 3 件样品的取样位置分别为:128°50.103'E,42°36.451' N;128°47.607' E,42°34.694' N;128°51.777' E,42°36.385'N(图 2).野外剖面观察分析发现,区内矿体的含矿岩石主要为斜长角闪岩、斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩,铁矿体与围岩产状一致,二者常呈整合接触,其中,斜长片麻岩产于矿体上盘,而角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩产于矿体下部,表明含矿变质岩与矿体在时空上关系密切(图 3a).

斜长片麻岩:片麻状构造,细粒板粒状变晶结构,主要由 30%斜长石(0.1~0.6 mm,轻微绢云母化)和 30%石英(0.1~0.3 mm)组成,其次为 20%绿帘石(0.1~0.3 mm)、18%云母以及少量磁铁矿.其中褐绿色黑云母呈鳞片状,粒径为 0.1~0.3 m,轻微绿泥石化(图 3b).

角闪斜长片麻岩:片麻状构造,中细粒柱状板状变晶结构,主要由 58%斜长石(0.5~2.5 mm)、40%角闪石(0.5~3.0 mm,轻微绿泥石化)和少量绿帘石组成(图 3c).

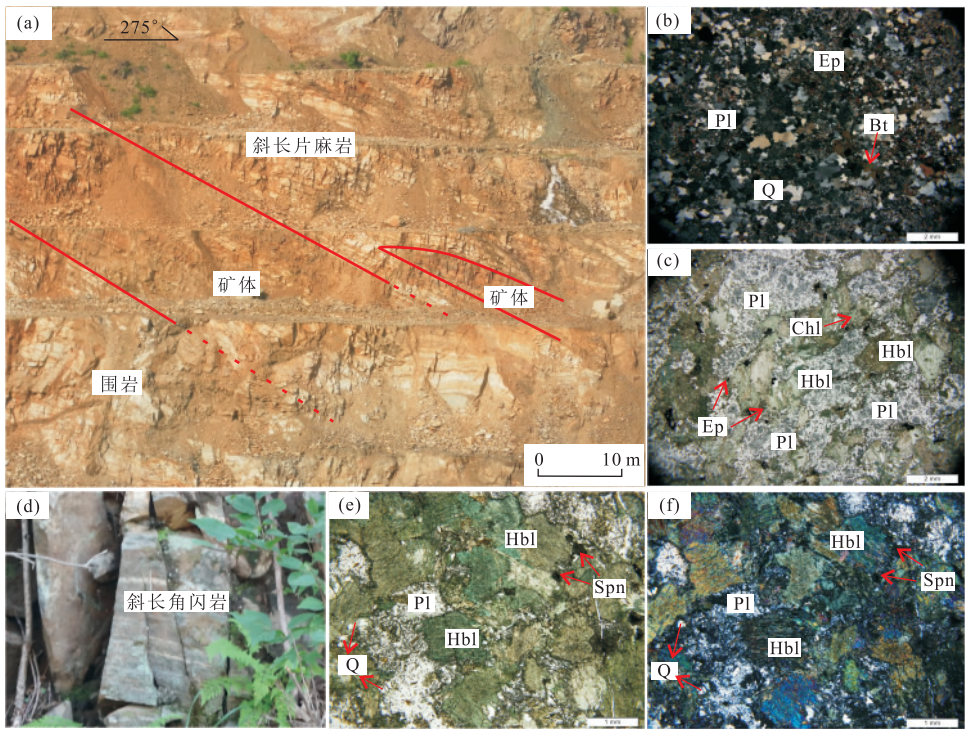


图 3 官地铁矿矿体特征(a)及斜长片麻岩(b)、角闪斜长片麻岩(c)与斜长角闪岩(d~f)的岩相学特征

Fig.3 Orebody characteristics (a) and petrographic characteristics of plagiogneiss (b), amphibole plagiogneiss (c), amphibolite (d–f) from Guandi iron deposit

Pl.斜长石;Hbl.角闪石;Q.石英;Bt.黑云母;Ep.绿帘石;Chl.绿泥石;Spn.榍石

斜长角闪岩:片麻状构造,中细粒板柱状变晶结构,主要由 66%角闪石(0.5~3.0 mm)、34%斜长石(0.5~2.5 mm)和少量榍石组成(图 3d~3f)。

主量和微量元素测试在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心完成。主量元素采用 Leeman Prodigy ICP-OES(美国)等离子体质谱仪分析完成,大部分检测精度优于 1%;微量元素和稀土元素的测试分析采用 ICP-MS-7500a 型激光等离子体质谱仪(美国 Agilent)完成,分析精度优于 5%。分析结果如表 1 所示。

锆石单矿物的挑选、样品的制靶和反射光、透射光照相以及锆石阴极发光(CL)图像均由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石 U-Th-Pb 同位素测试及锆石微量元素分析在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室完成,采用 COMPEXPro 型 193 nm ArF 准分子激光器,束斑直径为 32 μm,每测定 6 个样品点测定一个锆石 91500 和一个 NIST610,年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正,元素浓度计算采用 NIST610 作外标,Si 作内标(Wiedenbeck *et al.*,1995),同位素比值及年龄误差均为 1σ。其具

体试验测定过程可参见侯可军等(2009)。锆石同位素数据相关处理用 Glitter 4.0 完成,运用 Anderson 进行普通铅校正(Andersen *et al.*,2002),运用 Iso-plot 3.0 计算锆石加权平均值(Ludwig,2003),并绘制锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 5),运用 minipet 2.02 绘制²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-Th/U 年龄图解和稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 6)。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,采用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),测试中采用 He 作为剥蚀物质载气,束斑直径 40 μm,激光剥蚀时间为 26 s,同时使用锆石国际标样 GJ-1 作外标,分析过程中锆石标准 GJ-1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 015±8(2σ,n=10)。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

官地矿区不同岩石类型的主量元素分析结果表

表 1 官地铁矿含矿岩石主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) contents of the ore-hosting rocks from Guandi iron deposit

样品号	斜长片麻岩					角闪斜长片麻岩					斜长角闪岩				
	15GD-11-1	15GD-11-2	15GD-11-3	15GD-11-4	15GD-11-5	15GD-12-1	15GD-12-2	15GD-12-3	15GD-12-4	15GD-12-5	15GD-14-1	15GD-14-2	15GD-14-3	15GD-14-4	
SiO ₂	76.29	77.13	76.31	76.9	74.05	62.98	63.3	62.49	62.42	63.91	53.07	52.72	54.97	54.81	
TiO ₂	0.11	0.09	0.25	0.13	0.28	0.57	0.55	0.60	0.58	0.57	0.84	0.90	0.88	1.00	
Al ₂ O ₃	11.78	11.84	11.39	11.46	11.44	13.73	13.41	13.76	13.58	13.59	13.65	13.62	13.40	13.70	
TF _{e2} O ₃	1.64	1.68	2.66	1.80	3.21	4.96	4.82	5.07	5.26	4.47	11.90	12.39	10.96	10.96	
MnO	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.21	0.20	0.18	0.18	
MgO	0.51	0.54	0.58	0.54	0.62	2.94	2.84	2.97	3.01	2.38	6.20	6.44	5.52	5.33	
CaO	1.81	1.24	2.26	1.62	2.39	3.70	3.79	3.71	3.66	3.76	8.59	8.16	8.55	8.15	
Na ₂ O	4.63	4.47	3.46	4.26	3.58	5.57	5.68	5.74	5.76	6.01	2.05	1.80	2.20	2.41	
K ₂ O	1.25	1.37	1.34	1.42	1.78	0.54	0.52	0.52	0.74	0.61	0.49	0.57	0.38	0.34	
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.05	0.01	0.05	0.21	0.21	0.24	0.21	0.20	0.07	0.08	0.14	0.14	
LOI	1.36	1.05	1.08	1.26	1.93	3.73	3.81	3.82	3.68	3.45	1.51	1.70	1.46	1.63	
Total	99.44	99.47	99.44	99.46	99.39	99.01	99.01	99.00	98.98	99.03	98.58	98.58	98.64	98.65	
DF	1.82	1.12	0.01	1.06	0.76	3.20	3.48	3.49	3.52	4.43	—	—	—1.90	—1.62	
Li	1.56	0.98	2.73	1.32	4.38	6.46	7.21	6.52	7.19	5.31	14.06	18.71	14.29	16.68	
P	156.10	133.60	389.40	140.20	447.40	1 206.00	1 348.00	1 401.00	1 312.00	1 248.00	484.40	542.40	952.80	943.00	
K	15 804.00	15 182.00	15 004.00	16 502.00	22 560.00	5 862.00	6 496.00	5 764.00	8 836.00	7 226.00	5 538.00	6 660.00	4 474.00	3 970.00	
Sc	3.17	1.95	4.35	3.43	6.07	11.16	11.45	10.52	14.95	9.78	42.74	46.86	43.94	38.92	
Ti	895.60	680.40	1 882.00	973.40	2 286.00	3 970.00	4 376.00	4 298.00	4 426.00	4 354.00	5 734.00	6 478.00	6 316.00	7 114.00	
V	20.70	18.90	34.10	19.90	45.00	99.50	108.10	105.80	128.30	100.70	344.20	369.00	337.00	326.60	
Cr	30.78	26.66	27.34	33.92	32.74	129.40	146.20	136.50	161.40	122.60	316.80	356.00	354.40	283.20	
Mn	534.60	427.80	501.60	572.00	633.40	665.40	777.20	693.40	720.00	711.00	1 851.00	1 863.00	1 763.00	1 669.00	
Co	2.65	2.27	3.12	2.90	5.24	12.90	13.39	10.53	13.90	20.10	43.14	50.84	43.08	41.76	
Ni	12.30	12.26	11.43	13.20	17.05	43.76	52.02	50.42	55.04	43.94	100.10	116.30	109.30	119.30	
Cu	4.15	5.37	6.24	4.67	8.88	36.46	53.20	48.26	42.18	50.24	23.20	27.48	36.58	49.40	
Zn	14.26	23.00	25.46	18.98	20.26	41.78	47.66	46.20	46.82	35.30	105.90	107.50	103.00	96.94	
Ga	17.91	15.26	16.36	16.68	19.73	19.48	22.50	21.32	22.10	20.58	21.40	22.62	22.36	21.98	
Rb	28.46	27.34	22.18	29.68	34.20	8.80	9.25	8.37	12.38	10.19	10.15	11.51	7.21	6.71	
Sr	198.20	132.10	336.20	161.50	238.40	444.00	515.60	476.40	461.60	493.20	387.00	375.60	429.80	438.00	
Y	4.12	3.06	5.31	3.89	9.08	13.14	13.88	13.39	15.91	12.46	29.36	32.46	28.00	27.42	
Zr	95.98	64.58	93.31	107.80	126.6	98.75	101.90	174.60	124.30	183.80	80.36	51.42	64.36	58.28	
Nb	0.70	0.54	1.38	0.70	2.25	4.69	5.52	5.35	4.55	5.80	4.78	4.73	5.70	7.54	
Cs	0.22	0.16	0.18	0.22	0.37	0.31	0.29	0.24	0.41	0.30	0.36	0.31	0.21	0.23	
Ba	659.20	608.40	757.80	693.60	1 102.00	286.40	326.20	296.20	386.80	352.80	210.00	284.80	199.90	164.80	
La	16.22	15.90	38.32	14.46	57.52	23.32	28.02	27.06	26.32	26.36	12.83	12.86	14.90	13.54	
Ce	21.46	20.54	59.40	19.26	84.74	45.86	58.06	55.48	57.98	50.94	30.62	29.74	35.34	31.44	

续表 1

样品号	斜长片麻岩					角闪斜长片麻岩					斜长角闪岩				
	15GD-11-1	15GD-11-2	15GD-11-3	15GD-11-4	15GD-11-5	15GD-12-1	15GD-12-2	15GD-12-3	15GD-12-4	15GD-12-5	15GD-14-1	15GD-14-2	15GD-14-3	15GD-14-4	
Pr	1.71	1.60	4.75	1.53	7.18	5.41	6.15	5.91	6.26	5.58	4.13	3.87	4.63	4.04	
Nd	5.15	4.71	16.02	4.58	24.42	22.64	25.30	24.12	26.76	22.64	18.89	17.20	20.94	18.00	
Sm	0.64	0.53	2.12	0.56	3.38	4.28	4.64	4.37	5.27	4.06	4.77	4.35	5.00	4.39	
Eu	1.02	0.90	1.34	0.92	1.57	1.29	1.44	1.37	1.52	1.33	1.32	1.33	1.40	1.30	
Gd	0.60	0.47	1.88	0.52	2.93	3.61	3.90	3.67	4.51	3.43	5.15	4.91	5.16	4.80	
Tb	0.08	0.06	0.20	0.07	0.32	0.45	0.47	0.45	0.56	0.42	0.80	0.80	0.77	0.74	
Dy	0.56	0.43	1.02	0.54	1.73	2.46	2.60	2.48	3.10	2.30	5.13	5.36	4.86	4.74	
Ho	0.13	0.10	0.19	0.13	0.32	0.46	0.48	0.46	0.57	0.43	1.02	1.12	0.97	0.94	
Er	0.46	0.33	0.53	0.46	0.91	1.30	1.38	1.34	1.58	1.24	3.06	3.45	2.90	2.81	
Tm	0.07	0.05	0.07	0.07	0.12	0.17	0.18	0.18	0.21	0.17	0.42	0.49	0.41	0.39	
Yb	0.53	0.38	0.48	0.53	0.82	1.11	1.19	1.18	1.32	1.09	2.82	3.31	2.75	2.59	
Lu	0.09	0.06	0.08	0.08	0.13	0.16	0.17	0.17	0.19	0.16	0.40	0.47	0.40	0.38	
Hf	2.24	1.59	2.13	2.53	2.91	2.15	2.30	3.84	2.91	3.96	2.10	1.39	1.67	1.54	
Ta	0.03	0.05	0.08	0.04	0.11	0.25	0.33	0.32	0.27	0.30	0.30	0.35	0.50	0.86	
Pb	22.14	8.21	12.25	28.78	16.51	11.52	8.40	8.40	14.58	7.24	14.38	13.68	22.26	18.38	
Th	0.26	0.13	0.49	0.34	1.25	0.15	0.17	0.18	0.07	0.09	1.12	1.07	1.38	1.49	
U	0.23	0.16	0.12	0.19	0.23	0.08	0.08	0.09	0.08	0.06	0.34	0.21	0.47	0.55	
ΣREE	48.71	46.07	126.40	43.72	186.10	112.50	134.00	128.30	136.10	120.10	91.36	89.25	100.40	90.11	
LREE	46.19	44.19	121.9	41.31	178.80	102.80	123.60	118.30	124.10	110.90	72.55	69.34	82.21	72.72	
HREE	2.53	1.88	4.44	2.41	7.29	9.71	10.38	9.93	12.02	9.23	18.81	19.91	18.22	17.40	
REE/HREE	18.30	23.50	27.50	17.20	24.50	10.60	11.90	11.90	10.30	12.00	3.86	3.48	4.51	4.18	
La _N /Yb _N	21.80	30.30	56.80	19.50	50.30	15.10	16.90	16.40	14.40	17.30	3.26	2.79	3.89	3.75	
δEu	4.97	5.38	2.01	5.12	1.49	0.98	1.01	1.02	0.93	1.06	0.81	0.87	0.83	0.86	
δCe	0.81	0.80	0.92	0.82	0.87	0.97	1.04	1.03	1.07	0.98	1.03	1.02	1.04	1.03	
x ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.20	4.98	4.72	4.74	
x ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.24	4.67	4.28	4.02	

注: DF=10.44-0.21 * SiO₂-0.32 * Fe₂O₃(total Fe)-0.98 * MgO+0.55 * CaO+1.46 * Na₂O+0.54 * K₂O, 引自 Shaw(1972); δCe=2Ce_N/(La_N+Pr_N), δEu=2Eu_N/(Sm_N+Gd_N), 球粒陨石标准化数据引自 Taylor and McLennan(1985); x₁ = -2.69 * lg(Cr) - 3.18 * lg(V) - 1.25 * lg(Ni) + 10.57 * lg(Co) + 7.73 * lg(Sc) + 7.54 * lg(Sr) - 1.95 * lg(Ba) - 1.99 * lg(Zr) - 19.58, x₂ = 3.89 * lg(Co) + 3.99 * lg(Sc) - 8.63, 引自 Shaw and Kudo(1965).

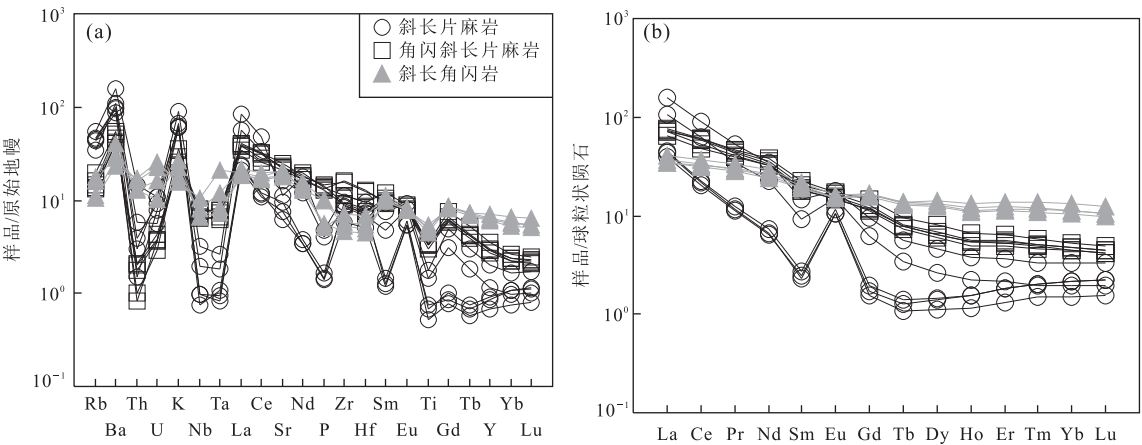


图 4 官地铁矿区含矿岩石微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)

Fig.4 Primitive-mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the ore-hosting rocks from Guandi iron deposit

原始地幔标准化值与球粒陨石标准化值分别据 Sun and McDonough(1989)与 Taylor and McLennan(1985)

明,在主量元素的平均含量上,斜长片麻岩与长英质火成岩类相似, SiO_2 含量为 76.14%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 5.51%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, TFe_3O_2 为 2.20%, MgO 和 CaO 含量较低;角闪斜长片麻岩与中性岩类接近, SiO_2 含量为 63.02%, $\text{MgO} + \text{CaO}$ 为 6.55%, Na_2O 为 5.75%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, TFe_3O_2 为 4.92%;斜长角闪岩与中性—基性岩类相似, SiO_2 含量为 53.89%, $\text{MgO} + \text{CaO}$ 为 14.20%, TFe_3O_2 为 11.60%, Na_2O 为 2.12%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$.

不同岩性的微量元素组成特征分析表明(表 1, 图 4a),3 种岩性的样品均表现为富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素,而亏损 Th、Nb、Ta、Ti 等高场强元素.其中斜长片麻岩中 ΣREE 含量变化范围较大,位于 $43.72 \times 10^{-6} \sim 186.10 \times 10^{-6}$,平均值为 90.19×10^{-6} , LREE/HREE 为 17.16~27.46, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 19.46~56.79,属轻稀土明显富集型, Eu 正异常明显 ($\delta\text{Eu} = 1.49 \sim 5.39$), Ce 负异常明显 ($\delta\text{Ce} = 0.78 \sim 0.89$);角闪斜长片麻岩 ΣREE 含量相对较高且较为稳定,介于 $112.50 \times 10^{-6} \sim 136.10 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 126.20×10^{-6} , LREE/HREE 为 10.32~12.01, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 14.35~17.30,属轻稀土富集型, Eu 和 Ce 异常均不明显 ($\delta\text{Eu} = 0.93 \sim 1.06$, $\delta\text{Ce} = 0.93 \sim 1.03$);斜长角闪岩 ΣREE 含量较为稳定,介于 $89.25 \times 10^{-6} \sim 100.40 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 92.79×10^{-6} , LREE/HREE 为 3.48~4.51, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 2.79~3.89,属轻稀土轻微富集型, Eu 负异常明显 ($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 0.86$), Ce 负异常不明显 ($\delta\text{Ce} = 0.98 \sim 0.99$).

结合不同岩性的稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(图 4b),三者倾斜程度逐渐减小,前两者属右倾型,表明两者轻重稀土存在着不同程度的分馏,而斜长角闪岩的稀土元素分配模式更趋向于平坦型,与玄武岩较为相似.

3.2 锆石 U-Pb 定年

不同样品中的锆石颗粒边部均较为圆滑,多为椭圆状;斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩的锆石颗粒较大,长度约为 130~200 μm ,宽度约为 90~150 μm ,长宽比为 3:2~2:1,多具核边结构,核部较暗,具微弱岩浆环带,为岩浆成因,边部较亮,无分带或弱分带,多为变质成因;而斜长角闪岩的锆石颗粒较小,长度约为 60~100 μm ,宽度约为 60~80 μm ,长宽比为 1:1~5:3,仅部分核边结构发育,核部岩浆环带清晰,为岩浆成因,边部较亮,无分带,为变质成因.结合锆石 CL 图像及 U-Pb 谐和年龄图(图 5),除去个别较不和谐的年龄数据,按成因类型可将锆石测年数据分成两组,分别为岩浆核年龄和变质边年龄.

斜长片麻岩中 35 个锆石核部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2 581~2 409 Ma,上交点年龄为 $2\,542 \pm 37$ Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,493 \pm 13$ Ma (图 5a),在误差范围内基本一致;11 个边部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2 489~2 402 Ma,上交点年龄为 $2\,467 \pm 47$ Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,459 \pm 13$ Ma,在误差范围内基本一致(图 5b).岩浆核 Th、U 的质量分数分别为 $6.70 \times 10^{-6} \sim 486.99 \times 10^{-6}$ 和 $9.03 \times 10^{-6} \sim 584.06 \times 10^{-6}$, Th/U 值为

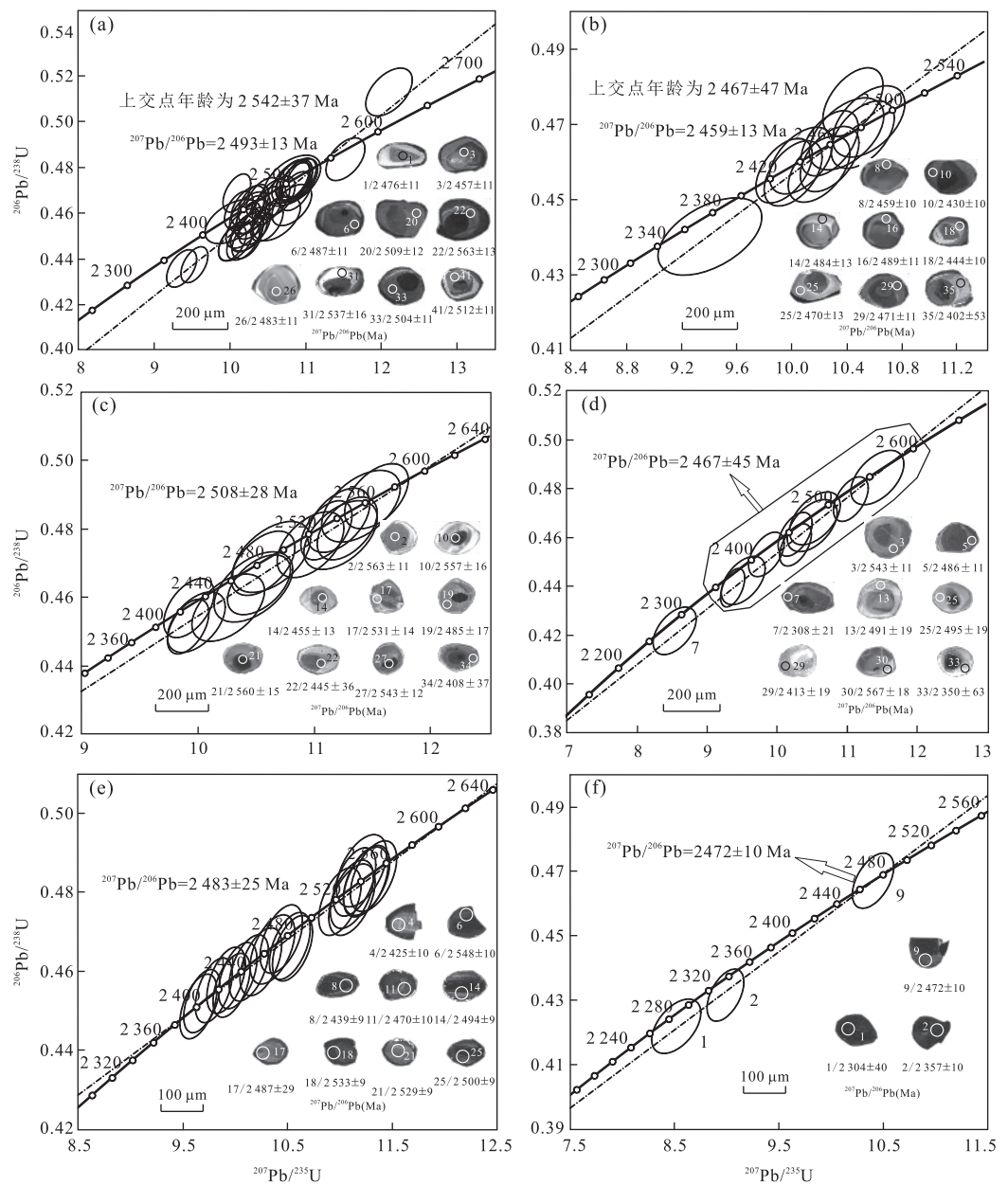


图 5 官地铁矿含矿岩石锆石 U-Pb 谐和年龄图以及典型 CL 图像

Fig.5 Concordia U-Pb ages and representative cathodoluminescence (CL) images for zircon grains from the ore-hosting rocks of Guandi iron deposit

a.斜长片麻岩锆石岩浆核部;b.斜长片麻岩锆石变质边部;c.角闪斜长片麻岩锆石岩浆核部;d.角闪斜长片麻岩锆石变质边部;e.斜长角闪岩锆石岩浆核部;f.斜长角闪岩锆石变质边部

0.28~6.11; 变质边部 Th、U 的质量分数分别为 $7.24 \times 10^{-6} \sim 79.79 \times 10^{-6}$ 和 $14.52 \times 10^{-6} \sim 52.40 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.29~2.26(表 2, 图 6a)。岩浆核 $\Sigma \text{REE} = 157.23 \times 10^{-6} \sim 1452.55 \times 10^{-6}$, 变质边 $\Sigma \text{REE} = 245.95 \times 10^{-6} \sim 936.69 \times 10^{-6}$ (图 6b)。在锆石的稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 6b)上, 核部 Ce 正异常($\delta \text{Ce} = 31.08 \sim 75.77$)及 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.04 \sim 0.25$); 边部 Ce 正异常($\delta \text{Ce} = 39.00 \sim$

77.20)及 Eu 负异常($\delta \text{Eu} = 0.04 \sim 0.12$)。

角闪斜长片麻岩中 15 个锆石核部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2567~2430 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2508 ± 28 Ma(图 5c); 9 个边部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2567~2339 Ma, 加权平均年龄为 2467 ± 45 Ma(图 5d)。岩浆核 Th、U 的质量分数分别为 $1.32 \times 10^{-6} \sim 324.59 \times 10^{-6}$ 和 $9.53 \times 10^{-6} \sim 488.12 \times 10^{-6}$, Th/U

表 2 官地铁矿区含矿岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果(单位:Ma)

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the ore-hosting rocks from Guandi iron deposit

测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
斜长片麻岩											
15GD-11-01	69.75	36.27	1.92	0.161 95	0.002 15	10.434 54	0.150 98	0.467 29	0.005 93	2 476	11
15GD-11-02	21.53	26.27	0.82	0.158 60	0.002 21	10.066 36	0.151 53	0.460 30	0.005 91	2 441	11
15GD-11-03	57.61	41.13	1.40	0.160 17	0.002 15	10.240 38	0.149 66	0.463 68	0.005 89	2 457	11
15GD-11-05	92.60	34.64	2.67	0.164 06	0.002 08	10.221 60	0.142 96	0.451 85	0.005 66	2 498	11
15GD-11-06	63.36	30.86	2.05	0.163 02	0.002 25	10.072 72	0.150 60	0.448 11	0.005 74	2 487	11
15GD-11-07	69.52	62.13	1.12	0.160 79	0.001 90	10.302 68	0.136 01	0.464 69	0.005 71	2 464	10
15GD-11-08	38.61	47.46	0.81	0.160 32	0.001 91	10.275 88	0.136 98	0.464 84	0.005 73	2 459	10
15GD-11-09	187.67	102.16	1.84	0.157 81	0.001 70	9.523 42	0.117 18	0.437 66	0.005 27	2 432	9
15GD-11-10	52.26	41.37	1.26	0.157 62	0.001 95	9.944 85	0.136 24	0.457 59	0.005 68	2 430	10
15GD-11-11	26.81	25.34	1.06	0.172 44	0.002 35	11.517 67	0.170 80	0.484 42	0.006 22	2 581	11
15GD-11-12	30.95	29.01	1.07	0.159 20	0.002 00	10.444 83	0.145 35	0.475 83	0.005 94	2 447	11
15GD-11-13	17.47	18.99	0.92	0.159 23	0.004 45	10.030 06	0.241 05	0.456 87	0.006 51	2 447	48
15GD-11-14	8.16	14.52	0.56	0.162 69	0.002 49	10.558 18	0.172 75	0.470 67	0.006 24	2 484	13
15GD-11-15	62.99	56.31	1.12	0.166 15	0.002 01	10.861 23	0.146 50	0.474 10	0.005 87	2 519	10
15GD-11-16	26.02	32.37	0.80	0.163 24	0.002 16	10.514 93	0.152 11	0.467 16	0.005 92	2 489	11
15GD-11-17	102.88	46.44	2.22	0.164 54	0.001 91	10.317 53	0.134 77	0.454 77	0.005 57	2 503	10
15GD-11-18	79.79	35.34	2.26	0.158 90	0.002 00	10.009 77	0.139 12	0.456 88	0.005 70	2 444	10
15GD-11-19	56.61	63.11	0.90	0.166 79	0.001 91	10.939 86	0.141 67	0.475 70	0.005 82	2 526	10
15GD-11-20	24.86	29.78	0.83	0.165 13	0.002 35	10.801 27	0.166 17	0.474 40	0.006 14	2 509	12
15GD-11-21	235.93	224.37	1.05	0.155 78	0.001 64	10.083 73	0.122 59	0.469 45	0.005 63	2 410	9
15GD-11-22	43.41	23.97	1.81	0.170 56	0.002 70	12.094 84	0.204 07	0.514 29	0.006 96	2 563	13
15GD-11-23	39.12	52.40	0.75	0.161 76	0.002 00	10.273 70	0.140 97	0.460 61	0.005 72	2 474	10
15GD-11-24	120.55	64.93	1.86	0.166 17	0.002 03	10.908 22	0.148 39	0.476 09	0.005 91	2 519	10
15GD-11-25	7.24	25.38	0.29	0.161 39	0.002 62	10.399 11	0.178 85	0.467 31	0.006 31	2 470	13
15GD-11-26	66.58	42.60	1.56	0.162 60	0.002 25	10.175 65	0.153 15	0.453 88	0.005 81	2 483	11
15GD-11-28	160.39	74.02	2.17	0.164 08	0.002 16	10.557 27	0.152 37	0.466 63	0.005 90	2 498	11
15GD-11-29	31.02	44.91	0.69	0.161 50	0.002 17	10.198 09	0.149 64	0.457 96	0.005 81	2 471	11
15GD-11-31	10.02	9.03	1.11	0.167 94	0.003 15	10.610 12	0.207 25	0.458 18	0.006 56	2 537	16
15GD-11-32	486.99	125.90	3.87	0.163 93	0.001 78	10.486 15	0.130 92	0.463 91	0.005 60	2 497	9
15GD-11-33	101.73	40.32	2.52	0.164 63	0.002 10	10.172 63	0.143 59	0.448 12	0.005 61	2 504	11
15GD-11-34	414.55	77.16	5.37	0.165 06	0.001 86	10.215 36	0.131 17	0.448 83	0.005 46	2 508	10
15GD-11-35	12.53	21.90	0.57	0.155 00	0.004 74	9.405 45	0.248 36	0.440 10	0.006 77	2 402	53
15GD-11-36	104.66	324.81	0.32	0.162 52	0.001 66	10.026 84	0.119 58	0.447 44	0.005 33	2 482	9
15GD-11-37	28.84	32.33	0.89	0.164 13	0.002 35	10.244 21	0.158 53	0.452 65	0.005 85	2 499	12
15GD-11-38	80.37	88.12	0.91	0.165 11	0.001 95	10.821 48	0.143 72	0.475 33	0.005 84	2 509	10
15GD-11-39	26.00	23.61	1.10	0.161 53	0.002 59	10.260 06	0.174 93	0.460 66	0.006 18	2 472	13
15GD-11-40	329.46	97.24	3.39	0.164 83	0.001 87	10.642 14	0.137 49	0.468 24	0.005 70	2 506	10
15GD-11-41	91.77	35.27	2.60	0.165 45	0.002 21	10.840 32	0.159 03	0.475 17	0.006 03	2 512	11
15GD-11-42	12.44	27.50	0.45	0.168 95	0.002 52	10.814 31	0.173 74	0.464 22	0.006 10	2 547	12
15GD-11-43	6.70	10.41	0.64	0.165 11	0.003 67	10.813 57	0.246 79	0.474 99	0.007 36	2 509	19
15GD-11-44	343.16	97.29	3.53	0.162 15	0.001 84	10.279 53	0.132 65	0.459 77	0.005 59	2 478	10
15GD-11-45	197.30	65.70	3.00	0.167 40	0.001 92	10.858 95	0.141 49	0.470 45	0.005 74	2 532	10
15GD-11-46	163.45	584.06	0.28	0.155 61	0.001 97	9.355 51	0.131 52	0.436 01	0.005 43	2 409	11
15GD-11-47	58.01	54.61	1.06	0.166 54	0.001 98	10.482 95	0.140 54	0.456 49	0.005 62	2 523	10
15GD-11-48	89.01	286.98	0.31	0.158 70	0.001 67	10.108 49	0.123 75	0.461 93	0.005 53	2 442	9
15GD-11-49	246.53	40.34	6.11	0.162 93	0.002 17	10.284 03	0.150 78	0.457 77	0.005 79	2 486	11

续表 2

测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
角闪斜长片麻岩											
15GD-12-01	4.92	40.06	0.12	0.157 53	0.002 60	9.844 84	0.168 03	0.453 22	0.005 97	2 429	13
15GD-12-02	3.25	25.11	0.13	0.170 50	0.002 39	11.281 76	0.170 65	0.479 88	0.006 07	2 563	11
15GD-12-03	4.85	34.15	0.14	0.168 53	0.002 31	11.058 77	0.164 28	0.475 88	0.005 98	2 543	11
15GD-12-04	1.32	9.53	0.14	0.177 09	0.003 01	12.251 48	0.218 65	0.501 72	0.006 85	2 626	14
15GD-12-05	5.41	46.44	0.12	0.162 86	0.002 15	10.265 13	0.147 28	0.457 12	0.005 65	2 486	11
15GD-12-06	2.01	16.42	0.12	0.163 01	0.002 66	10.557 46	0.181 66	0.469 70	0.006 24	2 487	13
15GD-12-07	3.24	20.90	0.16	0.146 75	0.003 44	8.536 61	0.203 28	0.421 87	0.006 44	2 308	21
15GD-12-08	1.62	13.14	0.12	0.164 14	0.003 39	10.474 48	0.222 55	0.462 81	0.006 81	2 499	18
15GD-12-10	3.10	16.74	0.19	0.169 91	0.003 21	11.395 12	0.223 29	0.486 37	0.006 92	2 557	16
15GD-12-11	5.64	21.77	0.26	0.161 29	0.002 35	10.263 09	0.159 80	0.461 49	0.005 88	2 469	12
15GD-12-12	4.45	25.26	0.18	0.163 47	0.003 28	10.628 38	0.220 23	0.471 54	0.006 86	2 492	17
15GD-12-13	1.05	8.33	0.13	0.163 36	0.003 64	10.539 16	0.240 04	0.467 90	0.007 15	2 491	19
15GD-12-14	4.49	39.66	0.11	0.159 93	0.002 48	9.979 19	0.164 15	0.452 52	0.005 89	2 455	13
15GD-12-16	8.92	65.69	0.14	0.167 93	0.001 99	11.099 66	0.145 92	0.479 36	0.005 77	2 537	10
15GD-12-17	3.50	26.91	0.13	0.167 33	0.002 77	10.963 87	0.190 86	0.475 18	0.006 37	2 531	14
15GD-12-19	3.70	14.41	0.26	0.162 84	0.003 17	10.254 85	0.206 28	0.456 71	0.006 52	2 485	17
15GD-12-21	3.87	25.09	0.15	0.170 23	0.003 03	11.220 21	0.208 17	0.478 02	0.006 62	2 560	15
15GD-12-22	4.29	38.80	0.11	0.158 95	0.003 33	9.540 79	0.158 01	0.435 32	0.005 57	2 445	36
15GD-12-24	292.79	442.17	0.66	0.164 65	0.003 47	10.520 42	0.178 69	0.463 41	0.005 78	2 504	36
15GD-12-25	1.13	9.65	0.12	0.163 78	0.003 57	10.501 75	0.234 57	0.465 02	0.007 03	2 495	19
15GD-12-26	262.11	458.12	0.57	0.154 56	0.001 65	9.369 00	0.113 47	0.439 61	0.005 16	2 397	9
15GD-12-27	5.41	44.61	0.12	0.168 50	0.002 46	11.206 36	0.174 87	0.482 31	0.006 18	2 543	12
15GD-12-28	15.37	40.53	0.38	0.157 55	0.002 09	9.918 89	0.142 86	0.456 59	0.005 65	2 430	11
15GD-12-29	2.59	19.05	0.14	0.156 00	0.003 37	9.518 47	0.210 37	0.442 49	0.006 59	2 413	19
15GD-12-30	2.22	15.58	0.14	0.170 99	0.003 64	11.431 25	0.249 77	0.484 84	0.007 34	2 567	18
15GD-12-31	3.53	24.38	0.14	0.183 61	0.003 19	13.096 08	0.238 23	0.517 28	0.007 20	2 686	14
15GD-12-32	219.98	416.34	0.53	0.159 33	0.001 68	9.911 59	0.118 53	0.451 15	0.005 28	2 449	9
15GD-12-33	1.84	7.90	0.23	0.150 38	0.005 44	8.636 43	0.273 42	0.416 53	0.007 27	2 350	63
15GD-12-34	324.59	488.12	0.66	0.155 53	0.003 35	9.324 34	0.163 47	0.434 82	0.005 42	2 408	37
15GD-12-35	3.46	21.29	0.16	0.170 94	0.002 53	11.532 05	0.181 94	0.489 27	0.006 31	2 567	12
斜长角闪岩											
15GD-14-01	148.55	672.02	0.22	0.146 38	0.003 30	8.517 77	0.154 61	0.422 04	0.005 63	2 304	40
15GD-14-02	156.65	531.76	0.29	0.150 99	0.001 66	8.988 37	0.116 93	0.431 75	0.005 33	2 357	10
15GD-14-03	51.30	179.35	0.29	0.168 66	0.001 91	11.120 31	0.147 14	0.478 20	0.005 94	2 544	10
15GD-14-04	107.33	1 038.10	0.10	0.157 10	0.001 62	9.916 39	0.122 88	0.457 82	0.005 57	2 425	10
15GD-14-05	127.27	719.64	0.18	0.156 80	0.002 80	9.433 64	0.123 91	0.436 35	0.005 27	2 421	31
15GD-14-06	52.40	489.37	0.11	0.169 04	0.001 79	11.249 73	0.141 35	0.482 69	0.005 88	2 548	10
15GD-14-07	56.57	293.72	0.19	0.161 76	0.001 78	10.444 09	0.134 97	0.468 31	0.005 74	2 474	10
15GD-14-08	96.34	893.00	0.11	0.158 43	0.001 62	10.025 57	0.122 56	0.459 00	0.005 54	2 439	9
15GD-14-09	57.34	189.33	0.30	0.161 57	0.001 72	10.406 79	0.130 78	0.467 19	0.005 68	2 472	10
15GD-14-10	48.53	532.95	0.09	0.169 63	0.001 89	11.323 88	0.146 75	0.484 19	0.005 93	2 554	10
15GD-14-11	47.04	206.79	0.23	0.161 32	0.001 94	10.357 09	0.141 68	0.465 69	0.005 78	2 470	10
15GD-14-12	222.19	1 163.60	0.19	0.155 13	0.001 57	9.650 07	0.116 63	0.451 20	0.005 41	2 403	9
15GD-14-13	74.44	139.75	0.53	0.167 52	0.002 10	11.213 30	0.157 87	0.485 53	0.006 09	2 533	11
15GD-14-14	71.93	366.19	0.20	0.163 64	0.001 72	10.523 72	0.130 07	0.466 47	0.005 61	2 494	9
15GD-14-15	70.33	246.46	0.29	0.160 70	0.001 79	10.246 67	0.131 71	0.462 51	0.005 62	2 463	10
15GD-14-16	40.36	252.51	0.16	0.159 45	0.001 69	10.134 21	0.125 26	0.461 00	0.005 53	2 450	9
15GD-14-18	57.90	417.17	0.14	0.167 47	0.001 74	11.144 16	0.135 56	0.482 66	0.005 76	2 533	9
15GD-14-19	54.30	491.90	0.11	0.168 20	0.001 78	11.121 99	0.136 67	0.479 61	0.005 74	2 540	9
15GD-14-20	76.35	1 087.90	0.07	0.156 08	0.001 58	9.796 96	0.116 72	0.455 26	0.005 39	2 414	9
15GD-14-21	70.78	619.43	0.11	0.167 11	0.001 73	11.005 91	0.132 69	0.477 66	0.005 66	2 529	9
15GD-14-22	139.04	844.98	0.16	0.169 01	0.001 91	11.258 77	0.144 46	0.483 14	0.005 83	2 548	10
15GD-14-23	99.10	1 441.7	0.07	0.151 40	0.001 53	9.183 68	0.108 25	0.439 93	0.005 17	2 362	9
15GD-14-24	443.02	167.54	2.64	0.141 72	0.001 59	8.147 87	0.103 89	0.416 97	0.004 99	2 248	10
15GD-14-25	72.60	857.48	0.08	0.164 25	0.001 69	10.550 51	0.125 78	0.465 85	0.005 49	2 500	9
15GD-14-26	161.49	1 217.20	0.13	0.155 15	0.001 56	9.681 57	0.113 35	0.452 55	0.005 29	2 403	9
15GD-14-30	86.97	332.84	0.26	0.158 32	0.001 64	9.968 53	0.118 78	0.456 57	0.005 35	2 438	9

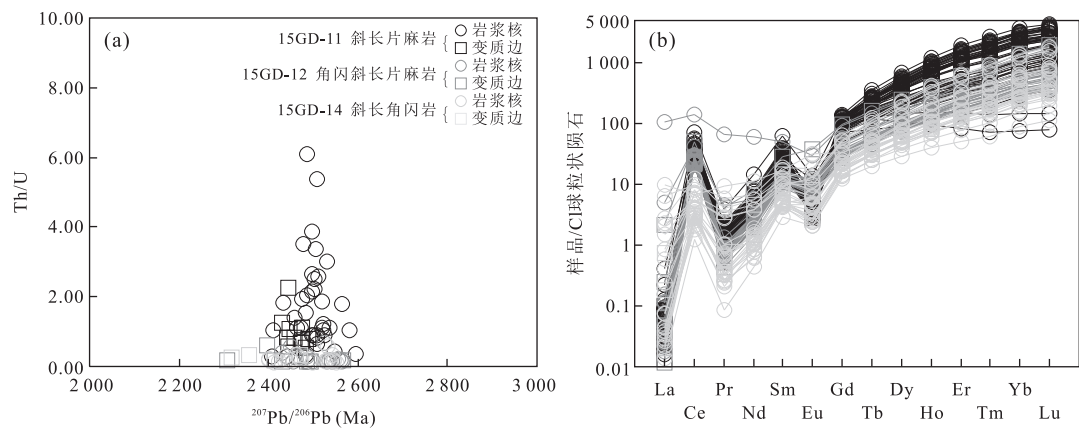


图 6 官地铁矿含矿岩石锆石 $\text{Th}/\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄图解(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)

Fig.6 Diagrams of $\text{Th}/\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma) (a), and chondrite-normalized REE patterns (b) for zircon grains from the ore-hosting rocks of Guandi iron deposit

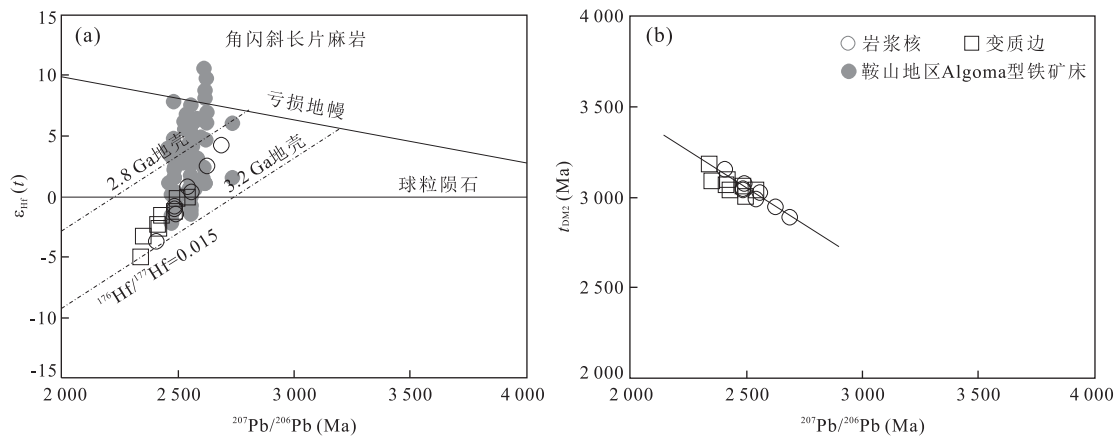


图 7 官地铁矿角闪斜长片麻岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄图解(a)和 $t_{\text{DM2}}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄图解(b)

Fig.7 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma) (a) and $t_{\text{DM2}}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma) (b) for the analyzed zircon grains from the amphibole plagiogneiss of Guandi iron deposit

鞍山地区 BIF 型铁矿床的年龄数据来自代堰铭等(2013a;2013b)

值为 $0.11\sim0.66$; 变质边 Th 、 U 的质量分数分别为 $1.05\times10^{-6}\sim262.11\times10^{-6}$ 和 $7.90\times10^{-6}\sim458.12\times10^{-6}$, Th/U 值为 $0.12\sim0.57$ (表 2, 图 6a). 岩浆核 $\Sigma\text{REE}=144.37\times10^{-6}\sim664.12\times10^{-6}$, 变质边 $\Sigma\text{REE}=157.64\times10^{-6}\sim564.09\times10^{-6}$ (图 6b). 在锆石的稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 6b)上, 核部 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=1.58\sim90.23$)及 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.29\sim0.42$); 边部 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=15.66\sim100.45$)及 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.31\sim0.59$).

斜长角闪岩中 20 个锆石核部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 $2\,554\sim2\,403\text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,483\pm25\text{ Ma}$ (图 5e); 1 个边部测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,472\pm10\text{ Ma}$ (图 5f). 岩浆核 Th 、 U 的质量分数分别为 $40.36\times10^{-6}\sim443.02\times$

10^{-6} 和 $139.75\times10^{-6}\sim1\,441.74\times10^{-6}$, Th/U 值为 $0.07\sim2.64$; 变质边 Th 、 U 的质量分数分别为 $57.34\times10^{-6}\sim156.65\times10^{-6}$ 和 $189.33\times10^{-6}\sim672.02\times10^{-6}$, Th/U 值为 $0.22\sim0.30$ (表 2, 图 6a). 岩浆核 $\Sigma\text{REE}=26.82\times10^{-6}\sim603.69\times10^{-6}$, 变质边 $\Sigma\text{REE}=102.53\times10^{-6}\sim141.31\times10^{-6}$ (图 6b). 在锆石的稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 6b)上, 核部 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=0.71\sim90.69$)及 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.39\sim1.25$); 边部 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=3.09\sim17.32$)及 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.22\sim0.52$).

此外, 在角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩中, 还发现 3 个较为年轻的锆石变质边部测点, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2\,308\pm21\text{ Ma}$ 、 $2\,304\pm40\text{ Ma}$ 、 $2\,357\pm10\text{ Ma}$.

表 3 官地铁矿区角闪斜长片麻岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of amphibole plagiogneiss from Guandi iron deposit

样品号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)
15GD-12-1	2 429	0.010 233	0.000 045	0.000 274	0.000 001	0.281 204	0.000 021	−1.5	2 803	3 037
15GD-12-3	2 543	0.007 452	0.000 070	0.000 183	0.000 001	0.281 165	0.000 020	−0.1	2 848	3 040
15GD-12-4	2 626	0.009 396	0.000 037	0.000 239	0	0.281 188	0.000 020	2.5	2 822	2 945
15GD-12-5	2 486	0.011 648	0.000 134	0.000 289	0.000 003	0.281 178	0.000 020	−1.2	2 839	3 060
15GD-12-12	2 492	0.012 597	0.000 151	0.000 309	0.000 002	0.281 169	0.000 021	−1.4	2 853	3 078
15GD-12-15	2 339	0.008 907	0.000 065	0.000 236	0.000 002	0.281 161	0.000 017	−5.0	2 858	3 182
15GD-12-19	2 485	0.006 871	0.000 036	0.000 168	0.000 001	0.281 178	0.000 020	−1.0	2 830	3 047
15GD-12-20	2 488	0.013 247	0.000 106	0.000 392	0.000 004	0.281 192	0.000 018	−0.8	2 827	3 038
15GD-12-21	2 560	0.017 999	0.000 082	0.000 466	0.000 001	0.281 182	0.000 019	0.4	2 846	3 022
15GD-12-23	2 420	0.009 092	0.000 048	0.000 239	0	0.281 176	0.000 018	−2.6	2 837	3 099
15GD-12-25	2 495	0.021 315	0.000 477	0.000 616	0.000 011	0.281 215	0.000 019	−0.2	2 812	3 006
15GD-12-27	2 543	0.007 283	0.000 046	0.000 189	0.000 001	0.281 190	0.000 020	0.8	2 815	2 987
15GD-12-29	2 413	0.008 842	0.000 173	0.000 223	0.000 004	0.281 191	0.000 020	−2.3	2 817	3 070
15GD-12-31	2 686	0.009 913	0.000 014	0.000 262	0.000 002	0.281 198	0.000 021	4.2	2 811	2 889
15GD-12-33	2 350	0.021 463	0.000 445	0.000 626	0.000 015	0.281 219	0.000 019	−3.3	2 808	3 087
15GD-12-34	2 408	0.008 522	0.000 045	0.000 218	0.000 001	0.281 153	0.000 018	−3.7	2 866	3 154

注:相关计算公式和标准值参见侯可军等(2007)。

3.3 锆石 Hf 同位素

对角闪斜长片麻岩中的锆石进行 U-Pb 测年的同时,在年龄点的同一位置上进行锆石 Hf 同位素原位微区分析.其中 8 个岩浆核测点¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.281 153~0.281 198,ε_{Hf}(*t*)值为−3.7~4.2,单阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM1})为 2 866~2 811 Ma,二阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM2})为 3 154~2 889 Ma;8 个变质边测点¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值介于为 0.281 161~0.281 219,ε_{Hf}(*t*)值均为负值(−5.0~−0.1),单阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM1})为 2 858~2 808 Ma,二阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM2})为 3 182~3 006 Ma(表 3).在 ε_{Hf}(*t*)与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄关系图解(图 7a)上,所有测点均落于 3.2~2.8Ga 地壳演化线之间,且 ε_{Hf}(*t*)值与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值显示正相关关系.在 *t*_{DM2} 与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄关系图解(图 7b)上,16 个锆石测点 *t*_{DM2} 介于 3 182~2 889 Ma 之间,与锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(2 339~2 686 Ma)显示负相关关系.

4 讨论

4.1 原岩建造类型

根据岩相学研究和岩石主量元素平均含量分析可知,官地铁矿含矿岩系中的斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩的原岩可能分别为酸性、中性和中基性火成岩.同时 3 种不同岩性岩石的稀土元素球分配模式图倾斜程度逐渐减小(图 4b),表明三者岩性存在着逐渐过渡趋势,而斜长角闪岩的稀土

元素分配模式与玄武岩较为相似,表明其原岩很可能为玄武岩.

Shaw(1972)建立的变质岩(SiO₂>53.5%)原岩性质判别函数的计算结果表明,斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩样品的 DF 值均大于 0,表明其均偏向于正变质岩;结合西蒙南(al+fm)−(c+alk)/Si 图解(Simonen, 1953)、TiO₂−SiO₂ 图解(Tarney, 1976)以及范德坎普和比克豪斯 Si-mg 图解(图 8a~8c)中,斜长片麻岩落入火成岩与沉积岩界线附近且有偏向于沉积的趋势,角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩均落入火成岩区,表明斜长片麻岩原岩很可能是介于火山岩与沉积岩之间的过渡岩石,即火山碎屑岩,角闪斜长片麻岩原岩为火成岩,而斜长角闪岩原岩有可能为火成岩.

依据基性变质岩所建立的 CaO-MgO-〈FeO〉图解(Walker *et al.*, 1959)以及 *x*₁ 和 *x*₂ 判别函数(Shaw and Kudo, 1965),斜长角闪岩落入正角闪岩类区(图 8d)且 *x*₁ 和 *x*₂ 均大于零,故斜长角闪岩原岩为火成岩.在 ACFM 图解(王仁民等, 1987)中,斜长片麻岩投入中酸性火山岩—泥质岩过渡区域,角闪斜长片麻岩投入中酸性火山岩内,斜长角闪岩投入基性火山岩及泥灰岩内(图 8e),进一步确定了斜长片麻岩的原岩为火山碎屑岩,角闪斜长片麻岩原岩为中酸性火山岩,而斜长角闪岩原岩为基性火山岩.在 Zr/TiO₂ * 0.000 1-Nb/Y 图解(Winchester and Floyd, 1977)中,斜长片麻岩落入流纹英安岩—英安岩区域,角闪斜长片麻岩落入安山岩内,斜长角

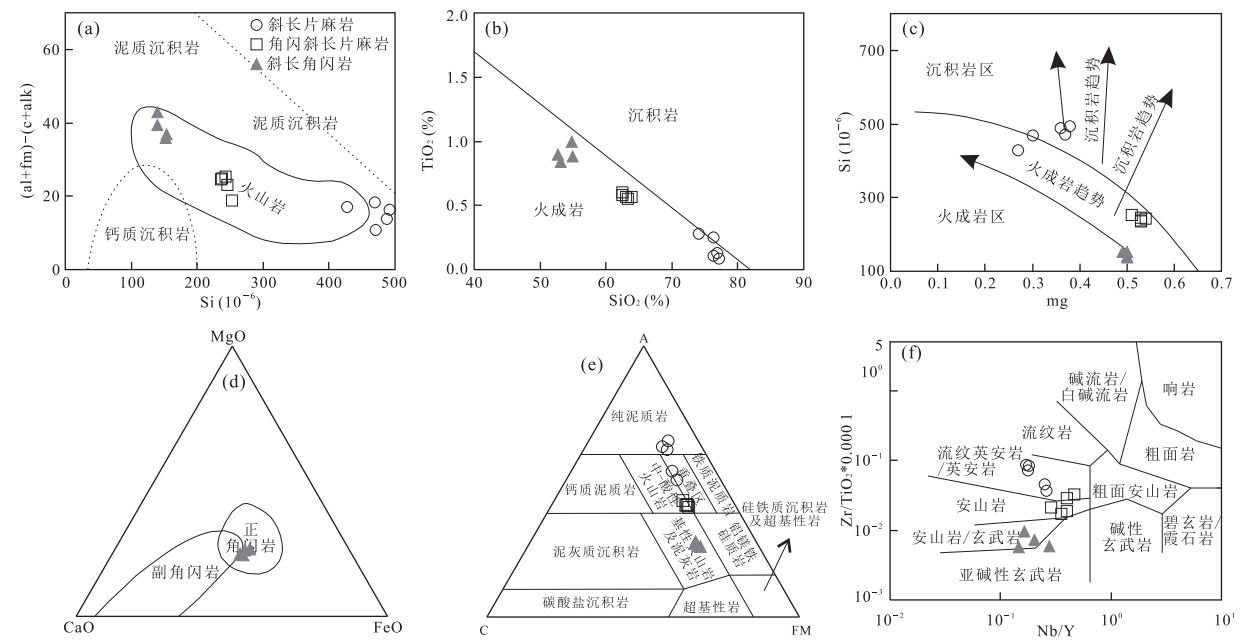


图 8 官地铁矿含矿岩石原岩恢复图解

Fig.8 Diagrams of protolith restoration for the ore-hosting rocks from Guandi iron deposit

闪岩落入玄武岩内(图 8f)。

综上所述,斜长片麻岩的原岩应为流纹英安质—英安质火山碎屑岩,角闪斜长片麻岩的原岩应为安山岩,斜长角闪岩的原岩应为玄武岩。

4.2 变质岩形成时限及区域岩浆—变质事件

在岩石中锆石的微量元素组成以及相关模式图中(图 6),3 种不同岩性变质岩的锆石中的 Th、U、 Σ REE 质量分数和 Th/U 值的平均值逐渐降低,说明三者岩性存在渐变趋势,进一步证实了上述原岩恢复结果的正确性;岩浆核的 Th、U、 Σ REE 质量分数和 Th/U 值均高于变质边,也证实了锆石核部与边部成因不同,锆石均表现富集重稀土的特征,且岩浆核与变质边均具明显 Ce 正异常和 Eu 负异常,显示岩浆成因特征(Hoskin and Schaltegger, 2003),表明变质边是在原有岩浆锆石的基础上发生重结晶作用而形成(Hoskin and Black, 2000; 吴元保和郑永飞, 2004)。因此,锆石核部测点所得加权平均年龄很可能代表了岩浆锆石的结晶年龄,间接指示原岩的形成时间;而锆石变质边部测点所得加权平均年龄很可能代表了原岩变质时限,间接指示区内变质事件的时限;3 个较为年轻的锆石变质边部测点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $2\,308\pm 21\text{ Ma}$ 、 $2\,304\pm 40\text{ Ma}$ 、 $2\,357\pm 10\text{ Ma}$,它们可能代表了区内后期改造事件的时限。

野外剖面观察发现,斜长片麻岩产于矿体上盘,

而角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩产于矿体下部,故可根据 3 种岩石的形成时限来限定矿体的形成时间,从而判断出官地铁矿的形成时间。斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩的原岩依次为流纹英安质—英安质火山碎屑岩、安山岩、玄武岩,原岩形成时间依次为 $2\,493\pm 13\text{ Ma}$ 、 $2\,508\pm 28\text{ Ma}$ 、 $2\,483\pm 25\text{ Ma}$,在误差范围内基本一致;变质时限依次为 $2\,459\pm 13\text{ Ma}$ 、 $2\,467\pm 45\text{ Ma}$ 、 $2\,472\pm 10\text{ Ma}$,在误差范围内基本一致。

可见,新太古代末—古元古代初期($2\,508\sim 2\,483\text{ Ma}$),官地地区发生了基性—中酸性火山喷发事件,初期以大面积玄武质岩浆喷出为主,末期以安山质—流纹英安质岩浆的喷出为主,伴随着火山沉积作用,形成原始含铁建造层—玄武岩、安山岩和流纹英安质—英安质火山碎屑岩等;而后在古元古代初期($2\,472\sim 2\,459\text{ Ma}$),区内遭受区域变质作用,形成区内变质岩系—斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩和斜长片麻岩等;随后在 $2\,357\sim 2\,304\text{ Ma}$ 期间,受后期构造热事件改造影响,区内成矿物质重新活化、迁移和聚集。

官地铁矿的形成与新太古代末—古元古代初的岩浆事件($2\,508\sim 2\,483\text{ Ma}$)有着密切的联系,该期岩浆事件很可能代表了一个火山—沉积旋回(沈保丰和骆辉, 1994)。

4.3 官地铁矿构造背景及成因类型

利用地球化学性质稳定的高场强元素,尤其是

Zr、Hf、Nb、Ta 以及 HREE,可以对岩石的构造环境进行有效的示踪.斜长角闪岩 $Zr/Hf=37.10\sim 38.63$, $Nb/Ta=8.77\sim 15.79$, $Th/Ta=1.73\sim 3.69$,与弧后盆地玄武岩最为接近(38.13,14.88,3.69); $Sm/Nd=0.24\sim 0.25$,与岛弧玄武岩最为接近(0.24;杨婧等,2016a,2016b).斜长角闪岩的 Y/Nb 值为 $3.64\sim 6.86$,符合拉斑玄武岩的特征(Pearce and Cann,1973).在 $Ti-Zr-Y$ 和 $Ti-Zr$ 判别图解(Pearce and Cann,1973)中,斜长角闪岩的样品多数落于 MORB 和岛弧拉斑玄武岩区(图 9a、9b).在 $Zr/Y-Zr$ 判别图解(Pearce and Norry,1979)中,样品均落入 MORB 和火山弧玄武岩区域(图 9c).

以上研究表明,斜长角闪岩的原岩具有岛弧拉斑玄武岩与洋中脊玄武岩(MORB)的双重特征.弧后盆地玄武岩既具有洋中脊的特征,又具有岛弧的特征(Fretzdorff *et al.*,2002;Taylor and Martinez,2003;Gill,2010),故斜长角闪岩的原岩—玄武岩形成于弧后盆地中,间接指示了官地地区铁矿沉积时(2 556~2 542 Ma)的构造背景.华北克拉通东部地块的岩浆作用一直延续到了 25×10^{-9} a,并发生了 $26\sim 25\times 10^{-9}$ a 的变质作用(Kröner *et al.*,1998;Zhao *et al.*,2001);到了 25×10^{-9} a 左右,和龙地块发生了一次重要的新太古代末—古元古代初期的俯冲—碰撞拼合事件(翟明国,2012;张连昌等,2013;李忠水,2016;沈其韩等,2016).故官地铁矿很可能形成于俯冲—碰撞拼合背景下的弧后盆地环境中.

Zhai and Santosh(2011)和沈其韩等(2016)对华北克拉通前寒武纪演化史的研究表明,华北克拉通各微陆块在 2.6~2.5 Ga 以陆—陆碰撞、弧—弧碰撞、弧—陆碰撞的形式拼合;2.5~2.45 Ga,以各陆块间的变质和岩浆侵入作用为标志,华北克拉通基本形成;而在此期间,华北克拉通内鞍本地区处于岛弧或弧后+地幔柱背景下.这也进一步证实了

官地铁矿形成于弧后盆地环境.

根据条带状铁建造(BIF)的形成条件,可将 BIF 型铁矿分为 Algoma 型和 Superior 型(Gross,1980).Algoma 型 BIF 单层厚度较小,通常分布于绿岩带附近,常与镁铁质、超镁铁质和长英质的火山岩或火山碎屑岩相关联,一般形成于岛弧—弧后盆地或克拉通内裂谷带环境;而 Superior 型 BIF 规模较大,常与碎屑岩—碳酸盐岩相密切伴生,一般形成于被动大陆边缘或克拉通盆地环境(Gross,1983).

绿岩带主要由基性—酸性火山旋回组成,其被变质沉积岩分隔,多经历了低绿片岩相或绿片岩相—角闪岩相,有些甚至达到麻粒岩相的区域变质作用(如 Superior 绿岩带中的 North Caribou 绿岩带和 Abitibi 绿岩带;Biczok *et al.*,2012;Thurston *et al.*,2012).华北克拉通太古宙绿岩带由以镁铁质为主的变火山—沉积岩系组成,多分布在花岗岩类或灰色片麻岩内,自下而上可分为下部的变镁铁质火山岩、中部的变长英质—安山质火山岩和上部的变浊积岩、变碳酸盐岩(沈保丰和骆辉,1994).前人将吉林省太古宙绿岩地体分为早期绿岩带和晚期绿岩带,其中和龙地块内的绿岩相当于晚期绿岩带的上部(杨复顶等,2009),其原岩由基性—中酸性火山岩或火山碎屑岩及沉积岩组成.

通过官地铁矿与国内外典型 Algoma 型铁矿(鞍山—本溪地区弓长岭铁矿和朝鲜茂山铁矿)、Algoma 型向 Superior 型过渡型铁矿(鞍山—本溪地区西鞍山铁矿)和 Superior 型铁矿(山西袁家村铁矿)在成矿地质条件、矿床地质特征、成因类型以及成矿构造背景等方面的对比研究发现(表 4),官地铁矿与弓长岭铁矿、茂山铁矿的含矿变质岩系原岩均主要为一套基性—中酸性火山沉积建造,变质程度均主要为角闪岩相的中级区域变质,构造背景为弧后、岛弧或活动大陆边缘环境;而西鞍山铁矿和袁

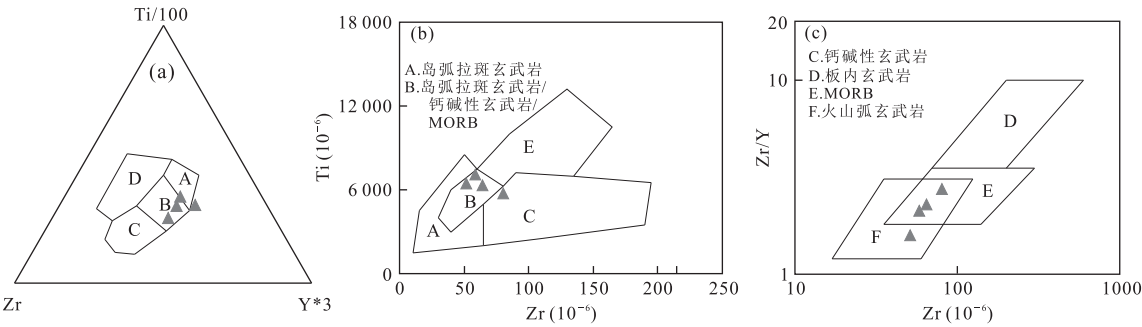


图 9 官地铁矿斜长角闪岩构造判别图解

Fig.9 Tectonic discrimination diagrams of amphibolite from Guandi iron deposit

表 4 官地铁矿与国内外 BIF 型铁矿对比

Table 4 Comparison among Guandi iron deposit and BIF-type iron deposits at home and abroad

矿区类别		官地铁矿	弓长岭铁矿	西鞍山铁矿	袁家村铁矿	茂山铁矿
含矿变质岩系	地层单位	鞍山群甲山组	鞍山群茨沟组	鞍山群樱桃园组	吕梁群袁家村组	茂山群
	形成时代	新太古代末 ~2 500 Ma	新太古代 ~2 548 Ma	新太古代 ~2 540 Ma	古太古代 2.3~2.1 Ga	新太古代 <2 500 Ma
	含矿岩石	斜长角闪岩、角闪 长英片麻岩、长英 片麻岩、变粒岩(浅 粒岩)	斜长角闪岩、黑云 变粒岩、云母石英 片岩、石英岩、浅粒 岩	绿泥千枚岩、绢云 千枚岩、二云变粒 岩、碳质千枚岩、石 英片岩	绿泥片岩、绢云绿 泥片岩、滑石镁铁 闪石片岩、变质石 英砂岩	角闪岩
	原岩类型	基性—中酸性火山 岩—火山碎屑岩	基性—中酸性火山 岩及碎屑沉积岩	粉砂岩—泥岩—硅 铁质沉积建造	富铝的粘土碎屑和 碳酸盐软泥	拉斑质玄武 岩—安山岩— 英安岩
	变质程度	广泛角闪岩相,局 部绿片岩相	广泛角闪岩相,局 部绿片岩相	绿片岩相	广泛绿片岩相,局 部低角闪岩相	广泛低角闪岩 相,局部高角 闪岩相
控矿构造	北西向 单斜构造	弓长 岭背斜	—	复向斜构造	—	
矿体特征	层状、似层、 状透镜状	层状	层状、似层状	层状	层状	
矿石类型	磁铁矿石英岩	磁铁矿石英岩	磁铁矿石英岩和假象 赤铁矿石英岩	磁铁矿石英岩	磁铁矿石英岩	
矿石矿物	磁铁矿为主, 钛铁矿、赤铁矿	磁铁矿为主,赤铁 矿、假象赤铁矿	磁铁矿、假象赤铁 赤铁矿、赤铁矿	磁铁矿为主,近地 表见赤铁矿、镜铁 矿、菱铁矿	磁铁矿和少量赤 铁矿	
矿石组构	矿石结构	变晶结构为主	变晶结构为主	变晶结构为主	变晶结构为主	变晶结构为主
矿石组构	矿石构造	条带状构造为主, 块状构造	条带状构造、块状 构造	条带状、条纹状构 造、块状构造	条带状构造	条带状构造
成因类型	火山沉积 变质型	火山沉积变质型, 相当于 Algoma 型	Algoma 型向 Su- perior 型过渡型	Superior 型	Algoma 型	
构造背景	弧后盆地	弧后盆地环境	浅海大陆架环境	大陆架浅水环境	岛弧或活动大陆边 缘环境	
资料来源	本文	李志红等(2012); 李延河等(2014)	李志红等(2008); 崔培龙(2014)	王长乐等(2014; 2015)	吴琼(2017)	

家村铁矿的含矿变质岩系原岩分别为一套沉积岩建造、碎屑岩—碳酸盐建造,变质程度均主要为绿片岩相的低级区域变质,构造背景均为稳定的大陆架浅海环境.综上所述,官地铁矿与弓长岭铁矿、茂山铁矿同属 Algoma 型铁矿床.

4.4 和龙地块太古宙地壳增生及构造意义

官地矿床角闪斜长片麻岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大,有正有负,可能是新生地壳物质与古老地壳物质共同参与熔融的结果,反映了岛弧岩浆的显著特征(张连昌等, 2013; 李碧乐等, 2016); 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值多为负值,表明角闪斜长片麻岩的原岩—安山岩在形成过程中岩浆源区以古老地壳物质的熔融为主; 部分 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值,反映有部分幔源物质的加入.在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄图解上(图 7a), 锆石变质边部的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值往往低于岩浆核部的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,同样指示了岩浆的壳幔混合作用; 锆石沿

着 3.2~2.8 Ga 地壳演化线变化,也表明岩浆源区以古老地壳物质的熔融为主.此外,锆石 t_{DM2} 为 3 182~2 889 Ma, 与 锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(2 339~2 686 Ma)存在较大差异(图 7b),表明原岩岩浆源区存在大量中太古代(2 889~3 182 Ma)古老地壳物质的混染,并于 2 601 Ma 左右发生熔融形成安山质岩浆.结合代堰锆等(2013a, 2013b)对鞍山地区典型 Algoma 型铁矿锆石 Hf 同位素的研究(图 7a),表明官地铁矿床与鞍山地区 Algoma 型铁矿床在岩浆源区(以中太古代古老地壳物质的熔融为主)方面具有可比性.

官地地区角闪斜长片麻岩中年龄最老锆石岩浆核测点的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 为 0.281 198, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 4.2,与同期亏损地幔值较为接近,其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(2 686±14 Ma)、单阶段模式年龄(t_{DM1} = 2 811 Ma)及二阶段模式年龄(t_{DM2} = 2 889 Ma)也较为接近.同

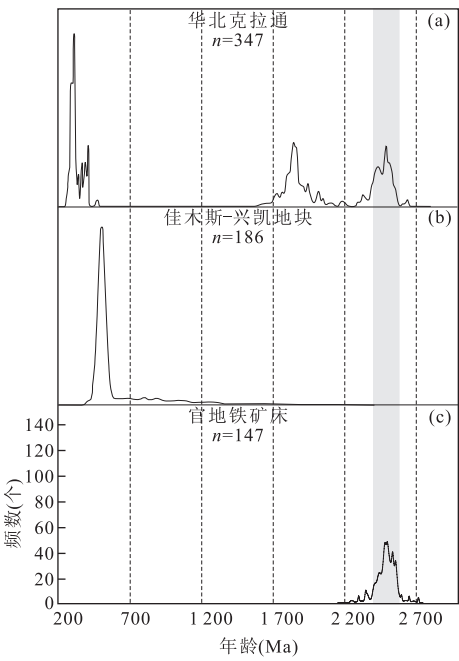


图 10 华北克拉通(a)、佳木斯—兴凯(b)、官地铁矿区(c)锆石年龄频谱图

Fig.10 Relative probability distribution of the zircon ages from the North China Craton (a), Jiamusi-Xingkai block (b), and Guandi iron deposit (c)

三者纵坐标一致;华北克拉通年龄数据源自 Cope *et al.* (2005), Yang *et al.* (2006), Li *et al.* (2009), 胡国辉等(2012);佳木斯—兴凯年龄数据源自周建波等(2012);官地铁矿区年龄数据源自商青青等(2017)和本文

时作者在官地地区含矿岩石—斜长浅粒岩的锆石核部发现一颗²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 2 730±6 Ma 的捕获锆石,指示官地地区可能存在新太古代初期(2.8~2.7 Ga)地壳增生事件。

结合翟明国(2010)、张连昌等(2012;2013)和万渝生等(2012)对华北克拉通内 BIF 铁矿及早前寒武纪地壳增生事件的研究,2.6~2.5 Ga 是 BIF 形成的主要集中期,特别是新太古代晚期(2.56~2.52 Ga);2.8~2.7 Ga 是华北克拉通地壳增生的重要阶段(Jiang *et al.*, 2010; Zhai and Santosh, 2011; 曹正琦等, 2016)。华北克拉通 BIF 形成时代与早前寒武纪岩浆活动时间(2.6~2.5 Ga)基本一致,而与地壳增生年龄峰值有偏差,表明 BIF 的形成与岛弧岩浆活动或地壳侧向增生作用具有成因联系,同时也说明在 2.8~2.7 Ga 的巨量地壳生长之后,华北地区并没有顺利进入稳定的克拉通阶段,而是继续发生小规模地壳生长和已有地壳的分异(沈其韩等, 2005; Zhai *et al.*, 2007; 张连昌等, 2012; 翟明国, 2012),使各陆块间发生强烈的侧向增生(板块俯

冲—拼合),从而导致华北克拉通内 BIF 成矿事件在新太古代晚期广泛发育。

华北克拉通与西伯利亚克拉通的最终闭合位置一直是中亚造山带研究的焦点问题之一。近年来,越来越多的研究表明,索伦—西拉木伦—长春缝合带可作为两者的最终闭合位置(Chen *et al.*, 2009; 周建波等, 2012; 韩杰, 2013; 苏美霞等, 2014)。对于其在延边地区的东延位置普遍存在富尔河—古洞河一带(吉林省地质矿产局, 1988; Zhang *et al.*, 2004)、敦化—延吉一线(张炯飞, 1997)、大山咀—安图—开山屯一带(Jia *et al.*, 2004)以及汪清—珲春一带(Sun *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014)等不同认识(图 1)。官地铁矿区锆石年龄主要分布于 2 600~2 400 Ma,与华北克拉通、佳木斯—兴凯地块的锆石年龄(Cope *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009; 胡国辉等, 2012; 周建波等, 2012)对比表明(图 10),官地铁矿区与华北克拉通更具亲缘性。

综上,官地地区在 BIF 铁矿构造背景、岩浆源区以及早前寒武纪地壳增生事件上与华北克拉通具有可比性,说明官地地区在新太古代末—古元古代初期为华北地区克拉通前期的弧后盆地,其所属构造单元—和龙地块应属华北克拉通,进一步佐证了索伦—西拉木伦—长春缝合带向东延至官地铁矿以北地区。

5 结论

(1)新太古代末—古元古代初期官地地区发生了岩浆作用(2 508~2 483 Ma)和变质事件(2 472~2 459 Ma)。岩浆事件以基性—中酸性火山喷发为主,该期岩浆—变质事件与铁矿的形成有着密切的联系。

(2)官地铁矿形成于弧后盆地中,属典型 Algoma 型铁矿,是广泛发育于华北克拉通内的新太古代晚期 BIF 成矿事件的结果;其所属的和龙地块存在着新太古代初期(2.8~2.7 Ga)地壳增生事件。

(3)和龙地区在 BIF 铁矿形成时代、构造背景、岩浆源区、早前寒武纪地壳增生事件以及新太古代区域地质演化上与华北克拉通具有可比性。

(4)官地地区在新太古代晚期为华北地区克拉通前期的弧后盆地,所属和龙地块应归属华北克拉通,为索伦—西拉木伦—长春缝合带的东延问题的研究提供了新的证据。

致谢:野外地质工作得到吉林省有色金属地质

勘査局 603 队的大力帮助,杨群等同学参与野外样品采集,赵璇、赖科等同学帮助完成 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试分析工作,岩石地球化学分析和锆石 Hf 同位素测试分析分别得到中国地质大学(北京)科学研究院实验中心和中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室的帮助,两位审稿人对本文提出了宝贵的建议,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Andersen, T., Griffin, W. L., Pearson, N. J., 2002. Crustal Evolution in the SW Part of the Baltic Shield: The Hf Isotope Evidence. *Journal of Petrology*, 43 (9): 1725 — 1747. doi:10.1093/petrology/43.9.1725
- BGMRJP (Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province), 1988. Regional Geology of Jilin Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Biczok J., Hollings, P., Klipfel, P., et al., 2012. Geochronology of the North Caribou Greenstone Belt, Superior Province Canada: Implications for Tectonic History and Gold Mineralization at the Musselwhite Mine. *Precambrian Research*, 192 — 195; 209 — 230. doi: 10.1016/j.precamres.2011.10.012
- 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., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker Suture Zone: Constraints from Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopic Ratios and Whole-Rock Nd-Sr Isotope Compositions of Subduction- and Collision-Related Magmas and Forearc Sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245 — 257. doi: 10.1016/j.jseas.2008.05.007
- Chen, C., Ren, Y. S., Zhao, H. L., et al., 2014. Permian Age of the Wudaogou Group in Eastern Yanbian: Detrital Zircon U-Pb Constraints on the Closure of the Palaeo-Asian Ocean in Northeast China. *International Geology Review*, 56 (14): 1754 — 1768. doi: 10.1080/00206814.2014.956348
- Cope, T., Ritts, B. D., Darby, B. J., et al., 2005. Late Paleozoic Sedimentation on the Northern Margin of the North China Block: Implications for Regional Tectonics and Climate Change. *International Geology Review*, 47(3): 270 — 296. doi:10.2747/0020-6814.47.3.270
- Cui, P. L., 2014. Metallogenic Tectonic Setting, Metallogenic and Prospecting Models for Precambrian Iron-Formation in the Anshan-Benxi Area (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Dai, Y. P., Zhang, L. C., Zhu, M. T., et al., 2013a. Chentaigou BIF-Type Iron Deposit, Anshan Area Associated with Archean Crustal Growth: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2537 — 2550 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Y. P., Zhang, L. C., Zhu, M. T., et al., 2013b. Mineralization, Crustal Growth and Genesis of Rich Ore of Archean BIFs in the Anshan Area. *Acta Mineralogica Sinica*, (S2): 386 — 387 (in Chinese).
- Fretzdorff, S., Livermore, R. A., Devey, C. W., et al., 2002. Petrogenesis of the Back-Arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean. *Journal of Petrology*, 43(8): 1435 — 1467. doi:10.1093/petrology/43.8.1435
- Gill, R., 2010. Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Gross, G. A., 1980. A Classification of Iron Formations Based on Depositional Environments. *Canadian Mineralogist*, 18(2): 215 — 222.
- Gross, G. A., 1983. Tectonic Systems and the Deposition of Iron-Formation. *Precambrian Research*, 20 (2 — 4): 171 — 187. doi:10.1016/0301-9268(83)90072-4
- Han, J., 2013. The Final Collision of the Xar Moron River-Changchun Suture: Evidence from the Zircon U-Pb Dating of the Linxi Formation, Inner Mongolia (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (4): 423 — 439. doi:10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27 — 62. doi:10.2113/0530027
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28 (4): 481 — 492 (in Chinese with English abstract).
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2595 — 2604 (in Chinese with English abstract).
- Hu, G. H., Zhao, T. P., Zhou, Y. Y., et al., 2012. Depositional Age and Provenance of the Wufoshan Group in the Southern Margin of the North China Craton: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Com-

- positions. *Geochimica*, 41 (4): 326 — 342 (in Chinese with English abstract).
- Huston, D. L., Logan, G. A., 2004. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydro-sphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (1 — 2): 41 — 55. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00034-2
- Jia, D. C., Hu, R. Z., Lu, Y., et al., 2004. Collision Belt between the Khanka Block and the North China Block in the Yanbian Region, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 (2): 211 — 219. doi: 10.1016/S1367-9120(03)00123-8
- Jiang, N., Guo, J. H., Zhai, M. G., et al., 2010. ~ 2.7 Ga Crust Growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 179 (1 — 4): 37 — 49. doi: 10.1016/j.precamres.2010.02.010
- Jin, B. C., 2012. Characteristics of Paleozoic Sedimentary from East China-Korean Peninsula and Its Tectonic Evolution (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Kröner, A., Cui, W. Y., Wang, S. Q., et al., 1998. Single Zircon Ages from High-Grade Rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China. *Journal Asian Earth Science*, 16 (5 — 6): 519 — 532. doi: 10.1016/S0743-9547(98)00033-6
- Li, B. L., Sun, Y. G., Chen, G. J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition and Its Geological Implication of the Fine-Grained Syenogranite in Dong'an Goldfield from the Lesser Xing'an Mountains. *Earth Science*, 41 (1): 1 — 16 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. H., Song, Q. H., Ma, J., 2011. Typical Iron Deposit of Helong City, Jilin Province. *Jilin Geology*, 30 (4): 40 — 43 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., Xu, Y. G., Huang, X. L., et al., 2009. Activation of Northern Margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb Dating and Hf Isotopes of Detrital Zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu-Jingle Basin. *Chinese Science Bulletin*, 54 (4): 677 — 686. doi: 10.1007/s11434-008-0444-9
- Li, X. G., Wang, Z. G., Pan, S. J., et al., 2010. Geological Features of Guandi BIFs Iron Deposit of Helong City, Jilin Province. *Jilin Geology*, 29 (2): 67 — 70 (in Chinese).
- Li, Y. H., Zhang, Z. J., Hou, K. J., et al., 2014. The Genesis of Gongchangling High-Grade-Iron Ores, Anshan-Benxi Area, Liaoning Province, NE China: Evidence from Fe-Si-O-S Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 88 (12): 2351 — 2372 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Zhu, X. K., Tang, S. H., 2008. Characters of Fe Isotopes and Rare Earth Elements of Banded Iron Formations from Anshan-Benxi Area: Implications for Fe Source. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27 (4): 285 — 290 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Zhu, X. K., Tang, S. H., 2012. Fe Isotope Compositions of Banded Iron Formation from Anshan-Benxi Area: Constraints on the Formation Mechanism and Archean Ocean Environment. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3545 — 3558 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. S., 2016. Geochemical Characteristics and Geochronology Study of the Neo-Archean Metamorphic Plutonic Intrusive of the Toudaoliu Rive Area in the Huadian of Jilin Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. Q., Xue, S. Y., Wang, D. Z., 2014. Geological Features, Mineralization Type and Forming Environment of Helong Archean Iron Deposit in Jilin Province. *Jilin Geology*, 33 (1): 68 — 72 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. No. 4 Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19 (2): 290 — 300. doi: 10.1016/0012-821X(73)90129-5
- Pearce, J. A., Norry, M. J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69 (1): 33 — 47. doi: 10.1007/BF00375192
- Shang, Q. Q., Ren, Y. S., Chen, C., et al., 2017. Formation Age and Tectonic Significance of Guandi Iron Deposit in Yanbian Area, Jilin Province. *Mineral Deposits*, 36 (2): 364 — 378 (in Chinese with English abstract).
- Shaw, D. W., 1972. The Origin of the Apsley Gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9 (1): 18 — 35. doi: 10.1139/e72-002
- Shaw, D. M., Kudo, A. M., 1965. A Test of the Discriminant Function in the Amphibolite Problem. *Mineralogical Magazine*, 34 (268): 423 — 435. doi: 10.1180/minmag.1965.034.268.38
- Shen, B. F., Luo, H., 1994. The Metallogenetic Characteristics of Gold Deposits of the Archean Greenstone Belts in North China Platform. *Journal of Geology & Mineral Resource of North China*, 9 (1): 87 — 96 (in Chinese with English abstract).
- Shen, B. F., Zhai, A. M., Yang, C. L., et al., 2005. Temporal-Spatial Distribution and Evolutional Characters of Precambrian Iron Deposits in China. *Geological Survey and Research*, 28

- (4):196—206(in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Song, B., et al., 2005. New Information from the Surface Outcrops and Deep Crust of Archean Rocks of the North China and Yangtze Blocks, and Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 616—627(in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Geng, Y. S., Song, H. X., 2016. Constituents and Evolution of the Metamorphic Basement of the North China Craton. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 387—406 (in Chinese with English abstract).
- Simonen, A., 1953. Stratigraphy and Sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean Supracrustal Rocks in Southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 160: 1—64.
- Su, M. X., Zhao, W. T., Zhang, H. C., et al., 2014. Geophysical Characteristics of the Suture Zone between North China and Siberian Plates. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(5): 949—955 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Sun, Y. W., Li, M. S., Ge, W. C., et al., 2013. Eastward Termination of the Solonker-Xar Moron River Suture Determined by Detrital Zircon U-Pb Isotopic Dating and Permian Floristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75(5): 243—250. doi: 10.1016/j.jseas.2013.07.018
- Tarney, J., 1976. Geochemistry of Archean High-Grade Gneisses, with Implications as to Origin and Evolution of the Precambrian Crust. Wiley, London.
- Taylor, B., Martinez, F., 2003. Back-Arc Basin Basalt Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3—4): 481—497. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00167-5
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- The 603 Team of Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, 2013. The Production Exploration Summary of Guandi Iron Deposit in Helong of Jilin Province. The 603 Team of Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau, Yanji (in Chinese).
- Thurston, P. C., Kamber, B. S., Whitehouse, M., 2012. Archean Cherts in Banded Iron Formation: Insight into Neoproterozoic Ocean Chemistry and Depositional Processes. *Precambrian Research*, 214—215: 227—257. doi: 10.1016/j.precamres.2012.04.004
- Walker, K. R., Joplin, G. A., Lovering, J. F., et al., 1959. Metamorphic and Metasomatic Convergence of Basic Igneous Rocks and Lime-Magnesia Sediments of the Precambrian of North-Western Queensland. *Journal of the Geological Society of Australia*, 6(2): 149—177. doi: 10.1080/00167615908728504
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2012. Formation Ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1447—1478(in Chinese with English abstract).
- Wang, C. L., Zhang, L. C., Lan, C. Y., et al., 2014. Rare Earth Element and Yttrium Compositions of the Paleoproterozoic Yuanjiacun BIF in the Lüliang Area and Their Implications for the Great Oxidation Event (GOE). *Science China: Earth Sciences*, 44(11): 2389—2405 (in Chinese).
- Wang, C. L., Zhang, L. C., Lan, C. Y., et al., 2015. Analysis of Sedimentary Facies and Depositional Environment of the Yuanjiacun Banded Iron Formation in the Lüliang Area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1671—1693 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. M., He, G. P., Chen, Z. Z., et al., 1987. Graphical Method for Protolith Reconstruction of Metamorphic Rocks. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace-Element and REE Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1—23. doi: 10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. doi: 10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1—30. doi: 10.1016/j.jseas.2010.11.014
- 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, Q., 2017. Study on the Geological Characteristics and Enrichment Regularities of Mineralization of Guandi Fe Deposit in Helong, Jilin Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Zircon Genetic Mineralogy Research and Its Constrains to U-Pb Age Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese).
- Yang, F. D., Duan, J. X., Yu, C., et al., 2009. Ore-Forming Ge-

- ological Conditions of Precambrian Metamorphic Iron Deposits, Jilin Province, *Jilin Geology*, 28(4): 12—16 (in Chinese).
- Yang, J., Wang, J. R., Zhang, Q., et al., 2016a. Global IAB Data Excavation: The Performance in Basalt Discrimination Diagrams and Preliminary Interpretation, *Geological Bulletin of China*, 35(12): 1937—1949 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Wang, J. R., Zhang, Q., et al., 2016b. Back-Arc Basin Basalt (BABB) Data Mining: Comparison with MORB and IAB, *Advances in Earth Science*, 31(1): 66—77 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Shao, J. A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China, *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3—4): 336—352, doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.029
- Zhai, M. G., 2010. Tectonic Evolution and Metallogenesis of North China Craton, *Mineral Deposits*, 29(1): 24—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2012. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics, *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1335—1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview, *Gondwana Research*, 20(1): 6—25, doi: 10.1016/j.gr.2011.02.005
- Zhai, M. G., Xiao, W. J., Kusky, T., et al., 2007. Tectonic Evolution of China and Adjacent Crustal Fragments, *Gondwana Research*, 12(1—2): 1—3, doi: 10.1016/j.gr.2006.11.010
- Zhang, J. F., 1997. A Preliminary Discussion on an Application of the Sequence Stratigraphy in the Regional Geological Surveying(1: 50 000)—Taking Hunjiang Area as an Example, *Jilin Geology*, 16(2): 31—32+34—38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Dai, Y. P., Wang, C. L., et al., 2013. Archean Crust Growth and BIF-Iron Deposit in the North China Craton, *Acta Mineralogica Sinica*, (S2): 419—420 (in Chinese).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-Iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions, *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431—3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhang, X. J., Cui, M. L., et al., 2011. Formation Age and Tectonic Environment of BIF-Iron Deposit in the North China Craton, *Acta Mineralogica Sinica*, (S1): 666—667 (in Chinese).
- Zhang, Y. B., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2004. Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications of ‘Early Paleozoic’ Granitoids at Yanbian, Jilin Province, Northeast China, *The Island Arc*, 13(4): 484—505, doi: 10.1111/j.1440-1738.2004.00442.x
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Achean 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
- Zhou, J. B., Zeng, W. S., Cao, J. L., et al., 2012. The Tectonic Framework and Evolution of the NE China: From ~500 Ma to ~180 Ma, *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1298—1316 (in Chinese with English abstract).

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.
- 崔培龙, 2014. 鞍山—本溪地区铁建造型铁矿成矿构造环境与成矿、找矿模式研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 代堰镔, 张连昌, 朱明田, 等, 2013a. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束, *岩石学报*, 29(7): 2537—2550.
- 代堰镔, 张连昌, 朱明田, 等, 2013b. 鞍本地区太古代 BIF 成矿作用、地壳增生及富矿成因, *矿物学报*, 33(S2): 386—387.
- 韩杰, 2013. 西拉木伦—长春缝合线的形成时代——来自林西地区林西组碎屑锆石年龄的制约(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术, *矿床地质*, 28(4): 481—492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用, *岩石学报*, 23(10): 2595—2604.
- 胡国辉, 赵太平, 周艳艳, 等, 2012. 华北克拉通南缘五佛山群沉积时代和物源区分析: 碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据, *地球化学*, 41(4): 326—342.
- 吉林省地质矿产局, 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 吉林省有色金属地质勘查局 603 队, 2013. 吉林省和龙市官地铁矿生产勘探工作总结. 延吉: 吉林省有色金属地质勘查局 603 队.
- 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.
- 李碧乐, 孙永刚, 陈广俊, 等, 2016. 小兴安岭东安金矿区细粒正长花岗岩 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素组成及地质意义, *地球科学*, 41(1): 1—16.
- 李晨辉, 松权衡, 马晶, 2011. 和龙市官地铁矿典型矿床研究.

- 吉林地质,30(4):40—43.
- 李兴国,汪志刚,潘四江,等,2010.吉林省和龙市官地 BIFs 铁矿床地质特征.吉林地质,29(2):67—70.
- 李延河,张增杰,侯可军,等,2014.辽宁鞍山地区沉积变质型富铁矿的成因:Fe、Si、O、S 同位素证据.地质学报,88(12):2351—2372.
- 李志红,朱祥坤,唐索寒,2008.鞍山一本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示.岩石矿物学杂志,27(4):285—290.
- 李志红,朱祥坤,唐索寒,2012.鞍山一本溪地区条带状铁矿的 Fe 同位素特征及其对成矿机理和地球早期海洋环境的制约.岩石学报,28(11):3545—3558.
- 李忠水,2016.吉林省桦甸市头道溜河一带变质深成侵入岩地球化学特征及年代学研究(硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 卢秀全,薛世远,王堆珍,2014.吉林和龙太古代铁矿床地质特征、矿化类型及形成环境.吉林地质,(1):68—72.
- 商青青,任云生,陈聪,等,2017.延边地区官地铁矿床形成时代及其构造意义.矿床地质,36(2):364—378.
- 沈保丰,骆辉,1994.华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征.华北地质矿产杂志,33(1):87—96.
- 沈保丰,翟安民,杨春亮,等,2005.中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特征.地质调查与研究,28(4):196—206.
- 沈其韩,耿元生,宋彪,等,2005.华北和扬子陆块及秦岭一大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息.地质学报,79(5):616—627.
- 沈其韩,耿元生,宋会侠,2016.华北克拉通的组成及其变质演化.地球学报,37(4):387—406.
- 苏美霞,赵文涛,张慧聪,等,2014.华北板块与西伯利亚板块缝合带之地球物理特征.物探与化探,38(5):949—955.
- 万渝生,董春艳,颜炳强,等,2012.华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年.地质学报,86(9):1447—1478.
- 王长乐,张连昌,兰彩云,等,2014.山西吕梁古元古代袁家村铁矿 BIF 稀土元素地球化学及其对大氧化事件的指示.中国科学:地球科学,44(11):2389—2405.
- 王长乐,张连昌,兰彩云,等,2015.山西吕梁袁家村条带状铁建造沉积相与沉积环境分析.岩石学报,31(6):1671—1693.
- 王仁民,贺高品,陈珍珍,等,1987.变质岩原岩图解判别法.北京:地质出版社.
- 吴琼,2017.吉林和龙官地铁矿矿床地质特征及矿化富集规律(硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16):1589—1604.
- 杨复顶,段建祥,于城,等,2009.吉林省前寒武纪变质铁矿成矿地质条件浅析.吉林地质,28(4):12—16.
- 杨婧,王金荣,张旗,等,2016a.全球岛弧玄武岩数据挖掘——在玄武岩判别图上的表现及初步解释.地质通报,35(12):1937—1949.
- 杨婧,王金荣,张旗,等,2016b.弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘:与 MORB 及 IAB 的对比.地球科学进展,31(1):66—77.
- 翟明国,2010.华北克拉通的形成演化与成矿作用.矿床地质,29(1):24—36.
- 翟明国,2012.华北克拉通的形成以及早期板块构造.地质学报,86(9):1335—1349.
- 张炯飞,1997.延边地区渤海地块与兴凯地块之间古缝合带的初步研究.吉林地质,16(2):31—32+34—38.
- 张连昌,代堰铭,王长乐,等,2013.华北克拉通太古代地壳增生与 BIF 铁矿.矿物学报,33(S2):419—420.
- 张连昌,翟明国,万渝生,等,2012.华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究:进展与问题.岩石学报,28(11):3431—3445.
- 张连昌,张晓静,崔敏利,等,2011.华北克拉通 BIF 铁矿形成时代与构造环境.矿物学报,31(S1):666—667.
- 周建波,曾维顺,曹嘉麟,等,2012.中国东北地区的构造格局与演化:从 500 Ma 到 180 Ma.吉林大学学报(地球科学版),42(5):1298—1316.