

华北克拉通东北部新太古代晚期地壳生长:来自板石沟表壳岩年代学和 Hf 同位素的证据*

李鹏川 郭巍** 关庆彬 刘杰勋

LI PengChuan, GUO Wei**, GUAN QingBin and LIU JieXun

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2016-03-09 收稿, 2016-07-22 改回.

Li PC, Guo W, Guan QB and Liu JX. 2016. Late Neoproterozoic crustal growth in the northeast of the North China Craton: Evidence from the geochronology and Hf isotope composition of Banshigou supracrustal rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (9):2839–2855

Abstract This paper reports zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotopic data of Banshigou supracrustal rocks in order to discuss the tectonic setting and crustal evolution in the northeast of the North China Craton in the Late Neoproterozoic. The main rock types of Banshigou supracrustal rocks are include amphibolite, plagioclase gneiss, hornblende schist and magnetite quartzite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows the magmatic zircons in the amphibolite (BA-1) were crystallized at 2548 ± 11 Ma while the magmatic zircons in the epidote-hornblende schist (BA-6) were crystallized at 2548 ± 23 Ma, representing the formation age of supracrustal rocks. Besides, we found three captured zircons in BA-6 which age are between 2754 ± 80 Ma and 2710 ± 92 Ma, indicate Banshigou area may have occurred magmatic events during the Early Neoproterozoic. The protoliths of amphibolite and hornblende schist are basaltic rocks, trace element characteristics reveal that the protoliths formed in an island-arc setting. Hf isotopic data indicate that the zircons in amphibolite have positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between 0.29 and 8.89, one-stage model ages (t_{DMI}) are between 2877 Ma and 2544 Ma, while most of the zircons in epidote-hornblende schist also have positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between -0.78 and 8.03, their t_{DMI} are between 2871 Ma and 2544 Ma, implying that the magma provenance was mainly made up of materials from depleted mantle with contamination of recycled old crust. Some zircons which t_{DMI} are similar to theirs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages suggested Banshigou area occurred crustal growth during the late Neoproterozoic. Combine with the supracrustal rocks in other regions, we propose there was likely existed the Neoproterozoic Ji-Liao-Ji (Jilin-Liaoning-Hebei) arc-continent collision orogenic belt in the North China Craton, besides, Banshigou area is one part of this orogenic belt.

Key words North China Craton; Late Neoproterozoic; Banshigou supracrustal rocks; Zircon U-Pb age; Hf isotopic; Crustal growth

摘要 对板石沟表壳岩中的斜长角闪岩和角闪片岩进行了锆石 U-Pb 年代学、地球化学以及 Hf 同位素分析,以探讨华北克拉通东北部新太古代晚期的构造环境和地壳演化。板石沟表壳岩主要岩石类型包括斜长角闪岩、斜长片麻岩、角闪片岩和磁铁石英岩,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示斜长角闪岩(BA-1)岩浆锆石形成于 2548 ± 11 Ma,绿帘角闪片岩(BA-6)岩浆锆石形成于 2548 ± 23 Ma,代表了表壳岩的形成时代,在绿帘角闪片岩中识别出 3 颗年龄为 2754 ± 80 Ma ~ 2710 ± 92 Ma 的捕获锆石,表明板石沟地区可能存在新太古代早期岩浆事件。斜长角闪岩和角闪片岩的原岩为玄武质火山岩,微量元素特征指示其形成于岛弧环境。Hf 同位素分析结果显示斜长角闪岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值(0.29 ~ 8.89),单阶段模式年龄(t_{DMI})分布在 2877 ~ 2469 Ma 之间,绿帘角闪片岩多具正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-0.78 ~ 8.03), t_{DMI} 介于 2871 ~ 2544 Ma,表明岩浆主要来源于亏损地幔,伴随少量古老地壳物质的再造,部分 t_{DMI} 与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄相近,并同时具有高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的锆石反映板石沟地区新太古代晚期(2550 Ma)发生过地壳增生事件。结合其他地区表壳岩研究成果,认为华北克拉通可能存在新太古代吉-辽-冀弧陆碰撞造山带,板石沟地区属于该造山带的一部分。

* 本文受国家自然科学基金项目(41272223, 41340024, 41402169)和中国地质调查局项目(12120114028001, 1212011220854)联合资助。

第一作者简介:李鹏川,男,1991年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: lipengchuan@foxmail.com

** 通讯作者:郭巍,男,1960年生,博士,教授,主要从事构造地质和石油地质方面的研究,E-mail: guoweijldx@163.com

关键词 华北克拉通;新太古代晚期;板石沟表壳岩;锆石 U-Pb 年龄;Hf 同位素;地壳增生
中图法分类号 P588.34;P597.3

1 引言

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,也是中国规模最大的克拉通,保留着 3.8Ga 以上的地质演化历史(翟明国, 2010; 万渝生等, 2015), 基底岩浆锆石年龄峰值为 2.5Ga, 该年龄记录广泛存在于整个华北克拉通(Zhai *et al.*, 2000, 2005; Zhao *et al.*, 2001, 2005; 耿元生等, 2002; 彭澎和翟明国, 2002; Diwu *et al.*, 2010)。近年来, 围绕华北克拉通形成和演化过程、早期板块构造、前寒武纪 BIF 铁矿等热点问题, 地质学家展开了深入的研究和讨论(沈其韩等, 2004; 翟明国, 2010, 2012; 万渝生等, 2012, 2015; 张连昌等, 2012), 取得了丰硕的成果和进展, 但仍存在许多争论。研究表明, 早期地壳的形成以高钠的 TTG 系列岩石为代表, 2.7Ga 是 TTG 形成的高峰期(翟明国, 2012; Geng *et al.*, 2012), 在全球范围形成规模巨大的克拉通(Condie *et al.*, 2009, 2011; Condie and Aster, 2010)。华北克拉通具有多阶段生长的特点(翟明国, 2013a, b), 新太古代晚期(2.55 ~ 2.50Ga) 发生大规模构造热事件, 伴随新生陆壳的增生(Diwu *et al.*, 2011; 万渝生等, 2012), 对于该阶段构造热事件有不同观点。一种观点认为陆壳生长是通过俯冲增生和弧陆碰撞实现, 即岛弧岩浆作用模式(伍家善等, 1998; Zhao *et al.*, 2000, 2005; Kusky *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002; Kröner *et al.*, 2005), 基于这个观点认为太古宙晚期华北克拉通存在强烈的碰撞造山作用并形成了碰撞造山带(伍家善等, 1998; Kusky *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002; 万渝生等, 2005a, b); 另一种观点则认为由地幔柱或板底垫托(岩浆底侵)作用引起陆壳的生长(Geng *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008; 耿元生等, 2010; 翟明国, 2010), 归根结底, 这个争论的关键在于新太古代是否存在板块构造, 而这是已存在几十年的前沿科学问题。

太古宙 TTG 片麻岩、壳源花岗岩和表壳岩是解决华北克拉通太古宙地质问题的窗口, 相对于 TTG 片麻岩和壳源花岗岩而言, 表壳岩分布范围和规模则小得多。华北克拉通太古宙表壳岩主要分布在鞍山、冀东、五台、鲁西、吕梁、胶东和固阳等地(万渝生等, 2012; 张连昌等, 2012), 而在华北克拉通东北部, 太古宙表壳岩集中在鞍山、本溪、抚顺和清原地区, 这些地区表壳岩的研究程度较高(万渝生等, 2005a, b; 代堰镔等, 2012, 2013; 相鹏等, 2012; 钱焯等, 2013; 张增杰等, 2013; 白翔等, 2014; 张雅静等, 2014)。除此之外, 在吉南白山板石沟地区、靖宇北部、抚松西北部以及延边和龙地区仍有太古宙表壳岩零星分布(图 1a), 规模和范围则更小, 科学研究也相对较少。

自 1958 年板石沟铁矿发现以来, 板石沟地区先后开展

了 1:20 万浑江幅和 1:5 万板石沟铁矿幅区域地质调查, 之后很多学者从不同方面对其进行过报道。屈奋雄等(1992)从矿区地层及岩石组合、矿床特征、变质作用和构造变形方面总结了板石沟铁矿的地质特征, 随后又探讨了板石沟铁矿的构造置换作用及其控矿规律(屈奋雄等, 1997), 杨豹等(1993)对板石沟等地的变质火山岩地球化学组成进行了研究, 刘志宏和姜继圣(1995)、孙忠实等(1999)分别划分了板石沟地区变质变形作用期次, 姜继圣等(1997)对板石沟早前寒武纪基底单元进行了划分并梳理了基底地质演化序列, 刘志宏等(1999)运用 Sm-Nd 同位素测年方法获得了表壳岩的形成时代并讨论了岩浆物质来源。可见对于板石沟铁矿的基础地质问题研究较全面, 但对表壳岩的综合性研究较少, 并且由于年代较早, 部分测试结果如今来看可能不够精确, 因此本文对吉南板石沟地区太古宙变质表壳岩(命名为板石沟表壳岩)进行了年代学、地球化学和 Hf 同位素分析, 以确定表壳岩形成时代, 恢复表壳岩原岩, 讨论原岩物质来源, 对研究华北克拉通东北部太古宙晚期地壳演化、构造环境和碰撞造山作用具有一定意义。

2 地质概况

吉林省境内的太古宙岩石主要分布在东南部龙岗山脉地区, 整体呈北东东向带状弧形分布, 大致以龙岗主脊为轴, 向南北两侧地层依次变新, 构成大型的复式背斜(吉林省地质矿产局, 1988)。吉南板石沟地区位于华北克拉通东北部(图 1b), 龙岗复式背斜的核部及南缘, 属于典型的太古宙基底出露区, 该地区经历多期次构造运动、岩浆活动和变质作用, 形成复杂的褶皱和断裂构造, 对板石沟铁矿的空间赋存形态起着控制和改造作用(图 1c)。

板石沟地区位于白山市北约 9km 处, 区内 TTG 片麻岩和花岗质岩石分布广泛, 多遭受强烈变质变形, 局部被深熔作用改造, 构成太古宙基底的主体。表壳岩整体呈近东西向长条状断续分布, 主体部分东起上青东沟, 西至木通沟, 长约 11km, 最宽处达 2.5km。板石沟表壳岩赋存于新太古界鞍山群杨家店组中, 多期次变形使岩石中发育不同程度的紧闭同斜褶皱, 表壳岩主要的岩石类型包括斜长角闪岩、斜长片麻岩、角闪片岩和磁铁石英岩, 它们呈条状、带状、钩状或透镜状分布在 TTG 片麻岩和花岗质岩石之中。通过对板石沟铁矿多个矿组大比例尺剖面的测制, 发现磁铁石英岩多赋存在角闪片岩或斜长角闪岩中, 它们是磁铁矿的主要围岩, 空间上角闪片岩的出露不稳定, 多位于磁铁石英岩的边缘, 与磁铁石英岩的形成关系密切(图 1c), 表壳岩的典型产出层序为斜长片麻岩、角闪片岩、斜长角闪岩组合(图 1d)。此外, 区内还出露古元古界老岭群和新元古界沉积盖层, 它们呈断

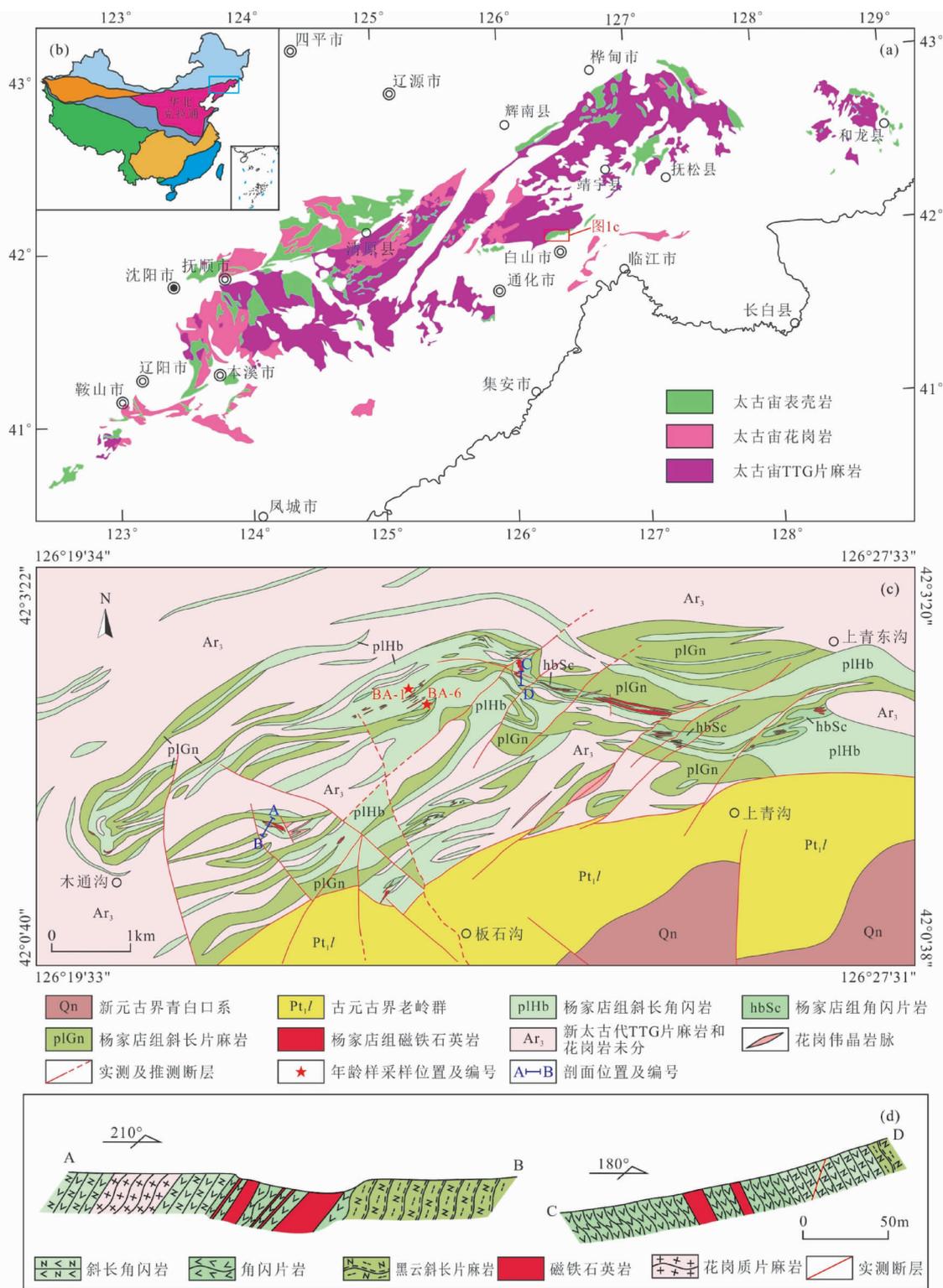


图 1 华北克拉通东北部太古宙岩石分布图(a)、中国大地构造图(b,据潘桂棠等, 2009)、吉南板石沟地区地质简图(c)和表壳岩地质剖面(d)

Fig. 1 The distribution map of Archean rocks in the northeast of the North China Craton (a), tectonic map of China (b, modified after Pan *et al.*, 2009), geological map of Banshigou area (c) and geological sections of supracrustal rocks (d)

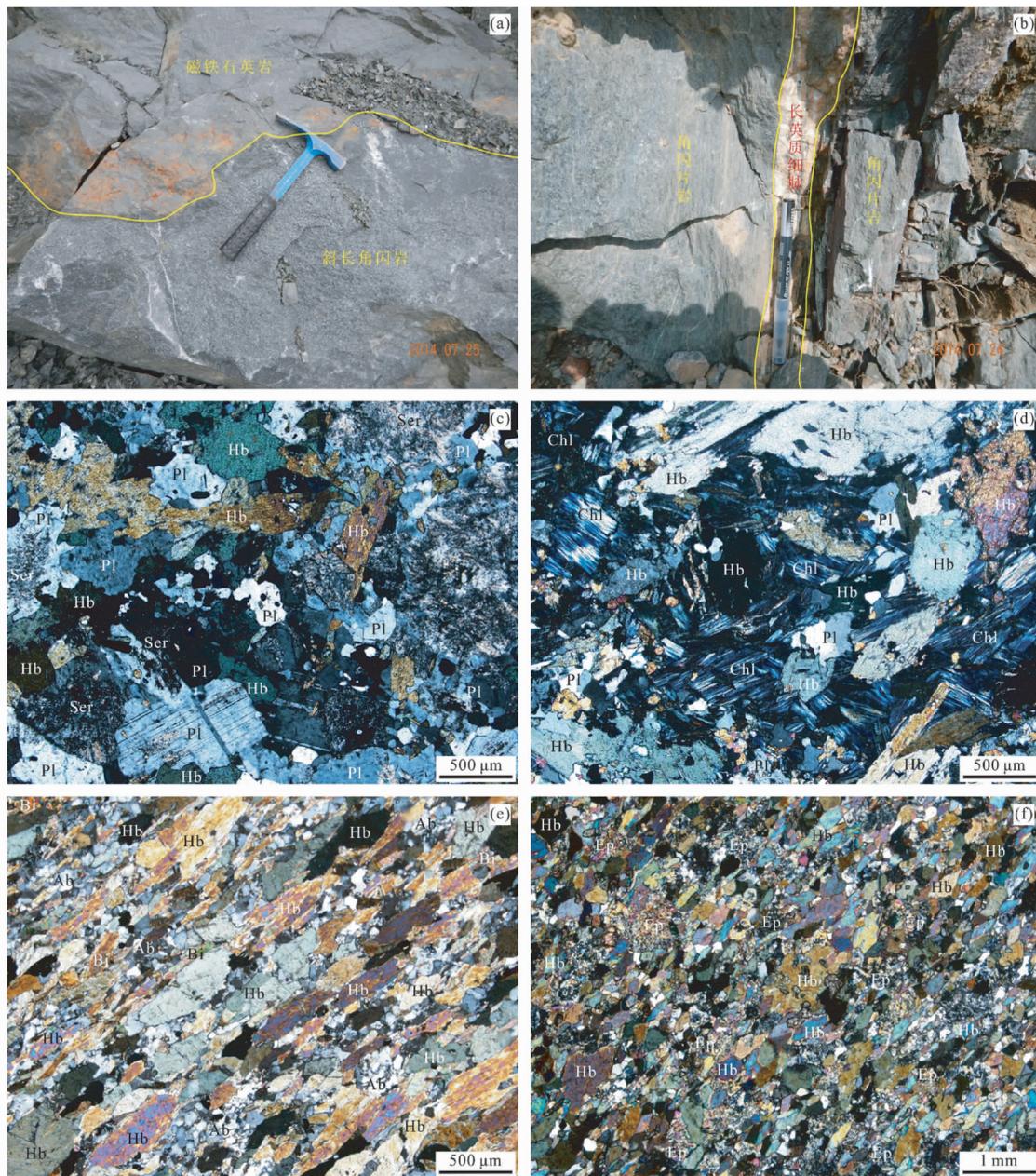


图2 板石沟表壳岩宏观和显微照片

(a)斜长角闪岩与磁铁石英岩接触关系宏观照片;(b)角闪片岩宏观照片;(c)斜长角闪岩中斜长石强烈绢云母化;(d)斜长角闪岩中角闪石蚀变成绿泥石;(e)钠长角闪片岩中钠长石集合体呈他形糖粒状;(f)绿帘角闪片岩矿物定向排列。Pl-斜长石;Hb-角闪石;Ser-绢云母;Chl-绿泥石;Ab-钠长石;Bi-黑云母;Ep-绿帘石

Fig. 2 Macrographs and micrographs of Banshigou supracrustal rocks

层接触关系自南向北推覆在表壳岩和 TTG 片麻岩之上(图 1c)。

3 样品特征

本文针对板石沟表壳岩中的斜长角闪岩(图 2a)和角闪片岩(图 2b)进行研究。

斜长角闪岩:粒状柱状变晶结构,块状构造,主要由普通角闪石(55%~75%)和斜长石(25%~45%)组成,含有少量的黑云母、钠长石和石英,斜长石绢云母化(图 2c)或钠黝帘石化蚀变严重,个别可见聚片双晶(图 2e),部分斜长角闪岩中角闪石蚀变成绿泥石,集合体呈片状,平行消光,具有靛蓝色异常干涉色(图 2d),副矿物有榍石、磷灰石、磁铁矿及电气石。

角闪片岩:根据矿物组合不同,可分为钠长角闪片岩和

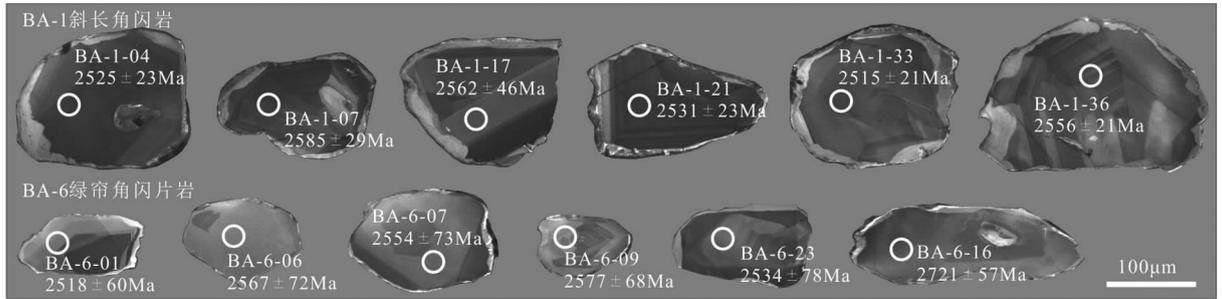


图3 板石沟表壳岩中斜长角闪岩(BA-1)和绿帘角闪片岩(BA-6)锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons from amphibolite (BA-1) and epidote hornblende schist (BA-6) of Banshigou supracrustal rocks

绿帘角闪片岩,粒状柱状变晶结构,片状构造,钠长角闪片岩主要矿物包括普通角闪石(60%~80%)、钠长石(0~10%)、黑云母(5%~10%)和石英(0~5%),钠长石集合体呈他形糖粒状存在,干涉色一级灰白,未见双晶(图2e);绿帘角闪片岩由角闪石(50%~80%)、绿帘石(20%~45%)以及极少量的长石和石英(0~5%)组成,绿帘石具有弱多色性,以粒状集合体形式存在,干涉色多为姜黄色异常干涉色(图2f)。副矿物可见榍石、磁铁矿和磷灰石。

取测年样品2件,分别为中细粒斜长角闪岩(编号BA-1,坐标42°2'30.4"N,126°22'59.7"E)和细粒绿帘角闪片岩(编号BA-6,坐标42°2'26.0"N,126°23'5.7"E)。取岩石地球化学全分析样品12件,包括斜长角闪岩样品和角闪片岩样品各6件。

4 分析方法

锆石分选和制靶按照常规方法进行,流程不再赘述,可参考侯可军等(2009)、李鹏川等(2016)。锆石U-Pb测年和Hf同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成,测试仪器为Neptune多接收电感耦合等离子体质谱和Newwave UP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用氦气为剥蚀物质载气,使用GJ-1和Plesovice做为参考物质,根据锆石粒径选择55 μm或40 μm的剥蚀直径,锆石U-Pb定年分析点和Hf同位素分析点位置相同。分析过程中锆石GJ-1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282007 ± 0.000007 (2σ , $n=36$),与文献报道值(侯可军等,2007; Morel *et al.*, 2008)在误差范围内完全一致,具体的仪器运行参数及详细分析流程见侯可军等(2007)。实验取得的测年数据使用ICPMSDataCal进行处理(Liu *et al.*, 2010),运用Isoplot(Ludwing, 2001)绘制谐和图,年龄误差为 1σ 。主量、微量元素分析在广州澳实矿物实验室(ALS Chemex)完成,主量元素采用X荧光光谱法(XRF)分析,并采用重铬酸钾滴定法测定FeO含量,微量元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析。

5 分析结果

5.1 锆石U-Pb年代学

斜长角闪岩样品(BA-1)中的锆石形态不规则,以他形为主,粒径主要集中在200 μm左右,个别可达450 μm,阴极发光图中(图3)多数锆石为无分带或弱分带结构,并具有很窄的浅色变质增生边,少数锆石内部有模糊的岩浆环带。对BA-1中的40颗锆石进行了U-Pb测年(表1),由于变质增生边过窄,测试点都选在锆石内部,这些锆石的Th含量为 $15 \times 10^{-6} \sim 1104 \times 10^{-6}$,U含量为 $73 \times 10^{-6} \sim 984 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.15~1.12,符合岩浆锆石的特征,尽管Th、U含量和Th/U比值变化较大,但年龄非常一致。40个数据点都落在了谐和线上(图4a),取得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2548 \pm 11\text{Ma}$ (1σ ; MSWD=1.9),代表了表壳岩的形成时代。

绿帘角闪片岩样品(BA-6)中的锆石呈他形粒状或不规则形状,粒径100~150 μm,整体粒度小于BA-1中的锆石,长宽比1:1~2:1,CL图(图3)显示锆石内部结构清晰,呈无分带结构或弱分带结构,特征与基性岩浆锆石相符。对BA-6中的30颗锆石进行了测试(表1),在其中识别出3颗捕获锆石(BA-6-15、BA-6-16和BA-6-26),它们的Th含量 $18 \times 10^{-6} \sim 55 \times 10^{-6}$,U含量 $32 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$,Th/U比值0.56~0.63,加权平均年龄为 $2728 \pm 71\text{Ma}$,表明板石沟地区可能存在新太古代早期地质体。其余27颗锆石中有3颗锆石因为铅丢失偏离谐和线(已剔除),剩余的24颗皆落在谐和线上(图4b),这些锆石的Th含量为 $10 \times 10^{-6} \sim 392 \times 10^{-6}$,U含量为 $19 \times 10^{-6} \sim 871 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.34~0.86。它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2548 \pm 23\text{Ma}$ (1σ ; MSWD=0.23),与斜长角闪岩的形成时代完全一致。

5.2 锆石Hf同位素

对BA-1中所有测年锆石和BA-6中部分测年锆石进行了Hf同位素分析(表2),测试点与测年点相对应。

斜长角闪岩样品(BA-1)的40个测试点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布在0.281264~0.281496之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 都为正值,变化范围

表1 板石沟表壳岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Banshigou supracrustal rocks

测点号	元素($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
斜长角闪岩															
BA-1-01	191	241	0.79	0.17558	0.00427	11.78833	0.39188	0.49168	0.01617	2612	25	2588	31	2578	70
BA-1-02	195	501	0.39	0.17453	0.00399	11.70827	0.39827	0.49159	0.01701	2602	26	2581	32	2578	74
BA-1-03	207	308	0.67	0.17551	0.00427	11.78397	0.38478	0.49264	0.01573	2611	25	2587	31	2582	68
BA-1-04	382	514	0.74	0.16668	0.00337	11.03592	0.33044	0.47988	0.01351	2525	23	2526	28	2527	59
BA-1-05	297	419	0.71	0.17287	0.00430	11.19543	0.41865	0.47819	0.01901	2586	30	2540	35	2519	83
BA-1-06	346	500	0.69	0.17193	0.00399	11.27473	0.36839	0.48438	0.01737	2576	27	2546	30	2546	75
BA-1-07	149	375	0.40	0.17283	0.00423	11.33043	0.40568	0.48605	0.01865	2585	29	2551	33	2554	81
BA-1-08	53	105	0.50	0.16981	0.00439	11.25712	0.37085	0.48433	0.01483	2556	25	2545	31	2546	64
BA-1-09	670	608	1.10	0.16989	0.00393	11.18082	0.41592	0.48225	0.01830	2557	29	2538	35	2537	80
BA-1-10	804	731	1.10	0.17043	0.00409	11.25702	0.38204	0.48303	0.01658	2562	26	2545	32	2540	72
BA-1-11	712	786	0.91	0.17098	0.00416	11.26602	0.39136	0.48453	0.01773	2567	27	2545	32	2547	77
BA-1-12	234	234	1.00	0.16806	0.00878	11.38758	0.40162	0.48969	0.01559	2538	26	2555	33	2569	67
BA-1-13	229	351	0.65	0.16908	0.00396	11.03392	0.37554	0.47945	0.01698	2549	27	2526	32	2525	74
BA-1-14	623	739	0.84	0.17122	0.00391	11.20986	0.34882	0.48155	0.01596	2570	25	2541	29	2534	69
BA-1-15	63	153	0.41	0.17372	0.00614	10.69245	0.60083	0.47900	0.03175	2594	50	2497	52	2523	138
BA-1-16	771	911	0.85	0.17304	0.00577	10.92869	0.65751	0.47938	0.03356	2587	52	2517	56	2525	146
BA-1-17	778	848	0.92	0.17042	0.00501	10.63184	0.56896	0.47374	0.02935	2562	46	2491	50	2500	128
BA-1-18	315	621	0.51	0.17398	0.00518	11.26632	0.45289	0.48387	0.02014	2596	31	2545	37	2544	88
BA-1-19	21	88	0.24	0.16886	0.00601	10.55377	0.41687	0.47277	0.02049	2546	32	2485	37	2496	90
BA-1-20	631	706	0.89	0.17396	0.00477	11.15847	0.48374	0.48542	0.02467	2596	38	2536	40	2551	107
BA-1-21	205	500	0.41	0.16728	0.00348	11.02492	0.32411	0.48012	0.01445	2531	23	2525	27	2528	63
BA-1-22	356	500	0.71	0.16622	0.00334	10.87850	0.26414	0.47602	0.01182	2520	19	2513	23	2510	52
BA-1-23	84	170	0.49	0.16481	0.00420	10.67446	0.32544	0.47402	0.01414	2506	23	2495	28	2501	62
BA-1-24	668	744	0.90	0.16793	0.00316	11.00449	0.34149	0.47809	0.01578	2537	25	2524	29	2519	69
BA-1-25	17	113	0.15	0.16193	0.00416	10.36799	0.30681	0.46732	0.01260	2476	22	2468	27	2472	55
BA-1-26	112	204	0.55	0.16978	0.00448	10.84676	0.41462	0.47783	0.02008	2555	31	2510	36	2518	88
BA-1-27	218	301	0.72	0.16790	0.00375	10.80483	0.39349	0.47410	0.01859	2537	29	2506	34	2502	81
BA-1-28	1104	984	1.12	0.16653	0.00479	10.26700	0.44691	0.46533	0.02246	2523	36	2459	40	2463	99
BA-1-29	173	234	0.74	0.16543	0.00363	10.91651	0.37766	0.47930	0.01604	2512	26	2516	32	2524	70
BA-1-30	312	349	0.89	0.16638	0.00434	10.72828	0.44716	0.47502	0.02049	2522	33	2500	39	2506	90
BA-1-31	181	485	0.37	0.16583	0.00325	11.08038	0.33280	0.47958	0.01349	2516	23	2530	28	2525	59
BA-1-32	301	394	0.76	0.16585	0.00285	11.08553	0.25992	0.48032	0.00980	2516	18	2530	22	2529	43
BA-1-33	78	173	0.45	0.16577	0.00348	11.11676	0.30883	0.48307	0.01114	2515	21	2533	26	2541	48
BA-1-34	284	326	0.87	0.16383	0.00327	10.81377	0.25677	0.47423	0.00839	2496	19	2507	22	2502	37
BA-1-35	15	73	0.21	0.16943	0.00519	11.05126	0.38603	0.47848	0.01328	2552	27	2527	33	2521	58
BA-1-36	141	252	0.56	0.16987	0.00426	11.32641	0.32178	0.48393	0.01242	2556	21	2550	27	2544	54
BA-1-37	174	377	0.46	0.17246	0.00322	11.68578	0.30483	0.49013	0.01185	2582	19	2580	24	2571	51
BA-1-38	211	453	0.47	0.16937	0.00334	11.39286	0.28321	0.48639	0.01108	2551	19	2556	23	2555	48
BA-1-39	144	333	0.43	0.17280	0.00329	11.79176	0.29756	0.49336	0.01146	2585	19	2588	24	2585	49
BA-1-40	115	182	0.63	0.17095	0.00526	11.47450	0.40193	0.48548	0.01200	2567	29	2563	33	2551	52
绿帘角闪片岩															
BA-6-01	43	76	0.57	0.16605	0.00643	10.88737	0.42002	0.47872	0.00805	2518	60	2514	36	2522	35
BA-6-02	37	83	0.45	0.17303	0.00747	11.60496	0.51855	0.49041	0.00975	2587	68	2573	42	2572	42
BA-6-03	31	75	0.41	0.17201	0.00634	11.49648	0.44252	0.48687	0.01024	2577	55	2564	36	2557	44
BA-6-04	25	48	0.52	0.16730	0.00834	10.96258	0.58744	0.47763	0.01106	2531	83	2520	50	2517	48
BA-6-06	22	36	0.61	0.17094	0.00871	11.05665	0.56179	0.48362	0.01362	2567	72	2528	47	2543	59
BA-6-07	17	30	0.57	0.16959	0.00998	11.31638	0.57297	0.48648	0.01354	2554	73	2550	47	2555	59
BA-6-09	25	65	0.38	0.17201	0.00799	11.27332	0.50880	0.48346	0.01033	2577	68	2546	42	2542	45
BA-6-10	40	91	0.44	0.16485	0.00655	10.70540	0.40092	0.47778	0.00842	2506	57	2498	35	2518	37
BA-6-12	178	467	0.38	0.16951	0.00368	11.27238	0.26562	0.48152	0.00575	2553	35	2546	22	2534	25

续表 1

Continued Table 1

测点号	元素 ($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
BA-6-13	58	112	0.52	0.16827	0.00599	11.07630	0.38460	0.48151	0.00786	2540	53	2530	32	2534	34
BA-6-14	101	277	0.36	0.16787	0.00426	11.25990	0.29489	0.48620	0.00595	2537	40	2545	24	2554	26
BA-6-15	27	43	0.63	0.18633	0.01148	12.70769	0.77571	0.50389	0.01426	2710	92	2658	57	2630	61
BA-6-16	55	90	0.61	0.18752	0.00703	12.83487	0.49553	0.50078	0.00935	2721	57	2668	36	2617	40
BA-6-17	392	871	0.45	0.16715	0.00338	10.97577	0.23563	0.47502	0.00480	2529	33	2521	20	2506	21
BA-6-18	23	67	0.34	0.16696	0.00655	11.15098	0.45329	0.48581	0.00879	2527	63	2536	38	2553	38
BA-6-19	25	44	0.57	0.16652	0.00723	10.89290	0.46467	0.48178	0.01040	2523	63	2514	40	2535	45
BA-6-20	43	50	0.86	0.16809	0.00849	10.82605	0.54285	0.47853	0.01224	2539	74	2508	47	2521	53
BA-6-21	34	90	0.38	0.16742	0.00701	10.81510	0.44604	0.47623	0.01055	2532	60	2507	38	2511	46
BA-6-22	10	19	0.53	0.17163	0.01022	10.70025	0.55556	0.47365	0.01298	2574	75	2497	48	2500	57
BA-6-23	31	67	0.46	0.16766	0.00829	10.93492	0.55067	0.47756	0.01019	2534	78	2518	47	2517	44
BA-6-24	21	54	0.39	0.17200	0.00972	10.97272	0.57619	0.47826	0.01342	2577	76	2521	49	2520	59
BA-6-25	34	83	0.41	0.16685	0.00787	10.56291	0.49604	0.46509	0.00907	2526	73	2485	44	2462	40
BA-6-26	18	32	0.56	0.19138	0.01650	11.74621	0.67278	0.49413	0.01600	2754	80	2584	54	2589	69
BA-6-27	26	57	0.46	0.16871	0.00807	11.14081	0.53046	0.48517	0.01180	2545	70	2535	44	2550	51
BA-6-28	101	150	0.67	0.16864	0.00590	10.96508	0.37917	0.47382	0.00830	2544	51	2520	32	2500	36
BA-6-29	42	63	0.67	0.17644	0.00864	11.53215	0.55253	0.47798	0.00945	2620	74	2567	45	2518	41
BA-6-30	54	93	0.58	0.17690	0.00765	11.44048	0.46654	0.47443	0.00931	2624	61	2560	38	2503	41

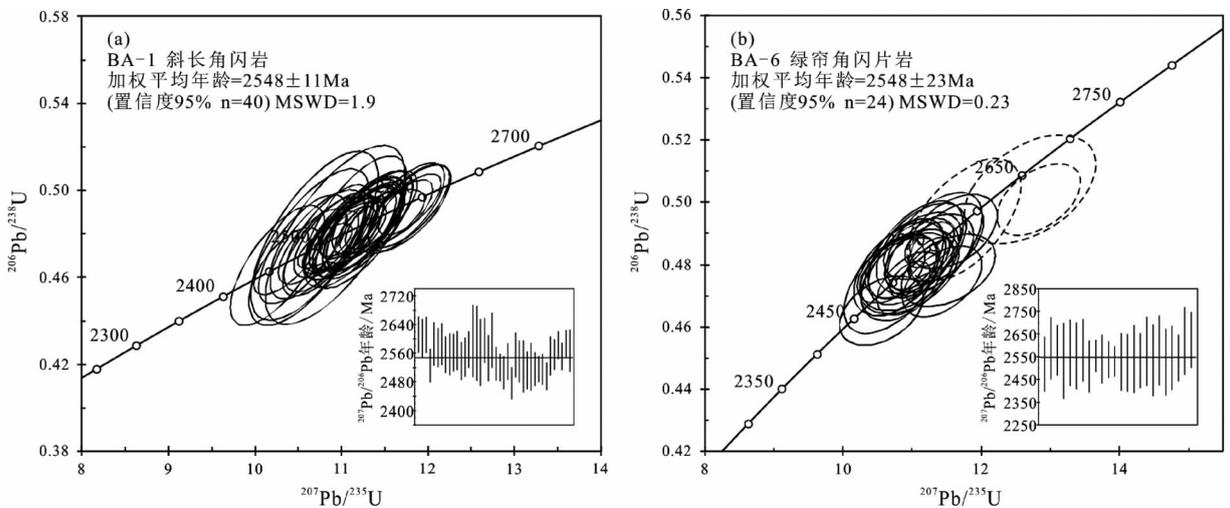


图 4 板石沟表壳岩中斜长角闪岩 BA-1 (a) 和绿帘角闪片岩 BA-6 (b) 锆石 U-Pb 谐和图

虚线为 3 颗捕获锆石

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons for amphibolite BA-1 (a) and epidote hornblende schist BA-6 (b) of Banshigou supracrustal rocks

0.29 ~ 8.89, 平均 5.10。单阶段模式年龄 t_{DMI} 为 2877 ~ 2469 Ma, 基本每颗测试锆石的 t_{DMI} 都大于锆石形成年龄。在 Hf 同位素演化图中 (图 5a), 多数测试点落在亏损地幔和球粒陨石演化线之间, 少数落在亏损地幔以上。

绿帘角闪片岩样品 (BA-6) 中 15 个测试点的 Hf 同位素分析结果显示, BA-6-21 测试点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281198, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值 (-0.78), 具有最老的单阶段模式年龄 (2871 Ma), 其余测试点测得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281299 ~

0.281413, 相应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.32 ~ 8.03, t_{DMI} 为 2713 ~ 2544 Ma, 测试点基本都投在亏损地幔演化线附近, BA-6-21 则投在球粒陨石演化线之下 (图 5b)。

5.3 地球化学

斜长角闪岩和角闪片岩的主量、微量元素分析结果见表 3。其中, 与测年样品 BA-1 和 BA-6 相对应的地球化学样品分别为 BC-1 和 BC-7。

表2 板石沟表壳岩 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotope data of Banshigou supracrustal rocks

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	error	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	error	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	error	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
斜长角闪岩												
BA-1-01	2612	0.051021	0.000227	0.001096	0.000001	0.281367	0.000024	-49.70	7.08	2638	2654	-0.97
BA-1-02	2602	0.051668	0.000175	0.001212	0.000004	0.281389	0.000028	-48.93	7.43	2616	2624	-0.96
BA-1-03	2611	0.053040	0.000238	0.001206	0.000007	0.281362	0.000027	-49.85	6.71	2652	2676	-0.96
BA-1-04	2525	0.070643	0.000827	0.001634	0.000015	0.281339	0.000027	-50.66	3.24	2714	2821	-0.95
BA-1-05	2586	0.096237	0.001701	0.002076	0.000043	0.281408	0.000027	-48.22	6.26	2649	2684	-0.94
BA-1-06	2576	0.061889	0.001651	0.001350	0.000031	0.281347	0.000029	-50.39	5.14	2683	2745	-0.96
BA-1-07	2585	0.061063	0.000706	0.001381	0.000009	0.281264	0.000032	-53.34	2.31	2800	2925	-0.96
BA-1-08	2556	0.052080	0.000533	0.001166	0.000010	0.281302	0.000029	-51.99	3.40	2731	2835	-0.96
BA-1-09	2557	0.124527	0.000956	0.002644	0.000011	0.281378	0.000026	-49.31	3.55	2734	2827	-0.92
BA-1-10	2562	0.126454	0.000402	0.002791	0.000010	0.281397	0.000027	-48.62	4.10	2717	2797	-0.92
BA-1-11	2567	0.129527	0.000750	0.002840	0.000013	0.281369	0.000027	-49.63	3.10	2761	2863	-0.91
BA-1-12	2538	0.053750	0.000122	0.001172	0.000010	0.281401	0.000022	-48.49	6.51	2596	2631	-0.96
BA-1-13	2549	0.052317	0.000062	0.001181	0.000004	0.281273	0.000023	-53.01	2.19	2772	2904	-0.96
BA-1-14	2570	0.134250	0.000977	0.002901	0.000009	0.281291	0.000032	-52.38	0.29	2877	3036	-0.91
BA-1-15	2594	0.052254	0.000846	0.001143	0.000022	0.281383	0.000026	-49.11	7.19	2618	2633	-0.97
BA-1-16	2587	0.073561	0.001611	0.001653	0.000032	0.281366	0.000027	-49.73	5.51	2678	2731	-0.95
BA-1-17	2562	0.120303	0.000478	0.002640	0.000014	0.281387	0.000031	-48.99	3.98	2721	2804	-0.92
BA-1-18	2596	0.065476	0.000739	0.001662	0.000021	0.281378	0.000025	-49.28	6.14	2661	2699	-0.95
BA-1-19	2546	0.023091	0.000598	0.000497	0.000014	0.281304	0.000022	-51.91	4.42	2681	2765	-0.99
BA-1-20	2596	0.113686	0.001534	0.002446	0.000037	0.281400	0.000025	-48.51	5.53	2687	2736	-0.93
BA-1-21	2531	0.047278	0.000066	0.001152	0.000004	0.281365	0.000024	-49.77	5.10	2645	2712	-0.97
BA-1-22	2520	0.060742	0.000560	0.001338	0.000006	0.281338	0.000027	-50.71	3.59	2694	2796	-0.96
BA-1-23	2506	0.029696	0.000165	0.000705	0.000006	0.281320	0.000022	-51.34	3.72	2674	2777	-0.98
BA-1-24	2537	0.111174	0.001744	0.002470	0.000033	0.281426	0.000025	-47.58	5.16	2652	2713	-0.93
BA-1-25	2476	0.024603	0.000716	0.000577	0.000017	0.281398	0.000023	-48.59	6.03	2560	2612	-0.98
BA-1-26	2555	0.022483	0.000101	0.000527	0.000003	0.281399	0.000022	-48.54	7.96	2555	2555	-0.98
BA-1-27	2537	0.040783	0.000430	0.000964	0.000008	0.281415	0.000022	-48.00	7.34	2564	2580	-0.97
BA-1-28	2523	0.074956	0.000534	0.001659	0.000009	0.281449	0.000022	-46.79	7.05	2563	2586	-0.95
BA-1-29	2512	0.048394	0.000059	0.001143	0.000002	0.281338	0.000023	-50.73	3.73	2681	2781	-0.97
BA-1-30	2522	0.055051	0.001073	0.001222	0.000028	0.281316	0.000022	-51.48	3.05	2716	2830	-0.96
BA-1-31	2516	0.078957	0.000233	0.001955	0.000006	0.281355	0.000023	-50.10	3.06	2715	2825	-0.94
BA-1-32	2516	0.074720	0.000542	0.001616	0.000005	0.281340	0.000026	-50.64	3.10	2711	2823	-0.95
BA-1-33	2515	0.050664	0.001028	0.001159	0.000022	0.281379	0.000024	-49.26	5.25	2625	2690	-0.97
BA-1-34	2496	0.055426	0.000454	0.001219	0.000005	0.281496	0.000027	-45.11	8.89	2469	2452	-0.96
BA-1-35	2552	0.051103	0.000978	0.001182	0.000024	0.281436	0.000025	-47.23	8.07	2548	2546	-0.96
BA-1-36	2556	0.048807	0.000582	0.001126	0.000014	0.281405	0.000028	-48.34	7.15	2587	2606	-0.97
BA-1-37	2582	0.051791	0.000279	0.001296	0.000005	0.281343	0.000022	-50.52	5.23	2684	2743	-0.96
BA-1-38	2551	0.050768	0.000741	0.001196	0.000015	0.281372	0.000024	-49.50	5.74	2637	2688	-0.96
BA-1-39	2585	0.053235	0.000931	0.001279	0.000018	0.281274	0.000024	-52.97	2.86	2778	2891	-0.96
BA-1-40	2567	0.032936	0.000116	0.000763	0.000003	0.281395	0.000025	-48.70	7.66	2577	2583	-0.98
绿帘角闪片岩												
BA-6-01	2518	0.036461	0.000873	0.001114	0.000027	0.281383	0.000027	-49.12	5.53	2617	2676	-0.97
BA-6-04	2531	0.015579	0.000082	0.000449	0.000002	0.281350	0.000026	-50.29	5.79	2616	2670	-0.99
BA-6-07	2554	0.024268	0.000233	0.000682	0.000005	0.281354	0.000029	-50.16	6.03	2628	2673	-0.98
BA-6-09	2577	0.027105	0.000549	0.000848	0.000011	0.281299	0.000033	-52.10	4.32	2713	2795	-0.97
BA-6-10	2506	0.020425	0.000154	0.000574	0.000004	0.281389	0.000028	-48.92	6.38	2573	2614	-0.98
BA-6-12	2553	0.026229	0.000134	0.000928	0.000012	0.281396	0.000027	-48.65	7.10	2586	2606	-0.97
BA-6-13	2540	0.030895	0.000399	0.000906	0.000010	0.281390	0.000030	-48.86	6.64	2593	2624	-0.97
BA-6-14	2537	0.023455	0.000356	0.000722	0.000010	0.281374	0.000026	-49.44	6.31	2603	2643	-0.98

续表 2

Continued Table 2

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	error	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	error	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	error	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
BA-6-19	2523	0.022591	0.000290	0.000666	0.000007	0.281357	0.000030	-50.06	5.47	2622	2683	-0.98
BA-6-20	2539	0.020352	0.000338	0.000596	0.000009	0.281377	0.000033	-49.35	6.66	2591	2622	-0.98
BA-6-21	2532	0.027679	0.000935	0.001142	0.000048	0.281198	0.000046	-55.65	-0.78	2871	3072	-0.97
BA-6-22	2574	0.022843	0.000125	0.000672	0.000002	0.281375	0.000035	-49.41	7.27	2598	2613	-0.98
BA-6-24	2577	0.027641	0.000632	0.000793	0.000018	0.281360	0.000033	-49.92	6.61	2626	2655	-0.98
BA-6-25	2526	0.020071	0.000254	0.000604	0.000008	0.281407	0.000031	-48.26	7.45	2550	2564	-0.98
BA-6-27	2545	0.018672	0.000163	0.000625	0.000002	0.281413	0.000031	-48.08	8.03	2544	2543	-0.98

注: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$ (Söderlund *et al.*, 2004); 球粒陨石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.0332、0.282772 (Blichert-Toft and Albarède, 1997); 亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.03842、0.28325 (Griffin *et al.*, 2000)

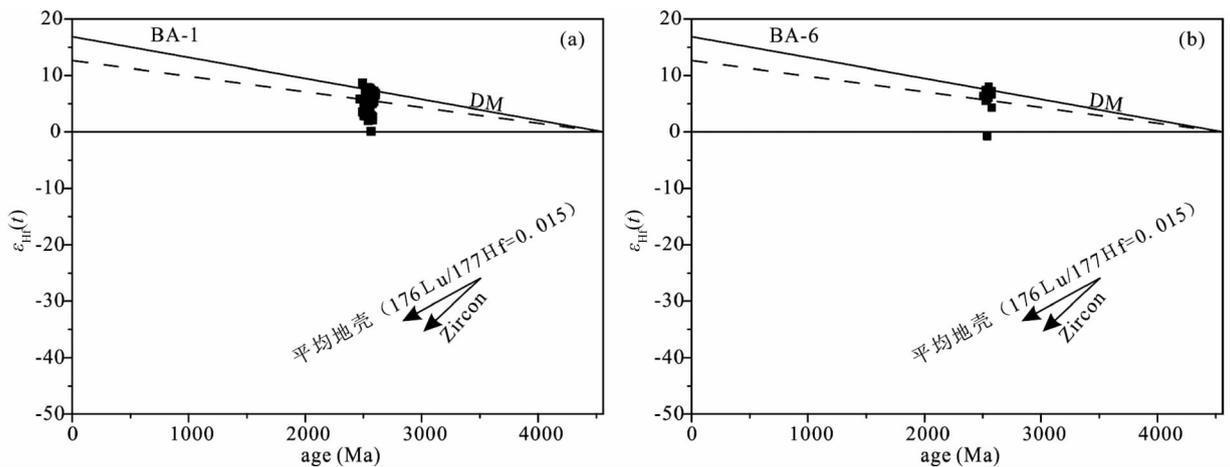


图 5 板石沟表壳岩中斜长角闪岩 BA-1 (a) 和绿帘角闪片岩 BA-6 (b) 中锆石 Age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

虚线为 0.75 倍的亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值演化线

Fig. 5 Age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ plot of zircons for amphibolite BA-1 (a) and epidote hornblende schist BA-6 (b) of Banshigou supracrustal rocks

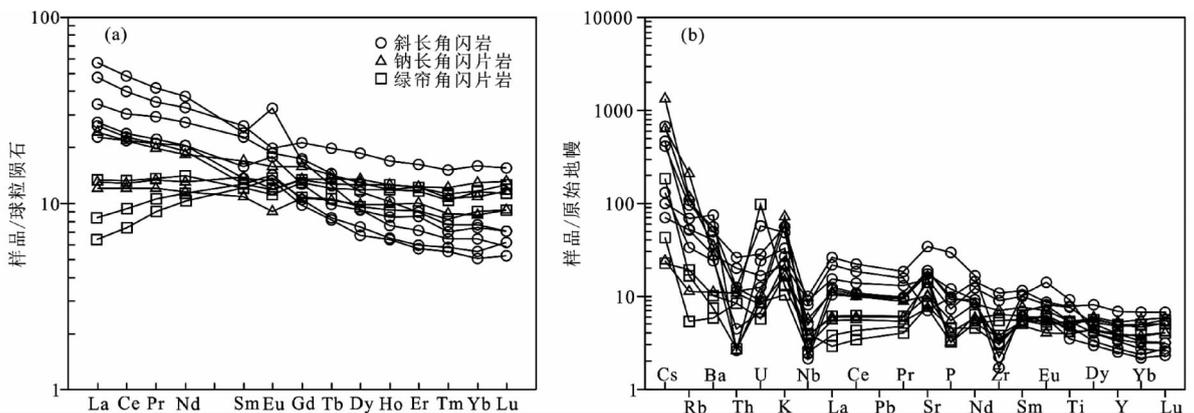


图 6 板石沟表壳岩球粒陨石标准化 REE 配分图 (a, 标准化值据 Boynton, 1984) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) of Banshigou supracrustal rocks

表3 板石沟表壳岩主量元素(wt%)、稀土微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 3 Major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of Banshigou supracrustal rocks

样品号	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	8-3	8-5	8-6	BC-7	BC-8	BC-9
岩性	斜长角闪岩						钠长角闪片岩			绿帘角闪片岩		
SiO ₂	50.6	48.9	49.7	47.9	47.7	54.0	51.2	47.3	47.3	46.6	45.5	50.2
Al ₂ O ₃	17.50	15.25	13.95	16.45	14.65	11.30	12.55	15.25	14.95	15.05	11.50	12.55
TiO ₂	1.98	1.03	1.66	0.75	1.16	1.69	1.17	1.02	0.85	1.16	1.12	0.90
Fe ₂ O ₃	2.68	3.80	2.87	2.42	4.48	7.34	4.18	3.69	2.93	3.66	7.68	7.40
FeO	8.61	7.59	9.30	8.36	11.05	9.66	11.20	8.80	9.22	9.33	7.19	7.18
K ₂ O	0.81	1.45	0.65	0.68	0.99	1.69	0.50	1.78	2.16	0.51	0.31	0.39
Na ₂ O	4.04	2.26	2.79	3.08	2.92	1.93	2.39	2.70	2.21	1.87	0.75	0.60
BaO	0.04	0.05	0.03	0.03	0.07	0.05	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
CaO	7.91	9.31	9.96	10.35	9.21	6.52	9.16	8.55	8.74	12.80	17.75	13.90
MgO	3.43	6.55	6.41	6.70	5.09	2.85	5.12	5.46	8.64	5.60	4.73	4.86
MnO	0.20	0.17	0.19	0.17	0.22	0.20	0.23	0.26	0.20	0.25	0.36	0.23
P ₂ O ₅	0.64	0.21	0.16	0.20	0.26	0.21	0.12	0.09	0.07	0.10	0.07	0.07
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02
SrO	0.09	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04
SO ₃	0.20	0.17	0.02	0.01	1.01	1.00	1.82	0.77	0.16	0.34	2.78	0.84
LOI	0.56	1.83	0.79	1.01	0.85	1.16	0.63	2.45	1.05	0.68	1.75	1.18
Total	99.30	98.64	98.53	98.17	99.74	99.63	100.33	98.21	98.57	98.02	101.56	100.37
A/CNK	0.80	0.69	0.60	0.67	0.65	0.67	0.59	0.70	0.68	0.56	0.34	0.47
Mg [#]	41.5	60.6	55.1	58.8	45.1	34.5	44.9	52.5	62.6	51.7	54.0	54.7
La	17.8	8.1	10.6	8.5	7.1	14.8	7.6	4.1	3.8	2.0	2.6	4.2
Ce	39.2	18.5	24.5	19.2	17.7	32.5	17.8	10.5	9.9	6.0	7.6	10.9
Pr	5.12	2.58	3.58	2.71	2.57	4.30	2.44	1.65	1.49	1.11	1.30	1.68
Nd	22.6	11.5	16.4	12.3	12.3	19.7	11.1	7.9	7.0	6.2	6.9	8.6
Sm	4.63	2.49	4.45	2.67	3.08	5.10	3.35	2.74	2.14	2.41	2.50	2.39
Eu	2.37	1.05	1.37	0.98	1.32	1.46	1.18	0.88	0.67	0.83	0.88	1.01
Gd	4.35	2.71	4.51	2.55	3.27	5.53	4.13	3.54	2.81	3.38	3.51	2.82
Tb	0.59	0.40	0.69	0.39	0.47	0.94	0.68	0.65	0.50	0.58	0.61	0.51
Dy	2.97	2.41	3.73	2.19	2.99	6.02	4.21	4.42	3.23	3.88	4.12	3.15
Ho	0.55	0.47	0.74	0.46	0.61	1.22	0.86	0.92	0.72	0.86	0.92	0.67
Er	1.51	1.26	1.89	1.21	1.80	3.43	2.60	2.61	2.14	2.47	2.58	1.95
Tm	0.21	0.19	0.25	0.18	0.23	0.49	0.35	0.40	0.29	0.34	0.37	0.27
Yb	1.35	1.16	1.61	1.06	1.56	3.33	2.30	2.74	1.84	2.45	2.46	1.91
Lu	0.19	0.20	0.23	0.17	0.23	0.50	0.38	0.43	0.30	0.37	0.41	0.30
δEu	1.59	1.23	0.93	1.13	1.26	0.84	0.97	0.86	0.83	0.89	0.91	1.19
δCe	0.95	0.95	0.93	0.93	0.97	0.95	0.97	0.95	0.97	0.93	0.96	0.96
(La/Yb) _N	8.91	4.72	4.45	5.42	3.08	3.00	2.23	1.01	1.40	0.55	0.71	1.49
ΣREE	103.4	53.02	74.55	54.57	55.23	99.32	58.98	43.48	36.83	32.88	36.76	40.36
LREE	91.72	44.22	60.90	46.36	44.07	77.86	43.47	27.77	25.00	18.55	21.78	28.78
HREE	11.72	8.80	13.65	8.21	11.16	21.46	15.51	15.71	11.83	14.33	14.98	11.58
LREE/HREE	7.83	5.03	4.46	5.65	3.95	3.63	2.80	1.77	2.11	1.29	1.45	2.49
Cs	3.72	3.28	0.56	1.03	0.79	5.32	0.19	10.50	4.98	0.18	1.47	0.34
Rb	33.6	60.7	32.7	21.3	43.8	68.9	7.1	74.7	132.5	12.1	10.5	3.4
Ba	283	392	195.0	168.5	522	344	76.6	246	188.5	71.1	52.1	41.1
Th	0.96	1.06	1.71	0.38	0.22	2.23	0.91	1.04	0.22	<0.05	0.23	0.71
U	0.26	1.21	0.35	0.14	0.51	0.60	0.17	0.19	0.22	0.12	0.18	2.05
Zr	34	35	101	25	19	120	79	71	40	34	61	42
Hf	0.9	1.0	3.0	0.9	0.8	3.7	2.2	1.8	1.4	1.3	2.0	1.5
Sr	728	399	324	399	369	149.0	213	208	156.5	163.0	335	297
Y	14.9	12.3	18.0	11.4	15.4	31.1	22.7	23.9	18.1	21.7	22.7	17.3
Nb	7.1	3.5	6.4	1.7	1.5	5.8	4.1	2.7	2.1	2.8	1.8	2.7
Ta	0.5	0.3	0.4	<0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3
Ga	20.4	18.4	21.5	16.9	16.6	17.6	17.4	18.4	16.4	17.2	20.5	14.9
Cr	50	180	60	70	170	20	90	240	270	240	70	100
V	69	226	360	217	294	470	406	320	289	391	393	313

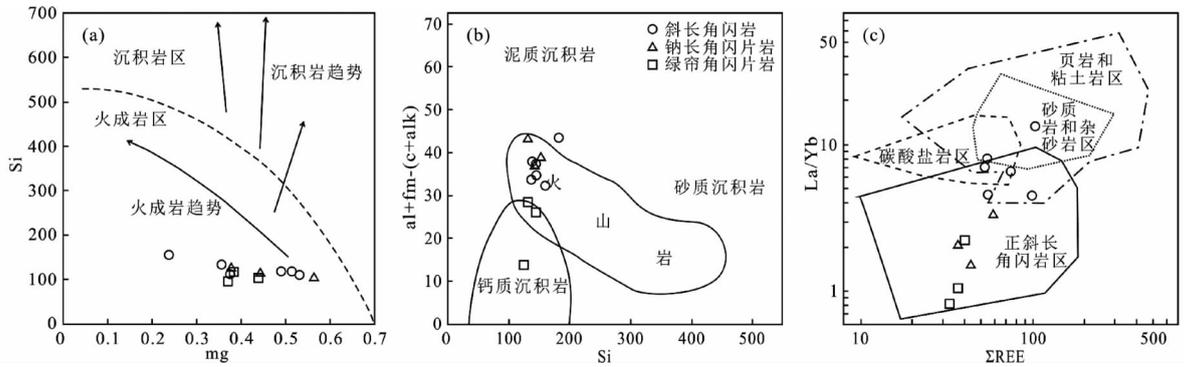


图7 板石沟表壳岩原岩恢复图解(a, 据 Van de Kamp and Beakhouse, 1979; b, 据 Simonen, 1953; c, 据王仁民等, 1987)

Fig. 7 Protolith reconstruction diagrams of Banshigou supracrustal rocks (a, after Van de Kamp and Beakhouse, 1979; b, after Simonen, 1953; c, after Wang *et al.*, 1987)

斜长角闪岩样品 SiO_2 含量为 47.7% ~ 54.0%, Al_2O_3 含量 11.30% ~ 17.50%, Fe_2O_3 含量 2.42% ~ 7.34%, FeO 含量 7.59% ~ 11.05%, Na_2O 含量皆多于 K_2O 含量, $A/\text{CNK} = 0.60 \sim 0.80$, 属准铝质。稀土元素总量 $53.02 \times 10^{-6} \sim 103.4 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 3.63 \sim 7.83$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.00 \sim 8.91$, 轻稀土富集重稀土亏损, 具有右倾的稀土元素配分曲线(图 6a), Eu 总体呈现无异常或正异常 ($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.59$)。微量元素富集大离子亲石元素 Cs、Rb、Ba 和 K, 亏损高场强元素 Th、Nb 和 Zr(图 6b)。

角闪片岩中 8-3、8-5 和 8-6 为钠长角闪片岩, BC-7、BC-8 和 BC-9 为绿帘角闪片岩。钠长角闪片岩样品 SiO_2 含量 47.3% ~ 51.2%, Al_2O_3 含量 12.55% ~ 15.25%, Fe_2O_3 含量 2.93% ~ 4.18%, FeO 含量 8.80% ~ 11.20%, Na_2O 含量 2.21% ~ 2.70%, K_2O 含量 0.50% ~ 2.16%, $A/\text{CNK} = 0.59 \sim 0.70$ 。绿帘角闪片岩样品 SiO_2 含量 45.5% ~ 50.2%, Al_2O_3 含量 11.50% ~ 15.05%, Fe_2O_3 含量 3.66% ~ 7.68%, FeO 含量 7.18% ~ 9.33%, Na_2O 含量 0.60% ~ 1.87%, K_2O 含量 0.31% ~ 0.51%, $A/\text{CNK} = 0.34 \sim 0.56$ 。对比可见钠长角闪片岩的 Na_2O 、 K_2O 含量远高于绿帘角闪片岩, FeO 和 MgO 含量也较高, 而绿帘角闪片岩则具有较高的 CaO 和 Fe_2O_3 含量, 这与岩石的矿物组合特征相符。钠长角闪片岩由于含钠长石、黑云母和较多的角闪石而富 Na、K、Ca 和 Fe^{2+} , 绿帘角闪片岩含较多的绿帘石而富 Ca 和 Fe^{3+} 。两种角闪片岩稀土元素总量都较低 ($\Sigma\text{REE} = 32.88 \times 10^{-6} \sim 58.98 \times 10^{-6}$), $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.29 \sim 2.80$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.55 \sim 2.23$, 轻重稀土分馏程度低。稀土元素配分曲线较为平坦, Eu 异常不明显(图 6a), 微量元素富集大离子亲石元素 Cs、K 和 Sr, 亏损高场强元素 Nb(图 6b)。

硅碱图显示斜长角闪岩和角闪片岩样品基本都为亚碱性系列(图略), 用 AFM 图解进一步判断属于拉斑玄武岩系列(图略)。

运用变质岩原岩判别图解对板石沟表壳岩进行了原岩恢复, $\text{Si}-\text{mg}$ 图解(图 7a)中样品全都落在火成岩区, 而 $(\text{al} +$

$\text{fm})-(\text{c} + \text{alk})-\text{Si}$ 图解(图 7b)中, 绿帘角闪片岩中有 2 个(BC-7 和 BC-9)落在火山岩区与钙质沉积岩区的重合区域, 1 个(BC-8)落在钙质沉积岩区, 这是由其矿物组合中绿帘石含量多, 使得样品 CaO 和 Fe_2O_3 含量相对较高, 在计算尼格里值时钙组分偏大导致的, 其余样品都落在火山岩区并具较小的 Si 值, 可确定它们的原岩主要为基性火山岩。 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ 图解中, 除 BC-1 外, 其余的斜长角闪岩、钠长角闪岩和绿帘角闪片岩多落在正斜长角闪岩区(图 7c), 同样表明其原岩类型主要为基性火山岩。综合岩石矿物组成和化学成分特征, 认为板石沟表壳岩原岩应为玄武质火山岩。

6 讨论

6.1 表壳岩的形成时代

华北克拉通东北部的太古宙表壳岩自南西向北东依次分布在冀东、鞍山、本溪、抚顺、清原、白山板石沟、靖宇北部、抚松西北部以及延边和龙地区。

在冀东地区, 滦平县周台子铁矿的围岩斜长角闪岩(Z-1-7)中, 岩浆成因锆石上交点年龄为 $2512 \pm 21\text{Ma}$, 代表火山喷发和周台子铁矿沉积年龄, 变质成因锆石加权平均年龄为 $2394 \pm 55\text{Ma}$, 代表了变质作用时间, 并且大部分锆石具正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 模式年龄大于锆石形成年龄, 表明岩浆受地壳物质混染(相鹏等, 2012)。在鞍山地区, 陈台沟铁矿夹层中绿泥石英片岩(CTG-7)的岩浆锆石年龄为 $2551 \pm 10\text{Ma}$, 代表岩石结晶年龄, 变质锆石年龄为 $2469 \pm 23\text{Ma}$, 为后期变质作用时间, 还有 3 颗年龄为 $2739 \pm 50\text{Ma}$ 的捕获锆石, 代表早期岩浆活动时间, 岩浆锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.48 \sim 7.54$, t_{DM2} 介于 $3133 \sim 2580\text{Ma}$, 变质锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.23 \sim 1.16$, t_{DM2} 介于 $3115 \sim 2906\text{Ma}$, 被解释为源区以亏损地幔物质为主, 受古老地壳物质混染, 暗示鞍本地区新太古代地壳增生(代堰镛等, 2013)。而铁架山表壳岩中黑云变粒岩碎屑锆石年龄为 $2975 \pm 9\text{Ma}$, 云母石英片岩碎屑锆石年龄为 $2959 \pm 6\text{Ma}$, 变质石英岩碎屑锆石年龄为 $2981 \pm 9\text{Ma}$, 则表明中太古代为鞍山地区

重要陆壳增生期(殷小艳等, 2006; 万渝生等, 2007)。在本溪地区,歪头山铁矿夹层中斜长角闪岩(WTS-11)的岩浆锆石年龄为 2533 ± 11 Ma, 存在 2610 ± 5 Ma 的捕获锆石, 微量元素特征表明其形成于弧后盆地环境(代堰锆等, 2012)。在抚顺地区, 汤图斜长角闪岩(12LN25-2)岩浆锆石取得了 2530 ± 5 Ma 的谐和年龄(白翔等, 2014); 小菜河角闪变粒岩(LQ0107)中岩浆锆石年龄为 2515 ± 6 Ma, 汤图角闪变粒岩(LF0107)中岩浆锆石年龄为 2510 ± 7 Ma, 代表太古宙晚期一次强烈的构造热事件, 认为其形成于岛弧环境, 指示弧陆碰撞陆壳增厚(万渝生等, 2005a)。在清原地区, 红透山铜锌矿的围岩黑云母斜长片麻岩(N19)具有明显的核幔边结构, 核部岩浆锆石上交点年龄为 2552 Ma 代表海底火山岩喷发时间, 幔部变质重结晶锆石年龄为 2520 Ma 代表变质时间(钱焯等, 2013); 黑云斜长角闪岩的形成年龄为 2500 ± 7 Ma, 形成环境为弧后盆地(张增杰等, 2013); 树基沟铜锌矿的围岩黑云斜长片麻岩同样具核幔边结构, 核部岩浆锆石上交点年龄为 2565 Ma, 幔部锆石年龄为 2529 ~ 2519 Ma (张雅静等, 2014); 清原北部清原群中角闪变粒岩(LQ0104)变质锆石获得了 2479 ± 5 Ma 的变质年龄(万渝生等, 2005a)。在白山地区, 五道羊岔钒钛磁铁矿的围岩斑杂状斜长角闪岩中岩浆锆石上交点年龄为 2526 ± 35 Ma, 其原岩为玄武岩, 形成于板块汇聚边缘岛弧构造环境(邵建波等, 2014)。

可以看出, 华北克拉通东北部的太古宙表壳岩形成时间多集中在 2.55 ~ 2.50 Ga, 并且普遍经历过后期变质事件, 各地的表壳岩多反映出岛弧构造环境, 部分地区的研究成果暗示存在新太古代地壳增生事件。板石沟表壳岩中斜长角闪岩(BA-1)的年龄为 2548 ± 11 Ma, 绿帘角闪片岩(BA-6)的年龄为 2548 ± 23 Ma, 表明表壳岩形成于新太古代晚期, 在绿帘角闪片岩中发现 3 颗新太古代早期岩浆锆石(2754 ± 80 Ma ~ 2710 ± 92 Ma), 是绿帘角闪片岩原岩岩浆在上升过程中捕获的锆石, 代表板石沟地区新太古代早期岩浆活动。板石沟表壳岩与抚顺、清原、鞍山、冀东的表壳岩形成时间相近, 表明华北克拉通东北部新太古代晚期(2.55 ~ 2.50 Ga)发生过一次重要的岩浆事件。

6.2 原岩的物质来源

板石沟表壳岩中的斜长角闪岩和绿帘角闪片岩的原岩主要为玄武质火山岩, 对于地幔来源的玄武质岩石, 如果 Hf 模式年龄与其形成年龄相近, 表明其来源于亏损地幔, 如果 Hf 模式年龄大于其形成年龄, 则表明其岩浆源区受到地壳物质的混染或来自于富集地幔(吴福元等, 2007), 壳幔相互作用过程中结晶出来的锆石的 Hf 同位素组成取决于亏损地幔和地壳端元所占的比例(Zheng *et al.*, 2006; 郑永飞等, 2007)。

BA-1 的 Hf 同位素测试结果显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都为正值(0.29 ~ 8.89), 指示其源区主要由亏损地幔物质组成, 单阶段模式年龄 t_{DM1} 主要集中在 2734 ~ 2616 Ma 之间, 大于锆石

的形成年龄(2548 Ma), 表明岩浆源区受到了地壳物质的混染, 这与斜长角闪岩较富集轻稀土的特征相符。BA-6 中的锆石多具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, t_{DM1} 主要为 2713 ~ 2544 Ma, 同样指示亏损地幔物质在源区中作为主导, 而 BA-6-21 测试点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值(-0.8), 单阶段模式年龄为 2871 Ma, 则反映出可能有极少量古老地壳物质加入。

当最大 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与同期亏损地幔的初始 Hf 同位素比值一致, 且对应的 Hf 模式年龄与锆石从幔源岩浆中生长的时间相似时, 则可以揭示新生地壳生长事件(Zheng *et al.*, 2006; 郑永飞等, 2007)。这也就是说具有最大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的锆石, 如果与该时期亏损地幔的 Hf 同位素比值接近, 并同时满足 Hf 模式年龄与形成年龄接近, 则可用于指示地壳生长。但是如何衡量锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是否最大呢? 根据 Belousova *et al.* (2010) 的方法, 计算出亏损地幔的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值再乘以 0.75, 如果锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于这个值则可表示其具有最大 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。

在 Hf 同位素演化图中(图 5), 虚线为 0.75 倍的亏损地幔 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 在虚线之上即表示具有大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。BA-1 中有 18 个测试点位于虚线之上, 其中 BA-1-35 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2552$ Ma, $t_{\text{DM1}} = 2548$ Ma)、BA-1-26 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2555$ Ma, $t_{\text{DM1}} = 2555$ Ma) 和 BA-1-40 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2567$ Ma, $t_{\text{DM1}} = 2577$ Ma) 的模式年龄与锆石形成年龄接近。BA-6 中 12 个测试点分布在虚线之上, 其中 BA-6-27 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2545$ Ma, $t_{\text{DM1}} = 2544$ Ma, 模式年龄与形成年龄接近, 表明板石沟地区在 2550 Ma 左右可能有新生地壳形成。

上述分析结果表明, 板石沟表壳岩的岩浆主要来源于于亏损地幔, 同时伴随少量古老地壳物质的再造, 部分具有高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值且 t_{DM1} 与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄相近的锆石反映板石沟地区新太古代晚期可能发生了地壳增生事件。

6.3 构造背景

首先利用构造环境判别图解对板石沟表壳岩的构造背景进行判别, 在 Pearce and Cann (1973) 的 Ti/100-Zr-Sr/2 图解中(图 8a), 斜长角闪岩和角闪片岩样品主要落入岛弧拉斑玄武岩及其边缘, 在 Mullen (1983) 的 10MnO-TiO₂-10P₂O₅ 图解(图 8b)中, 样品同样多投入岛弧拉斑玄武岩区域, 表明表壳岩原岩形成于岛弧环境。为了避免利用构造环境判别图解得出的判别结果可能存在的不确定性, 结合地球化学性质稳定的微量元素对构造环境进行判断。Condie (1989) 根据不相容元素在演化过程中相对稳定的性质, 提出了用其区分 T-MORB、N-MORB 和 ARCB (IAB、CABI 和 CABC) 的详细步骤和判别参数(图 9、表 4)。首先根据 Nb/La、Hf/Ta、La/Ta 和 Ti/Y 比值特征, 确定板石沟斜长角闪岩和角闪片岩属于岛弧玄武岩或 NMORB, 然后根据 Th/Yb、Th/Nb、Nb/La 和 Hf/Th 元素比值, 确定为岛弧玄武岩, 再根据 Zr/Y 和 Ta/Yb 比值, 判别其属于岛弧拉斑玄武岩或岛弧钙碱性玄武岩(表 4), 虽然使用该方法进一步判断遇到困难, 但已经能确定原

表 4 玄武岩分类参数 (据 Condie, 1989) 及板石沟表壳岩参数

Table 4 Basalt classification screens parameters (after Condie, 1989) and the parameters of Banshigou supracrustal rocks

步骤 1	WPB-MORB	ARCB-NMORB	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	8-3	8-5	8-6	BC-7	BC-8	BC-9
优先参数														
Nb/La	>1	≤1	0.4	0.43	0.6	0.2	0.21	0.39	0.54	0.66	0.55	1.4	0.69	0.64
Hf/Ta	<5	≥5	1.8	3.33	7.5	>9	8	12.3	11	9	14	13	20	5
La/Ta	≤15	>15	35.6	27	26.5	>85	71	49.3	38	20.5	38	20	26	14
Ti/Y	≥350	<350	796	502	553	394	451	326	309	256	281	320	296	312
其次参数														
Ti/V	>30	≤30	172	27	28	21	24	22	17	19	18	18	17	17
TiO ₂ (wt%)	>1.25	≤1.25	1.98	1.03	1.66	0.75	1.16	1.69	1.17	1.02	0.85	1.16	1.12	0.9
Ta (×10 ⁻⁶)	>0.7	≤0.7	0.5	0.3	0.4	<0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3
Nb (×10 ⁻⁶)	>12	≤12	7.1	3.5	6.4	1.7	1.5	5.8	4.1	2.7	2.1	2.8	1.8	2.7
步骤 2	WPB, T-EMORB	NMORB												
Hf/Th	<8	≥8												
Ce/Nb	≤2	>2												
步骤 3	NMORB	ARCB	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	8-3	8-5	8-6	BC-7	BC-8	BC-9
Th/Yb	≤0.1	>0.1	0.71	0.91	1.06	0.36	0.14	0.67	0.4	0.38	0.12	<0.02	0.09	0.37
Th/Nb	≤0.07	>0.07	0.14	0.3	0.27	0.22	0.15	0.38	0.22	0.39	0.1	<0.02	0.13	0.26
Nb/La	>0.8	≤0.8	0.4	0.43	0.6	0.2	0.21	0.39	0.54	0.66	0.55	1.4	0.69	0.64
Hf/Th	≥8	<8	0.94	0.94	1.75	2.37	3.64	1.66	2.42	1.73	6.36	>26	8.7	2.11
步骤 4	IAB-CABI	CABC	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	8-3	8-5	8-6	BC-7	BC-8	BC-9
Zr/Y	<3	≥3	2.28	2.85	5.61	2.19	1.23	3.86	3.48	2.97	2.21	1.57	2.69	2.43
Ta/Yb	≤0.1	>0.1	0.37	0.26	0.25	<0.09	0.06	0.09	0.09	0.07	0.05	0.04	0.04	0.16
步骤 5	IAB	CABI	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	8-3	8-5	8-6	BC-7	BC-8	BC-9
Th/Yb	≤0.3	>0.3	0.71	0.91	1.06	0.36	0.14	0.67	0.4	0.38	0.12	<0.02	0.09	0.37
Ti/Zr	≥85	<85	349	176	99	180	366	84	89	86	127	204	110	128
La/Ta	>50	≤50	35.6	27	26.5	>85	71	49.33	38	20.5	38	20	26	14

注: 步骤 1 中, 优先参数比值更具决定性; Ti 的含量根据 TiO₂ 换算而来, 并非实验测得, 因此相关参数可能会有误差

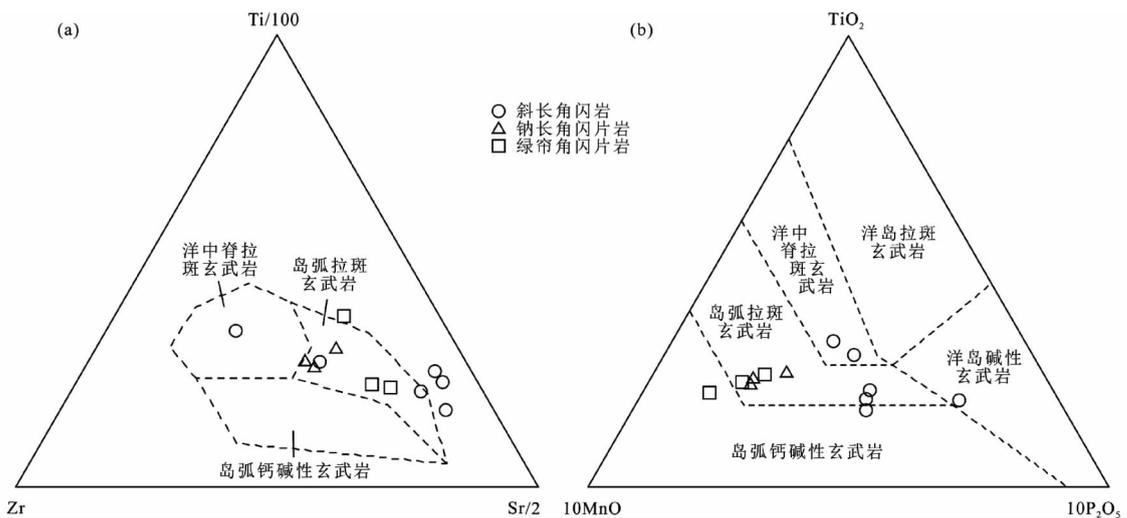


图 8 板石沟表壳岩原岩构造判别图解 (a, 据 Pearce and Cann, 1973; b, 据 Mullen, 1983)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of protoliths of Banshigou supracrustal rocks (a, after Pearce and Cann, 1973; b, after Mullen, 1983)

岩形成于岛弧环境。

万渝生等 (2005a) 通过研究认为华北克拉通太古宙晚期弧陆碰撞增生造山带从辽宁抚顺-清原向南西经鞍山、大石

桥、建平等地延伸到冀东地区, 并把该带称为吉-辽-冀造山带。板石沟表壳岩岩石类型主要包括斜长角闪岩、斜长片麻岩、角闪片岩和角闪斜长片麻岩, 变质原岩主要为拉斑玄武

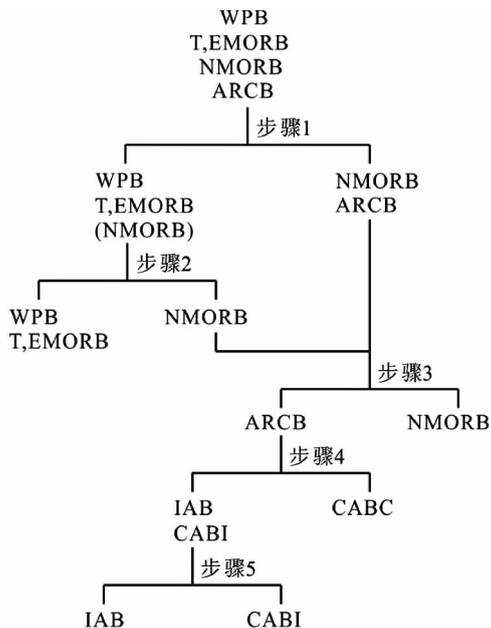


图9 玄武岩分类步骤(据 Condie, 1989)

WPB-板内玄武岩; MORB 大洋中脊玄武岩(N、T、E 分别代表亏损型、过渡型、富集型); ARCB-弧玄武岩; CAB-钙碱性玄武岩; IAB-岛弧拉斑玄武岩; CABI-岛弧钙碱性玄武岩; CABC-大陆边缘弧钙碱性玄武岩

Fig. 9 Basalt classification screens (after Condie, 1989)

质火山岩。斜长角闪岩和角闪片岩的形成时间为2.55Ga,与抚顺、清原、鞍山和冀东的表壳岩形成时间接近, Lu-Hf 同位素特征显示出板石沟表壳岩岩浆主要来源于亏损地幔, 受少量地壳物质混染, 可能存在新太古代晚期地壳增生事件。此外, 板石沟地区 TTG 片麻岩的形成时代略早于表壳岩形成时代, TTG 片麻岩形成与洋壳俯冲有关, 而区内壳源花岗岩形成时代与板石沟表壳岩相近(未发表资料), 它们共同组成了一个由洋壳俯冲到弧陆碰撞导致陆壳增厚的演化过程。

综合以上研究结果, 认为华北克拉通可能存在新太古代吉-辽-冀弧陆碰撞增生造山带, 板石沟地区属于该造山带的一部分, 并且推测板石沟地区并不是该造山带的终结位置, 该造山带可能继续向东北延伸至靖宇北部、抚松西北部, 甚至可能达到延边和龙地区, 这些地区的太古宙岩石组成了一个连续完整的弧陆碰撞增生造山带, 这将需要今后更多的工作来证实。

7 结论

(1) 板石沟表壳岩中斜长角闪岩岩浆锆石年龄为 2548 ± 11 Ma, 绿帘角闪片岩岩浆锆石年龄为 2548 ± 23 Ma, 表明表壳岩形成于新太古代晚期。绿帘角闪片岩中3颗年龄为 2754 ± 80 Ma ~ 2710 ± 92 Ma 的捕获锆石暗示板石沟地区可能存在新太古代早期岩浆事件。

(2) Hf 同位素特征显示斜长角闪岩和角闪片岩的岩浆主要来源于亏损地幔, 伴随少量古老地壳物质的再造, 部分锆石反映出板石沟地区可能存在新太古代晚期地壳生长事件。

(3) 斜长角闪岩和角闪片岩变质原岩为玄武质火山岩, 形成于岛弧环境, 认为板石沟地区为华北克拉通新太古代吉-辽-冀弧陆碰撞增生造山带的一部分。

致谢 耿元生研究员和迟效国教授对本文提出了诸多宝贵意见, 在此表示衷心感谢!

References

- Bai X, Liu SW, Yan M, Zhang LF, Wang W, Guo RR and Guo BR. 2014. Geological event series of Early Precambrian metamorphic complex in South Fushun area, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2905–2924 (in Chinese with English abstract)
- Belousova EA, Kostitsyn YA, Griffin WL, Begg GC, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, 119(3–4): 457–466
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258
- Boynnton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. *Regional Geology of Jilin Province*. Beijing: Geological Publishing House, 5–8 (in Chinese)
- Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23(1–2): 1–18
- Condie KC, Belousova E, Griffin WL and Sircombe KN. 2009. Granitoid events in space and time constraints: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra. *Gondwana Research*, 15(3–4): 228–242
- Condie KC and Aster RC. 2010. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: The supercontinent connection and continental growth. *Precambrian Research*, 180(3–4): 227–236
- Condie KC, Bickford ME, Aster RC, Belousova E and Scholl DW. 2011. Episodic zircon ages, Hf isotopic composition, and the preservation rate of continental crust. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5–6): 951–957
- Dai YP, Zhang LC, Wang CL, Liu L, Cui ML, Zhu MT and Xiang P. 2012. Genetic type, formation age and tectonic setting of the Waitoushan banded iron formation, Benxi, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3574–3594 (in Chinese with English abstract)
- Dai YP, Zhang LC, Zhu MT, Wang CL and Liu L. 2013. 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)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL and Wang HL. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua Complex on the southern margin of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 55(23): 2557–2571
- Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China craton at ~2.5Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149–170

- Geng YS, Wan YS and Shen QH. 2002. Early Precambrian basic volcanism and crustal growth in the North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 199 – 208 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Liu FL and Yang CH. 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 819 – 833
- Geng YS, Shen QH and Ren LD. 2010. Late Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1945 – 1966 (in Chinese with English abstract)
- Geng YS, Du LL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2–3): 517 – 529
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 – 147
- Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 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)
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 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)
- Jiang JS, Liu ZH and Lan X. 1997. Division of lithological units and geological evolution of Early Precambrian basement in Dahuangou-Banshigou region, South Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 346 – 355 (in Chinese with English abstract)
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 577 – 595
- Kusky TM, Li JH and Tucker RD. 2001. The Archean Dongwanzi ophiolite complex, North China Craton: 2. 505-billion-year-old oceanic crust and mantle. *Science*, 292(5519): 1142 – 1145
- Li JH, Kusky TM and Huang XN. 2002. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12(7): 4 – 11
- Li PC, Li SC, Liu ZH, Li G, Bai XH and Wan L. 2016. Formation age and tectonic environment of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Linxi area, Inner Mongolia. *Global Geology*, 35(1): 77 – 88 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535 – 1546
- Liu ZH and Jiang JS. 1995. Early Precambrian metamorphism, deformation and crustal evolution in the Dahuangou-Banshigou area, southern Jilin. *Regional Geology of China*, (3): 228 – 232 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZH, Jiang JS and Yang ZS. 1999. Sm-Nd ages of the metasedimentary rocks in Banshigou area of southern Jilin and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 46 – 49 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/EX (Rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1 – 55
- Morel MLA, Nebel O, Nebel-Jacobsen YJ, Miller JS and Vroon PZ. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1–2): 231 – 235
- Mullen ED. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(1): 53 – 62
- Pan GT, Xiao QH, Lu SN, Deng JF, Feng YM, Zhang KX, Zhang ZY, Wang FG, Xing GF, Hao GJ and Feng YF. 2009. Subdivision of tectonic units in China. *Geology in China*, 36(1), 1 – 28 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290 – 300
- Peng P and Zhai MG. 2002. Two major Precambrian geological events of North China Block (NCB): Characteristics and property. *Advance in Earth Sciences*, 17(6): 818 – 825 (in Chinese with English abstract)
- Qian Y, Sun FY, Li BL, Huo L and Zhang YJ. 2013. Trace element geochemical and U-Pb geochronology of metamorphic recrystallization zircon: Taking gneiss from Hongtoushan copper-zinc deposit as an example. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(4): 1500 – 1509 (in Chinese with English abstract)
- Qu FX, Zhang BH and Cui WZ. 1992. The geological features of the Banshigou iron mining, Jilin Province. *Jilin Geology*, 11(3): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Qu FX, Zhang BH and Liu RQ. 1997. Structural transposition and its controlling effect on iron deposits: An example from Banshigou iron deposit, Jilin Province, China. *Scientia Geologica Sinica*, 32(1): 103 – 109 (in Chinese with English abstract)
- Shao JB, Li JG, Wang HT, Chen DY and Ren Q. 2014. Geological characteristics and zircon U-Pb age of the Wudaoyangcha Neoproterozoic vanadic titanomagnetite deposit in Baishan, Jilin Province. *Geology in China*, 41(2): 463 – 483 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH, Geng YS, Yang CH, Wang XS and Wu CM. 2004. Important new progress in study on Early Precambrian stratigraphy of China. *Journal of Stratigraphy*, 28(4): 289 – 296 (in Chinese with English abstract)
- Simonen AJP. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennic, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 160: 1 – 64
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 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
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345
- Sun ZS, Feng YM, Yang XD and Yang YQ. 1999. The Precambrian ductile deformation sequence and crustal evolution in Banshigou, South Jilin. *Regional Geology of China*, 18(4): 383 – 390 (in Chinese with English abstract)
- Van de Kamp PC and Beakhouse GP. 1979. Paragneisses in the Pakwash Lake area, English River Gneiss Belt, Northwest Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(9): 1753 – 1763
- Wan YS, Song B, Yang C and Liu DY. 2005a. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78 – 87 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Geng YS and Liu DY. 2005b. Geochemical characteristics of Archean basement in the Fushun-Qingyuan area, northern Liaoning Province and its geological significance. *Geological Review*, 51(2): 128 – 137 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Yin XY, Wilde SA, Xie LW, Yang YH, Zhou HY and Wu JS. 2007. SHRIMP geochronology and Hf isotope composition of zircons from the Tiejiashan granite and supracrustal rocks in the Anshan area, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 241 – 252 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Dong CY, Xie HQ, Wang SJ, Song MC, Xu ZY, Wang SY, Zhou HY, Ma MZ and Liu DY. 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)

- Wan YS, Dong CY, Xie HQ, Liu SJ, Ma MZ, Xie SW, Ren P, Sun HY and Liu DY. 2015. Some progress in the study of Archean basement of the North China Craton. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(6): 685–700 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, He GP, Chen ZZ, Zheng SY and Geng YS. 1987. Graphical Method for Protolith Reconstruction of Metamorphic Rocks. Beijing: Geological Publishing House, 1–51 (in Chinese)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-Continent. Beijing: Geological Publishing House, 1–212 (in Chinese)
- Xiang P, Cui ML, Wu HY, Zhang XJ and Zhang LC. 2012. Geological characteristics, ages of host rocks and its geological significance of the Zhoutaizi iron deposit in Luanping, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3655–3669 (in Chinese with English abstract)
- Yang B, Bi SY, Zhang DF, Sun T and Yi H. 1993. Geochemical characteristics of the Banshigou Wangwanchuan greenstone belt and the diagenetic analysis in Jilin Province. *Jilin Geology*, 12(3): 24–31 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA and Zhao GC. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. *Precambrian Research*, 167(1–2): 125–149
- Yin XY, Wan YS, Liu DY, Wilde SA, Zhou HY and Wu JS. 2006. Formation time of supracrustal rocks in Tiejiaoshan granite of the Anshan area: Evidence from detrital zircon SHRIMP dating. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 282–286 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl. 1): 219–232
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547–561
- Zhai MG. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2012. Evolution of the North China Craton and early plate tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1335–1349 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2013a. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent. *Science China (Earth Sciences)*, 56(11): 1829–1852
- Zhai MG. 2013b. Secular changes of metallogenic systems link with continental evolving of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1759–1773 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Zhai MG, Wan YS, Guo JH, Dai YP, Wang CL and Liu L. 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 YJ, Sun FY, Huo L, Li BL, Ma F, Qian Y and Liu ZD. 2014. Metallogenic age and ore remobilization mechanisms of Shujigou copper-zinc deposit, Liaoning Province, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 786–795 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZJ, Xing SW, Ma YB, Du XH, Sun JG, Huang MR and Cui DY. 2013. Zircon U-Pb dating of the biotite-bearing plagioclase amphibolite from Hongtoushan Cu-Zn deposit, Liaoning Province, China and its implications on the exploration of VMS. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1159–1168 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M and Lu LZ. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(1–2): 55–88
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 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
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhang SB, Liu X and Wu FY. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 231(1–2): 135–158
- Zheng YF, Chen RX, Zhang SB, Tang J, Zhao ZF and Wu YB. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317–330 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白翔, 刘树文, 阎明, 张立飞, 王伟, 郭荣荣, 郭博然. 2014. 抚顺南部早前寒武纪变质杂岩的地质事件序列. *岩石学报*, 30(10): 2905–2924
- 代堰镔, 张连昌, 王长乐, 刘利, 崔敏利, 朱明田, 相鹏. 2012. 辽宁本溪歪头山条带状铁矿的成因类型、形成时代及构造背景. *岩石学报*, 28(11): 3574–3594
- 代堰镔, 张连昌, 朱明田, 王长乐, 刘利. 2013. 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
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩. 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 76(2): 199–208
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. *岩石学报*, 26(7): 1945–1966
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MS-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
- 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
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 5–8
- 姜继圣, 刘志宏, 蓝翔. 1997. 吉林省大荒沟-板石沟早前寒武纪基底的岩石单元划分及其地质演化. *岩石学报*, 13(3): 346–355
- 李鹏川, 李世超, 刘正宏, 李刚, 白新会, 万乐. 2016. 内蒙古林西地区满克头鄂博组火山岩形成时代及构造环境. *世界地质*, 35(1): 77–88
- 刘志宏, 姜继圣. 1995. 吉南大荒沟-板石沟地区早前寒武纪变质变形作用及地壳演化. *中国区域地质*, (3): 228–232
- 刘志宏, 姜继圣, 杨振升. 1999. 吉林南部板石沟地区变质上壳岩的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 18(1): 46–49
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1–28
- 彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. *地球科学进展*, 17(6): 818–825
- 钱焯, 孙丰月, 李碧乐, 霍亮, 张雅静. 2013. 变质重结晶锆石微量

- 元素地球化学与 U-Pb 年代学: 以辽宁红透山铜锌矿床赋矿片麻岩为例. 中南大学学报(自然科学版), 44(4): 1500-1509
- 屈奋雄, 张宝华, 崔文智. 1992. 吉林省板石沟铁矿矿区地质特征. 吉林地质, 11(3): 1-10
- 屈奋雄, 张宝华, 刘如琦. 1997. 构造置换及其控矿规律——以吉林板石沟铁矿为例. 地质科学, 32(1): 103-109
- 邵建波, 李景光, 王洪涛, 陈殿义, 任强. 2014. 吉林白山五道羊岔新太古代大型钒钛磁铁矿床地质特征及锆石 U-Pb 年龄. 中国地质, 41(2): 463-483
- 沈其韩, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 吴春明. 2004. 我国早前寒武纪地层研究的主要新进展. 地层学杂志, 28(4): 289-296
- 孙忠实, 冯亚民, 杨晓东, 杨永强. 1999. 吉南板石沟地区前寒武纪构造韧变序列及地壳演化. 中国区域地质, 18(4): 383-390
- 万渝生, 宋彪, 杨淳, 刘敦一. 2005a. 辽宁抚顺-清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 地质学报, 79(1): 78-87
- 万渝生, 宋彪, 耿元生, 刘敦一. 2005b. 辽北抚顺-清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义. 地质论评, 51(2): 128-137
- 万渝生, 刘敦一, 殷小艳, Wilde SA, 谢烈文, 杨岳衡, 周红英, 伍家善. 2007. 鞍山地区铁架山花岗岩及表壳岩的锆石 SHRIMP 年代学和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(2): 241-252
- 万渝生, 董春艳, 颜颖强, 王世进, 宋明春, 徐仲元, 王世炎, 周红英, 马铭株, 刘敦一. 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
- 万渝生, 董春艳, 颜颖强, 刘守偈, 马铭株, 谢士稳, 任鹏, 孙会一, 刘敦一. 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展. 地球学报, 36(6): 685-700
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1-51
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-212
- 相鹏, 崔敏利, 吴华英, 张晓静, 张连昌. 2012. 河北滦平周台子条带状铁矿地质特征、围岩时代及其地质意义. 岩石学报, 28(11): 3655-3669
- 杨豹, 毕守业, 张殿发, 孙涛, 易虹. 1993. 吉林省板石沟-旺文川绿岩带岩石地球化学特征及成岩环境分析. 吉林地质, 12(3): 24-31
- 殷小艳, 万渝生, 刘敦一, Wilde SA, 周红英, 伍家善. 2006. 鞍山地区铁架山花岗岩中表壳岩的碎屑锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 25(4): 282-286
- 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
- 翟明国. 2013a. 中国主要古陆与联合大陆的形成——综述与展望. 中国科学(地球科学), 43(10): 1583-1606
- 翟明国. 2013b. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系. 岩石学报, 29(5): 1759-1773
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 郭敬辉, 代堰镭, 王长乐, 刘利. 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
- 张雅静, 孙丰月, 霍亮, 李碧乐, 马芳, 钱烨, 刘哲东. 2014. 辽宁树基沟铜锌矿成矿时代及矿石再活化机制. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 786-795
- 张增杰, 邢树文, 马玉波, 杜晓慧, 孙景贵, 黄明然, 崔大勇. 2013. 辽宁红透山铜锌矿围岩黑云斜长角闪岩锆石 U-Pb 定年及其块状硫化物指示意义. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1159-1168
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 唐俊, 赵子福, 吴元保. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗岩片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. 岩石学报, 23(2): 317-330