

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.004



鞍山一本溪地区鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代新证据： 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

万渝生,董春艳,颜颜强,谢士稳,刘守偈,白文倩,马铭株,刘敦一

中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心,北京 100037

摘要: 鞍本和华北克拉通最为重要的 BIF 铁矿集中区之一, BIF 赋存于鞍山群表壳岩中. 通过对广泛分布的鞍山群表壳岩的 12 个样品进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 大都获得 2.50~2.55 Ga 岩浆锆石年龄, 一些岩石中存在 2.7~3.5 Ga 碎屑锆石或外来锆石. 一些东北部(东部)岩石记录了新太古代晚期—古元古代早期变质锆石年龄. 结合前人研究成果, 可得出如下结论: (1) 鞍本地区广泛分布的鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代为新太古代晚期; (2) 鞍山群表壳岩形成于陆壳基底之上. 该研究进一步支持了已有认识: 鞍本为东部古陆块西缘新太古代晚期巨型 BIF 成矿带的重要组成部分, 稳定的构造环境有利于大规模 BIF 形成.

关键词: 鞍山群; 新太古代; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 鞍山一本溪地区; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)01-0057-25

收稿日期: 2017-06-28

Formation Age of BIF-Bearing Anshan Group Supracrustal Rocks in Anshan-Benxi Area: New Evidence from SHRIMP U-Pb Zircon Dating

Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Xie Shiwen, Liu Shoujie, Bai Wenqian, Ma Mingzhu, Liu Dunyi

Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: Anshan-Benxi is one of the most important BIF concentration areas in the North China Craton, the BIF occurred in the Anshan Group supracrustal rocks. Using SHRIMP U-Pb zircon dating technique, 12 supracrustal samples of the Anshan Group were analyzed. Most samples present 2.50–2.55 Ga zircon ages and 2.7–3.5 Ga detrital or xenocrystal zircons are observed in some samples. Combined with previous studies, main conclusions can be drawn as follows. (1) The widespread BIF-bearing Anshan Group supracrustal rocks in the Anshan-Benxi area were deposited during the Late Neoproterozoic. (2) The Anshan Group supracrustal rocks were formed over a continental basement. This study confirms that Anshan-Benxi is an important component of the huge Late Neoproterozoic BIF belt along the western margin of the eastern ancient terrane, and stable tectonic environment seems to be a key factor for the formation of huge-scale BIF ore deposit.

Key words: Anshan Group; Neoproterozoic; SHRIMP U-Pb zircon dating; Anshan-Benxi area; petrology.

鞍山一本溪(鞍本)地区是华北克拉通早前寒武纪变质基底的重要组成部分, 为华北克拉通早期地壳形成和演化的缩影. 鞍本有着漫长的早前寒武纪演化历史(1.8~3.8 Ga), 中国最古老的岩石年龄纪

录(~3.8 Ga)即产于该地区(伍家善等, 1989; Liu *et al.*, 1992, 2008; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2005, 2012a). 鞍本地区存在不同时代的太古宙表壳岩, 迄今发现的最古老表壳岩为 3.35 Ga 陈台沟

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41472169); 科技部基础专项(No. 2015FY31010); 中国地质调查局项目(Nos. DD20160121-03, 121201102000150012).

作者简介: 万渝生(1958—), 男, 研究员, 主要从事华北克拉通早前寒武纪地质、锆石成因和 SHRIMP U-Pb 同位素年代学研究.
E-mail: wanyusheng@bjshrmp.cn

引用格式: 万渝生, 董春艳, 颜颜强, 等. 2018. 鞍山一本溪地区鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代新证据: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地球科学, 43(1): 57–81.

表壳岩,在~3.0 Ga 铁架山富钾花岗岩中也存在表壳岩,其时代不能准确确定,但很可能老于 3.0 Ga (Wan *et al.*, 2015a).鞍本地区分布最广泛的太古宙表壳岩为鞍山群,储量十分巨大的条带状铁矿(BIF)即存在于鞍山群中(Zhai *et al.*, 1990; 万渝生,1993; 沈保丰等, 2005),使鞍本成为我国最重要的钢铁生产基地之一.研究表明,与华北克拉通其他许多太古宙地区一样,BIF 大量存在的鞍山群表壳岩形成时代为新太古代晚期(万渝生等, 2012; 代堰锴等, 2012, 2013; Cui *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2017).本文提供了大量新的研究成果,进一步支持了鞍山群及相关 BIF 形成于新太古代晚期的认识,同时对一些相关问题进行了讨论.

1 地质背景

鞍本地区太古宙基底岩石主要分布于鞍山、弓

长岭、南芬、本溪、鸡冠山、歪头山一带,大致呈南西—北东向出露(图 1).太古宙早期(>2.8 Ga)岩石在鞍山地区广泛分布(伍家善等,1989; Liu *et al.*, 1992, 2008; Song *et al.*, 1996; 万渝生等,2002; Wan *et al.*, 2005, 2012a, 2015a).~3.0 Ga 富钾花岗岩(铁架山花岗岩)不仅分布在铁架山地区,它们向东一直延伸到了弓长岭地区(Dong *et al.*, 2017a).在广泛分布的新太古代晚期花岗质岩石(齐大山花岗岩,主体为正长花岗岩)中,存在许多>2.8 Ga外来锆石,全岩 Nd 同位素和岩浆锆石 Hf 同位素组成特征表明花岗质岩石为古老陆壳物质再循环作用产物(Wan *et al.*, 2015b).最近,太古宙早期(>2.7 Ga)岩石在本溪、歪头山一带也被发现(Liu *et al.*, 2017; 刘树文,个人通讯).这些成果极大地扩展了鞍本地区太古宙早期陆壳物质的空间分布.

鞍本地区新太古代晚期壳源花岗岩主要为正长花岗岩(Wan *et al.*, 2015b; 杨凤超等,2016),称之为齐大山花岗岩.在新太古代晚期齐大山花岗岩中,

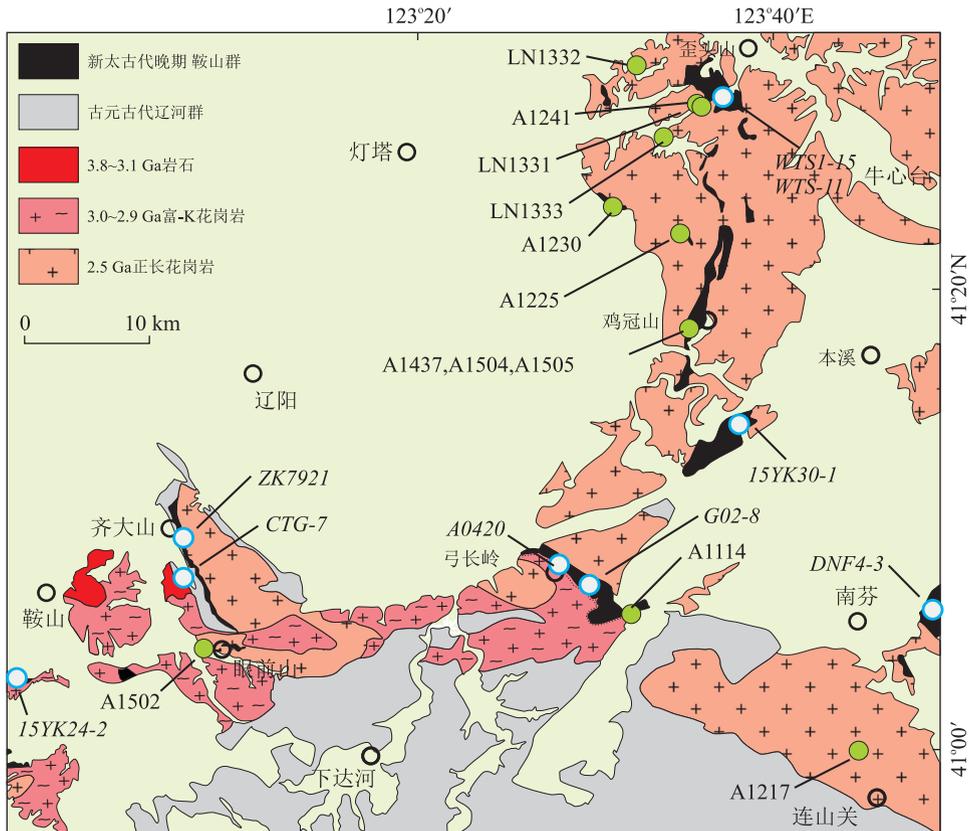


图 1 鞍本地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Anben area

图据 Wan *et al.* (2015b); 图中给出了定年样品位置.编号为斜体的样品引自文献(王守伦和张瑞华,1995;代堰锴等,2012;万渝生等,2012;Cui *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2017);ZK7921 位置不能准确确定,但在齐大山矿带上;G02-8 位置不能准确确定,但在弓长岭矿区;其他的来自本文

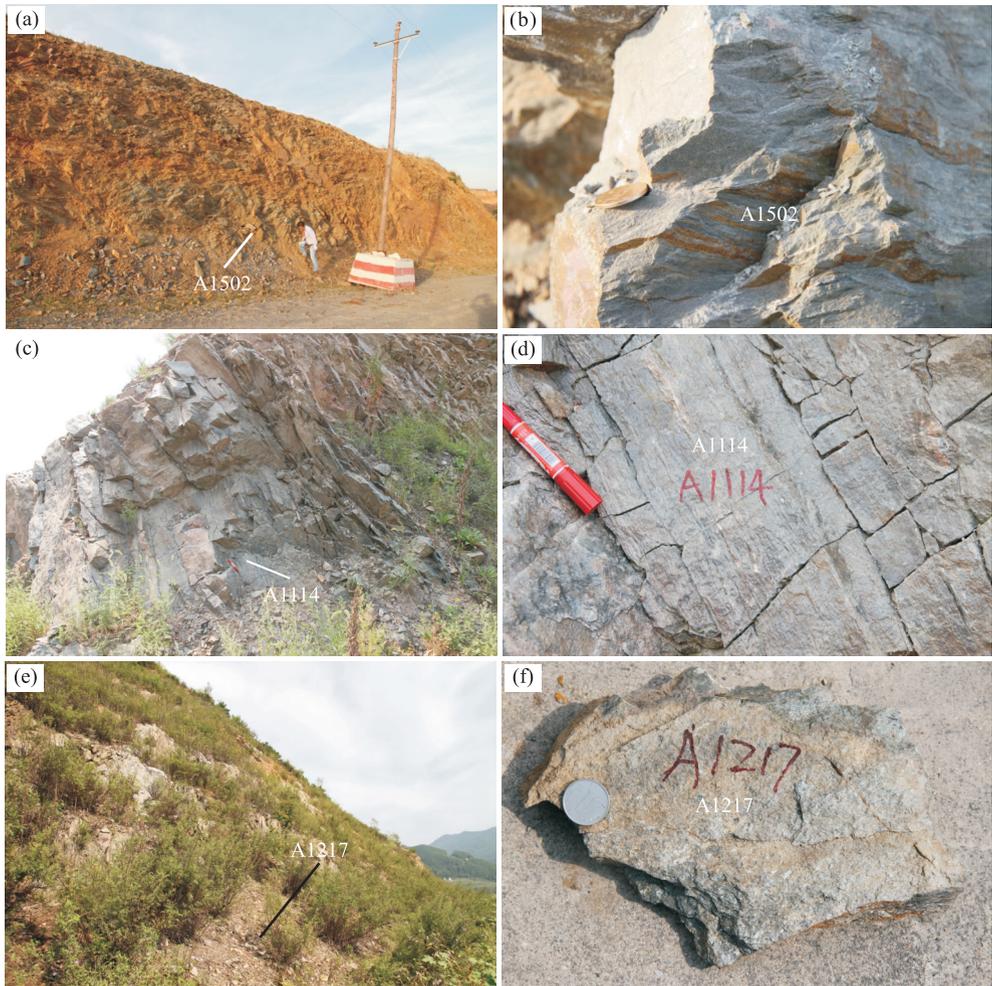


图 2 鞍本地区鞍山群表壳岩的野外照片

Fig.2 Field photos of the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a. 表壳岩露头远景,眼前山铁矿;b. 黑云变粒岩(A1502),眼前山铁矿;c. 二云石英片岩呈层状产出,弓长岭东矿区;d. 二云石英片岩(A1114),弓长岭东矿区;e. 露头远景,表壳岩包体存在于 2.5 Ga 正长花岗岩中,连山关北;f. 黑云二长变粒岩(A1217),连山关北

鞍山群表壳岩以不同规模零星分布但范围广泛,在许多地区都可见到新太古代晚期花岗岩包裹和切割表壳岩的现象(Wan *et al.*, 2015b, 2016a). 鞍山群表壳岩主要由斜长角闪岩、黑云变粒岩和 BIF 组成,还存在变质超基性岩、角闪变粒岩、浅粒岩、云母石英片岩、(铬云母)石英岩、大理岩等(Zhai *et al.*, 1990; 万渝生, 1993; 李厚民等, 2014). 鞍山群表壳岩在岩石组合、变质变形、矿床特征等方面存在一定的空间变化,以陆源碎屑岩为主、变质变形相对较弱、矿层层数少但单层厚度大的表壳岩(樱桃园组)分布于西南的鞍山地区,以火山沉积岩为主、变质变形相对较强、矿层层数多但单层厚度小的表壳岩(茨沟组、大峪沟组)分布于东部—东北部的本溪、歪头山一带. 这些曾被认为分属上、下层位的不同岩组,可能是同时异相的沉积产物(万渝生, 1993). 在鞍

山、弓长岭、南芬、歪头山等地研究人员都发现富铁矿,它们在空间上与条带状铁矿共生,普遍认为它们是贫的(或相对富的)条带状铁矿遭受流体改造的产物(程裕淇, 1957; 万渝生, 1993; 杨秀清等, 2013; Sun *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2015). 根据最新资料,鞍本地区形成规模最大的弓长岭富铁矿的流体改造时代可能为古元古代晚期(李厚民等, 2014).

鞍本地区同位素年代学研究历史悠久(陈毓蔚等, 1981; 钟富道, 1984). 根据鞍山地区斜长角闪岩的 Sm-Nd 等时线年龄,乔广生等(1990)认为鞍山群形成于~2.7 Ga. 应用澳大利亚国立大学 SHRIMP U-Pb 定年技术,万渝生和刘敦一(1993)对弓长岭地区黑云变粒岩进行了锆石定年,获得年龄为 2.5~2.7 Ga,在当时无锆石阴极发光图像的情况下,认为~2.7 Ga 代表表壳岩形成时代,~2.5 Ga 代表变质

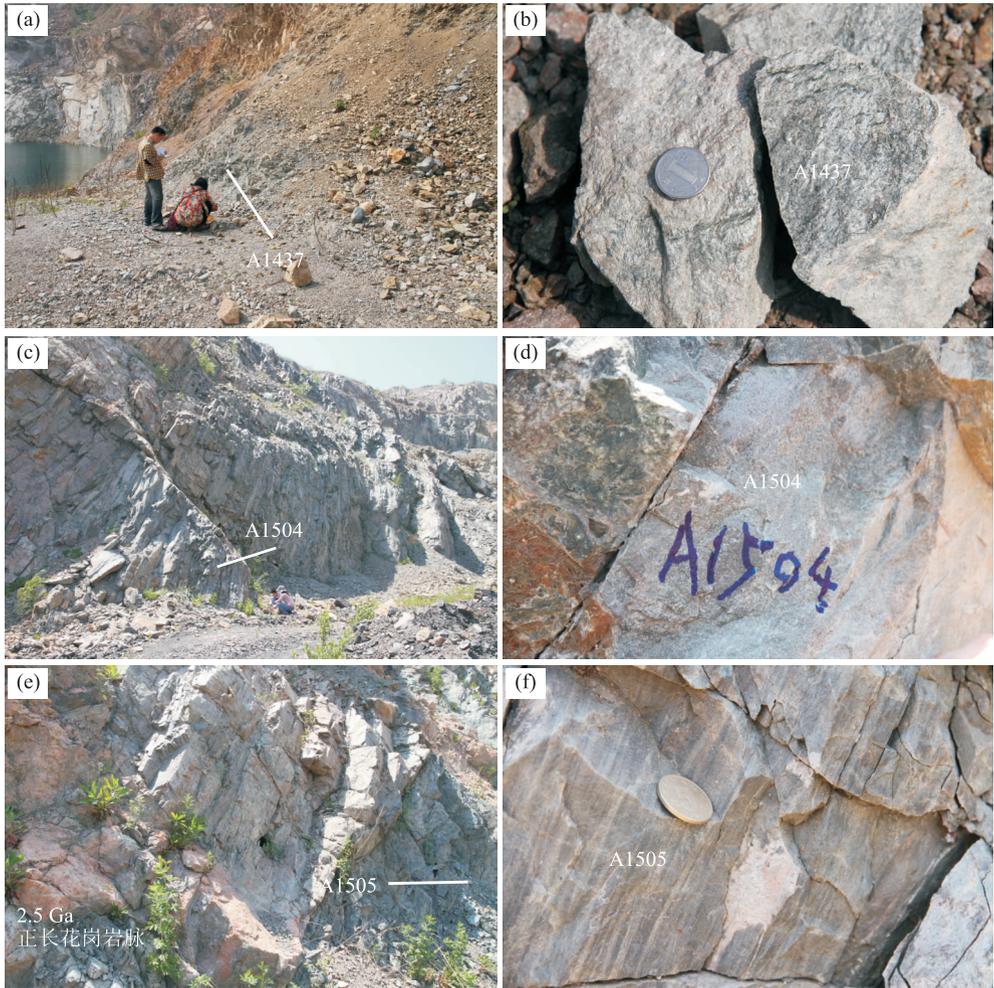


图 3 鞍山地区鸡冠山乡 BIF 铁矿区鞍山群表壳岩的野外照片

Fig.3 Field photos of the Anshan Group supracrustal rocks in Jiguanxiang BIF mine, Anben
a, b.白云片岩(A1437); c, d.黑云变粒岩(A1504); e, f.变质酸性火山岩(A1505)

作用时代,之后,万渝生等(2012)对弓长岭地区黑云变粒岩开展了进一步 SHRIMP U-Pb 锆石定年研究.样品取自与 BIF 直接相邻的黑云变粒岩,变质原岩被认为是安山—英安质火山岩.同样获得 ~ 2.5 Ga 和 ~ 2.7 Ga 锆石年龄,但是, ~ 2.5 Ga 锆石占绝大多数,具清楚的震荡环带,为典型的岩浆成因.所以,所获得的 2528 ± 10 Ma 年龄代表了表壳岩的形成时代,而少量 ~ 2.7 Ga 锆石为碎屑锆石或外来锆石.之后的研究进一步支持了鞍山群形成于新太古代晚期的认识(代堰镛等, 2012, 2013; Cui *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014; 张连昌等, 2014; Zhu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2017).

下面把本文涉及到的定年样品的野外地质和岩相学特征作一简要介绍.样品位置见图 1.

(1)黑云变粒岩(A1502).该样品取自眼前山铁矿.空间上,与 BIF 直接接触.风化面呈土黄色,新鲜

面呈黄绿色.黑云变粒岩出露规模较大(图 2a),其中可见规模不大的直立褶皱,存在构造加厚.岩石中局部存在长英质微小细脉,为变质分异产物.样品中无长英质脉体,岩石新鲜,具一定的片麻理构造(图 2b).岩石主要由斜长石、石英和黑云母组成.

(2)二云石英片岩(A1114).弓长岭岭东矿区存在较多石榴云母石英片岩和云母石英片岩,普遍含有白云母,具成层性(图 2c, 2d).岩石主要由石英、白云母和黑云母组成.石英呈长条状和透镜状集合体,大量白云母呈长条状集合体,它们呈定向相间分布,显示强烈变形的结构特征.黑云母呈小片状,绿色—无色多色性,常与白云母在一起.少量黄色黑云母呈斑晶形式存在.

(3)黑云二长变粒岩(A1217).样品采自连山关北.该处主体为 2.5 Ga 正长花岗岩,表壳岩以包体形式存在其中(图 2e).黑云二长变粒岩(A1217)具片

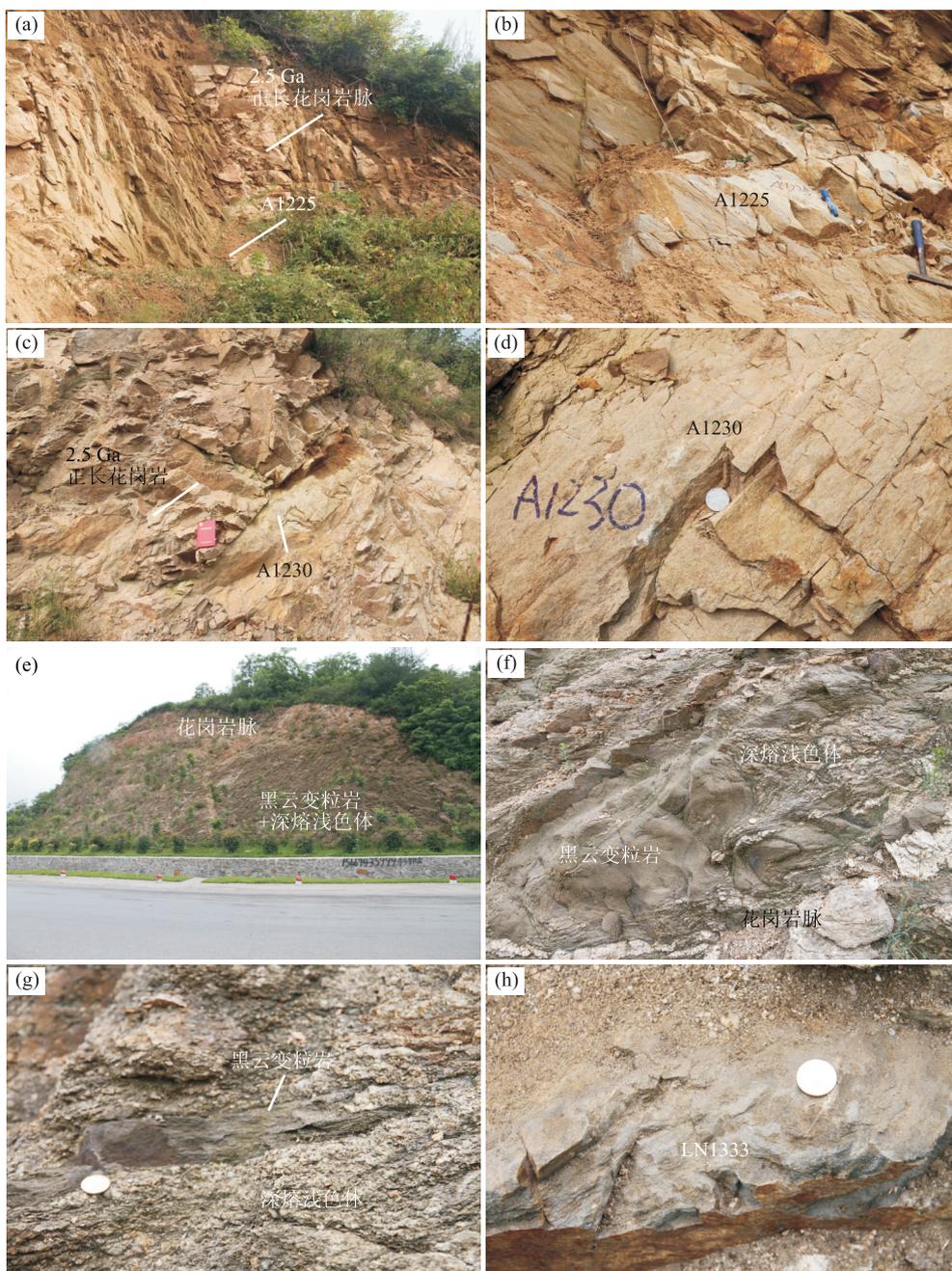


图 4 鞍本地区鞍山群表壳岩的野外照片

Fig.4 Field photos of the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a.表壳岩被 2.5 Ga 正长花岗岩脉切割,鸡冠山北;b.角闪变粒岩(A1225),鸡冠山北;c.表壳岩被包裹于 2.5 Ga 正长花岗岩中,鸡冠山北西;d.黑云变粒岩(A1230),鸡冠山北西;e~h.灯塔市八家子东,e.露头远景;f.黑云变粒岩发生褶皱变形,被包裹于深熔浅色体中,被花岗岩切割,g.黑云变粒岩被包裹于深熔浅色体中,h.黑云变粒岩(LN1333)

状或片麻状构造(图 2f),已向片麻岩过渡,岩石主要由微斜长石、斜长石、石英、黑云母和磁铁矿组成,粒状矿物普遍拉长,与黑云母一道定向排列,显示强烈变形.斜长石通常无聚片双晶,与石英类似,但由于绿帘石化而显得更脏.黑云母具浅黄—黄绿多色性.磁铁矿呈细粒状分散分布在其他矿物中或颗粒之间.

(4)白云片岩(A1437).在鸡冠山乡附近公路边存在一废弃了的 BIF 铁矿采场.表壳岩被 2.5 Ga 正长花岗岩侵入.该采场所见表壳岩以碎屑沉积岩为主,包括石英岩.白云片岩(A1437)与 BIF 铁矿相邻(图 3a).岩石层状构造明显(图 3b),主要由斜长石、石英和白云母组成.斜长石和石英以两种不同形式存在.大多数为细粒集合体,部分以碎斑形式存在.



图 5 鞍本地区鞍山群表壳岩的野外照片

Fig.5 Field photos of the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a~c.歪头山西南 BIF 铁矿区, a. BIF 铁矿区远景, b. 不同类型岩石相互关系, 表壳岩被 2.5 Ga 正长花岗岩切割, c. 斜长角闪岩 (LN1331); d. 黑云变粒岩 (A1241), 歪头山西南; e. 黑云变粒岩 (LN1332), 歪头山西; f. 黑云变粒岩被花岗岩脉切割, 歪头山西

斜长石普遍遭受绿帘石化, 个别碎斑斜长石还可保留聚片双晶。白云母呈片状定向分布。存在少量黑云母, 呈细小片状, 多蚀变为绿泥石。斜长石碎斑存在, 可能表明变质原岩为近源碎屑沉积岩或火山沉积岩。

(5) 黑云变粒岩 (A1504)。样品取自与 A1437 同一矿区。该处黑云变粒岩厚度较大, 具层状构造 (图 3c), 为 BIF 铁矿直接围岩。见正长伟晶质岩脉切割黑云变粒岩。样品新鲜面呈灰色, 无明显片麻状构造 (图 3d)。岩石主要由石英、长石和黑云母组成。

(6) 变质酸性火山岩 (A1505)。取自样品 A1504 东 150 m。岩石宽度约 10 m, 被红色伟晶质正长花岗岩脉切割 (图 3e)。在露头尺度上, 岩石不均匀, 由灰色程度不同的条带状岩石组成 (图 3f), 但浅色条带同样为变质酸性火山岩, 而不是花岗岩脉。岩石主要

由石英和长石组成, 暗色矿物黑云母含量很低。结合锆石特征 (第 3 部分), 笔者推测变质原岩为酸性火山岩。

(7) 角闪变粒岩 (A1225)。样品采自鸡冠山乡北。该处见角闪变粒岩与黑云变粒岩互层, 两者一起变形, 被未变形的 2.5 Ga 正长花岗岩侵入 (图 4a)。角闪变粒岩组成均匀, 无浅色体分布其中 (图 4b)。岩石主要由斜长石和角闪石组成, 存在少量石英。斜长石普遍遭受绿帘石化, 部分斜长石保留聚片双晶。存在少量细粒微斜长石, 有细粒长英质矿物集合体局部分布, 它们可能为深熔作用产物。

(8) 黑云变粒岩 (A1230)。样品采自鸡冠山北西柳河镇下老君峪的西南公路边。该处岩石露头沿公路约 400 m 长, 主体为 2.5 Ga 正长花岗岩, 包有黑云变粒岩和糜棱岩化长英质岩石, 片麻理走向 315° 。

糜棱岩化长英质岩石发育紧闭褶皱,但这两种包体之间的相互关系不清。黑云变粒岩(A1230)被包裹于正长花岗岩中,遭受一定风化(图4c, 4d)。岩石主要由斜长石、石英和黑云母组成。斜长石普遍遭受绿帘石化。黑云母呈棕色,被绿色黑云母交代。存在少量微斜长石分散分布,可能为深熔作用产物。

(9) 黑云变粒岩(细粒黑云斜长片麻岩, LN1333)。在灯塔市八家子东公路边,存在一规模较大的新鲜岩石露头(图4e)。黑云变粒岩或细粒黑云斜长片麻岩被花岗质岩石切割包裹(图4f, 4g)。包体通常呈长条状,与花岗质岩石条带平行。一些黑云变粒岩发生褶皱变形,有浅色体灌入。黑云变粒岩可能是深熔浅色体花岗质岩浆空间上有一定运移后捕获的。在剖面右侧,可见红色斑状花岗岩脉侵入。黑云变粒岩样品 LN1333(图4h)的岩相学特征与 LN1332 类似。

(10) 斜长角闪岩(LN1331)。在歪头山西南柳河镇附近存在一较大规模的BIF铁矿(图5a)。含BIF铁矿的表壳岩被2.5 Ga正长花岗岩侵入(图5b)。该矿区存在较多斜长角闪岩,样品 LN1331 取自距正长花岗岩约20 m处(图5b)。岩石组成均匀,矿物粒度细小,略定向排列(图5c)。主要由角闪石和斜长石组成。斜长石普遍发生绿帘石化,角闪石具绿色—黄绿色多色性。

(11) 黑云变粒岩(A1241)。在歪头山西南柳河镇BIF铁矿,也存在黑云变粒岩(图5d)。岩石主要由斜长石、石英和黑云母组成。部分斜长石具聚片双晶,遭受绿帘石化。黑云母定向分布在斜长石、石英之间,普遍遭受绿帘石化。

(12) 黑云变粒岩(细粒黑云斜长片麻岩, LN1332)。在歪头山西见黑云变粒岩表壳岩(图5e)。所见出露范围在60 m以上。岩石风化后呈土黄色,笔者推测其为变质火山岩或变质火山碎屑沉积岩,它们被花岗岩脉切割(图5f),一起被伟晶岩包裹。岩石的矿物粒度细小,主要由斜长石、石英和黑云母组成。黑云母具棕色—黄色多色性,定向排列。斜长石遭受绿帘石化。

2 分析方法

SHRIMP U-Pb 锆石测年在北京离子探针中心完成。测年方法和原理见 Williams(1998)。锆石测年为5组扫描。一次离子流强度为3~4 nA,束斑大约为25~30 μm 。未知样品U含量标定和年龄校正的

标准锆石为SL13(U含量为 238×10^{-6} ; Williams, 1998)和TEMORA(年龄为417 Ma; Black *et al.*, 2003)。TEMORA和未知样品测定的比例为1:3~1:4。数据处理采用SQUID和ISOPLLOT程序(Ludwig, 2001)。根据实测 ^{204}Pb 进行普通铅扣除。由于为太古宙岩石,锆石年龄使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。单个数据点误差为 1σ ,加权平均年龄误差为95%置信度。

3 锆石定年结果

锆石SHRIMP U-Pb同位素数据见附表1。

(1) 黑云变粒岩(A1502)。锆石呈短柱状,晶型良好,具震荡环带,但普遍遭受重结晶改造(图6a, 6b)。一些锆石中部组成均匀,无环带结构,但这不是重结晶作用改造的结果,而是原岩浆锆石具有的结构,表明岩浆作用过程中,锆石形成条件发生了变化。锆石边部普遍存在白边,为流体交代产物。一些锆石存在很窄的变质增生边。岩浆锆石成分域15个数据点分析表明,U含量和Th/U比值分别为 $97 \times 10^{-6} \sim 3356 \times 10^{-6}$ 和0.12~1.51。锆石大都存在不同程度铅丢失,但位于同一不一致线上(图7a)。3个位于谐和线上数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2538 ± 17 Ma(MSWD=0.84)。该年龄可被解释为黑云变粒岩变质原岩—中酸性火山岩的形成年龄。

(2) 二云石英片岩(A1114)。锆石呈椭圆状或不规则状,普遍遭受强烈重结晶(图6c, 6d)。13个数据点分析,U含量和Th/U比值分别为 $197 \times 10^{-6} \sim 2805 \times 10^{-6}$ 和0.19~1.63。锆石显示不同程度铅丢失,但数据点大致位于同一不一致线上(图7b)。2个接近谐和线的数据点(1.1, 2.1)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 3069 ± 12 Ma(MSWD=0.03)。该年龄可被解释为物源区岩石形成时代。

(3) 黑云二长变粒岩(A1217)。锆石呈短柱状,遭受强烈重结晶,部分具不典型的扇形结构,原岩浆环带只有很少保留(图6e, 6f)。7个数据点分析,U含量和Th/U比值分别为 $139 \times 10^{-6} \sim 667 \times 10^{-6}$ 和0.21~1.36。高的Th/U比值表明它们不是角闪岩相变质条件下形成的变质增生边,而是更高级变质作用条件下的重结晶锆石,这与锆石结构特征一致。部分锆石存在铅丢失,接近谐和线的4个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2469 ± 13 Ma(MSWD=1.5)(图7c),该年龄明显小于该区鞍山群岩浆锆石年龄,结合锆石特征,可解释为变质作用时代更为恰当。

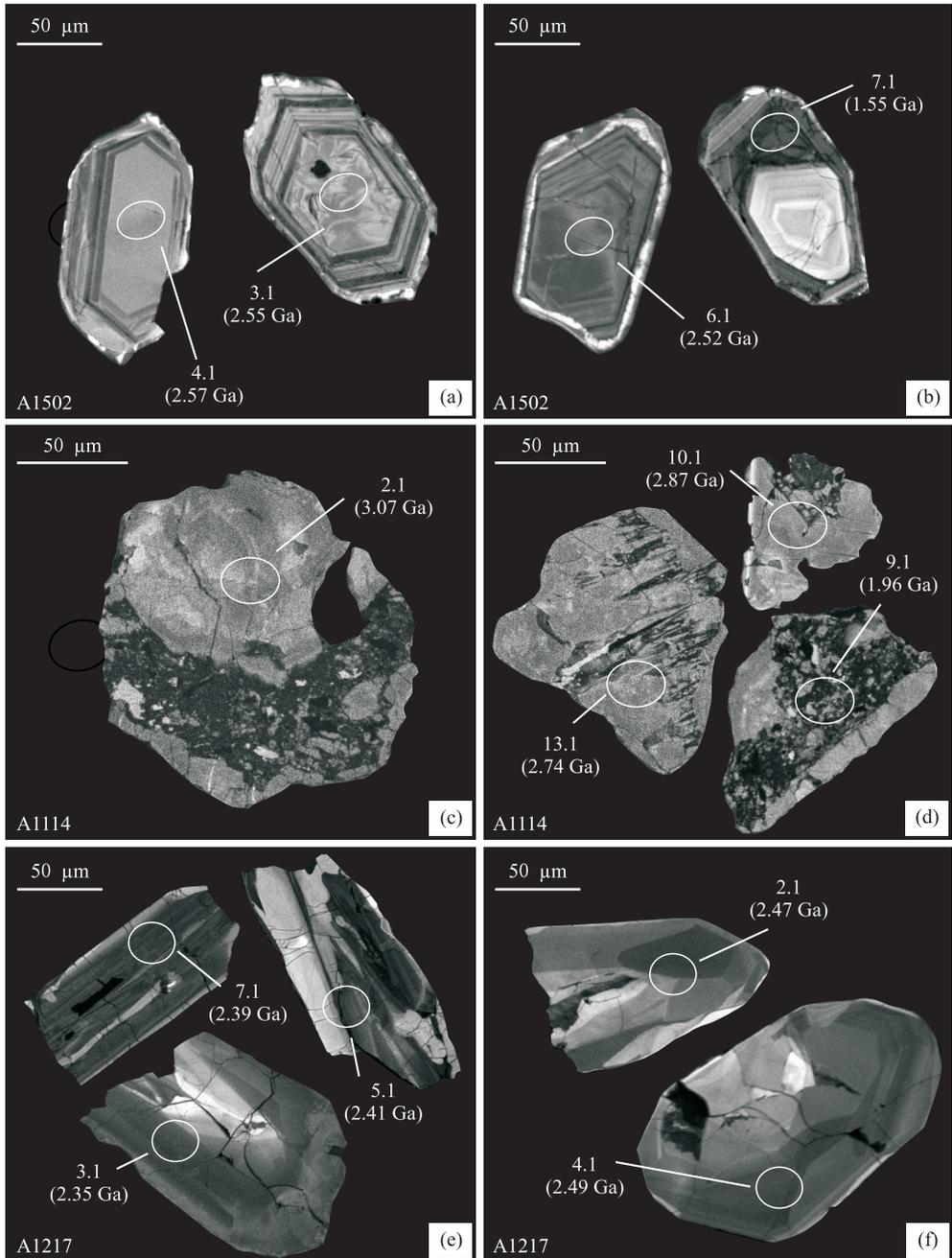


图 6 鞍山地区鞍山群表壳岩的锆石阴极发光图像

Fig.6 Cathodoluminescence images of zircons from the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a, b. 黑云变粒岩(A1502), 眼前山铁矿; c, d. 二云石英片岩(A1114), 弓长岭东矿区; e, f. 黑云二长变粒岩(A1217), 连山关北

(4) 白云片岩(A1437). 锆石呈短柱状, 普遍遭受重结晶, 但部分锆石保留岩浆环带(图 8a, 8b). 12 个数据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $88 \times 10^{-6} \sim 2341 \times 10^{-6}$ 和 0.23~1.63. 锆石普遍存在强烈铅丢失, 但仍显示原锆石年龄存在很大变化(图 7d), 表明它们来自不同时代的物源区. 数据点 10.1 大致位于谐和线上, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 711 Ma. 数据点 12.1 靠近谐和线, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为

2 539 Ma, 锆石虽显示重结晶作用, 但岩浆环带仍保留, 这限制了变质原岩的沉积时代为新太古代晚期.

(5) 黑云变粒岩(A1504). 锆石呈短柱状, 晶型良好, 锆石中部通常组成均匀, 而边部具震荡环带(图 8c, 8d). 一些锆石遭受重结晶改造. 16 个数据点分析表明, U 含量和 Th/U 比值分别为 $79 \times 10^{-6} \sim 423 \times 10^{-6}$ 和 0.46~0.87. 一些锆石存在铅丢失, 但所有数据点位于同一不一致线上(图 7e). 位于或靠

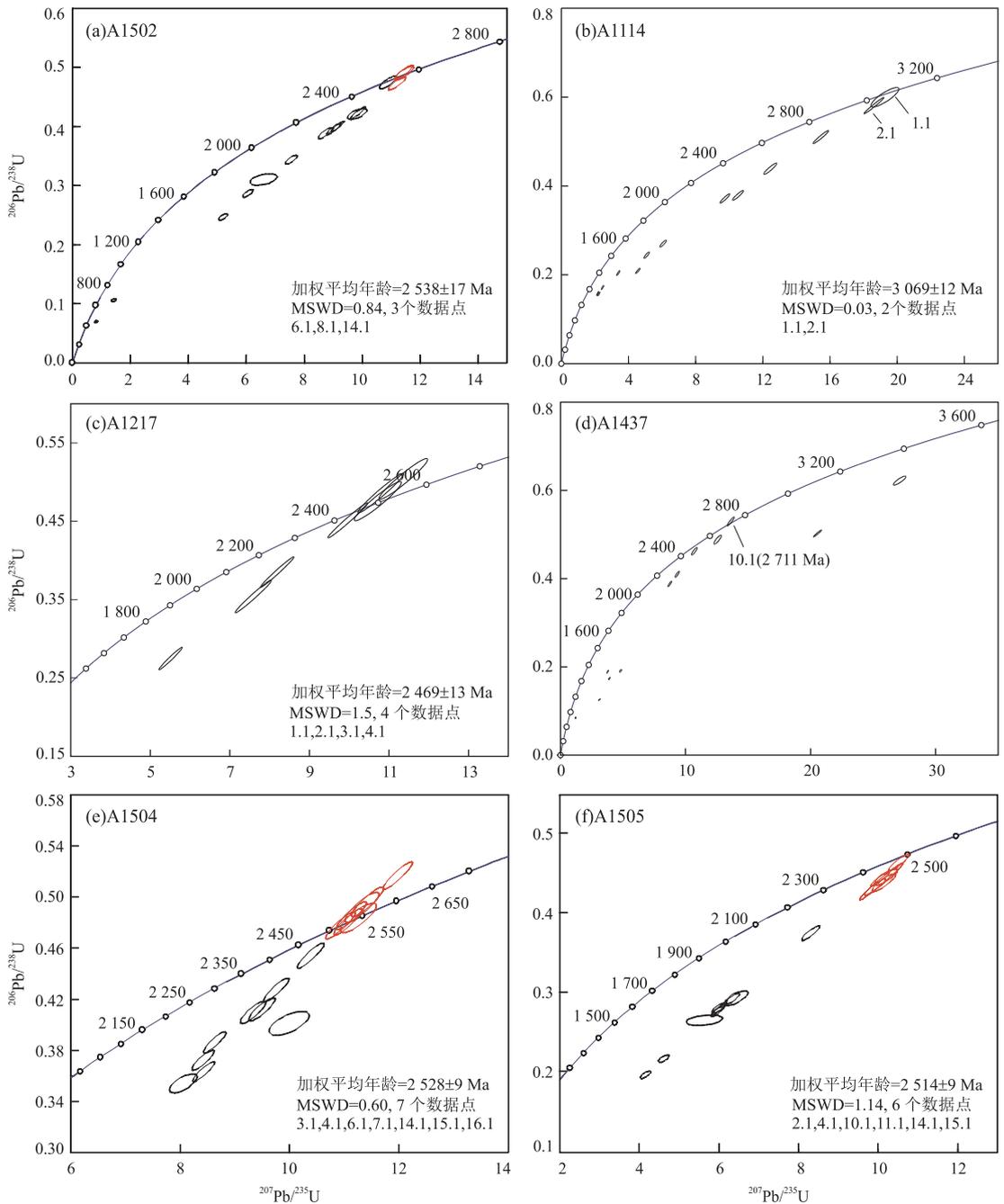


图 7 鞍本地区鞍山群表壳岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig.7 Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb zircon analyses of the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a.黑云变粒岩(A1502),眼前山铁矿;b.二云石英片岩(A1114),弓长岭岭东矿区;c.黑云二长变粒岩(A1217),连山关北;d~f.鸡冠山乡 BIF 铁矿,d.白云片岩(A1437),e.黑云变粒岩(A1504),f.变质酸性火山岩(A1505)

近谐和线的 7 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2528 \pm 9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.60$),可解释为黑云变粒岩变质原岩的形成年龄.一些锆石显示重结晶(图 8c 的颗粒 4.1),但年龄并无明显差异,表明重结晶作用发生在表壳岩形成之后不久.

(6)变质酸性火山岩(A1505).锆石形态和内部结构特征与样品 A1504 的类似(图 8e, 8f).15 个数

据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $118 \times 10^{-6} \sim 644 \times 10^{-6}$ 和 0.59~1.15.锆石存在不同程度铅丢失(图 7f).靠近谐和线的 6 个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2514 \pm 9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.14$),可解释为表壳岩的形成年龄.

(7)角闪变粒岩(A1225).锆石呈短柱状,岩浆环带保留较好,但仍显示重结晶影响存在(图 9a,

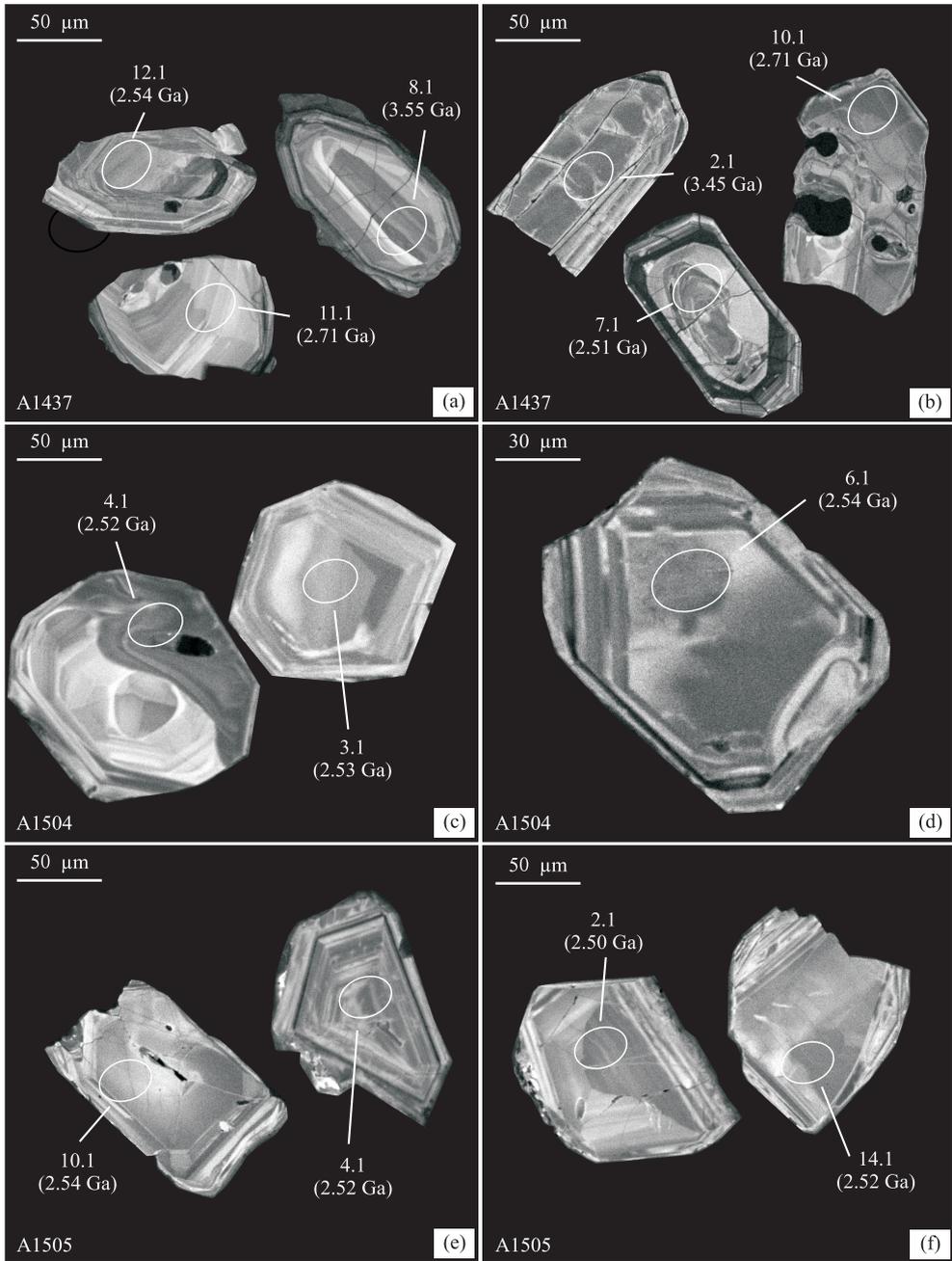


图 8 鞍本地区鸡冠山乡 BIF 铁矿区鞍山群表壳岩的锆石阴极发光图像

Fig.8 Cathodoluminescence images of zircons from the Anshan Group supracrustal rocks in Jiguanxiang BIF mine, Anben
a, b.白云片岩(A1437); c, d.黑云变粒岩(A1504); e, f.变质酸性火山岩(A1505)

9b). 8 个岩浆锆石数据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $73 \times 10^{-6} \sim 915 \times 10^{-6}$ 和 0.16~1.20. 部分锆石存在强烈铅丢失. 5 个位于谐和线上较集中分布的数据点, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2502 \pm 13 \text{ Ma}$ (MSWD=1.02) (图 10a), 可能接近火山岩浆锆石形成时代. 一个锆石上进行分析的 2 个数据点, 一个反向分布, 位于谐和线上数据点 (2.2) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2756 Ma, 为碎屑锆石或

外来锆石.

(8) 黑云变粒岩 (A1230). 锆石呈柱状, 具封闭环带或板状环带, 显示一定程度重结晶 (图 9c, 9d). 颗粒 1.2 似包裹早期锆石, 但核和边年龄类似. 11 个数据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $33 \times 10^{-6} \sim 548 \times 10^{-6}$ 和 0.54~1.53. 锆石显示不同程度重结晶, 数据点沿同一不一致线分布 (图 10b). 4 个靠近谐和线数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为

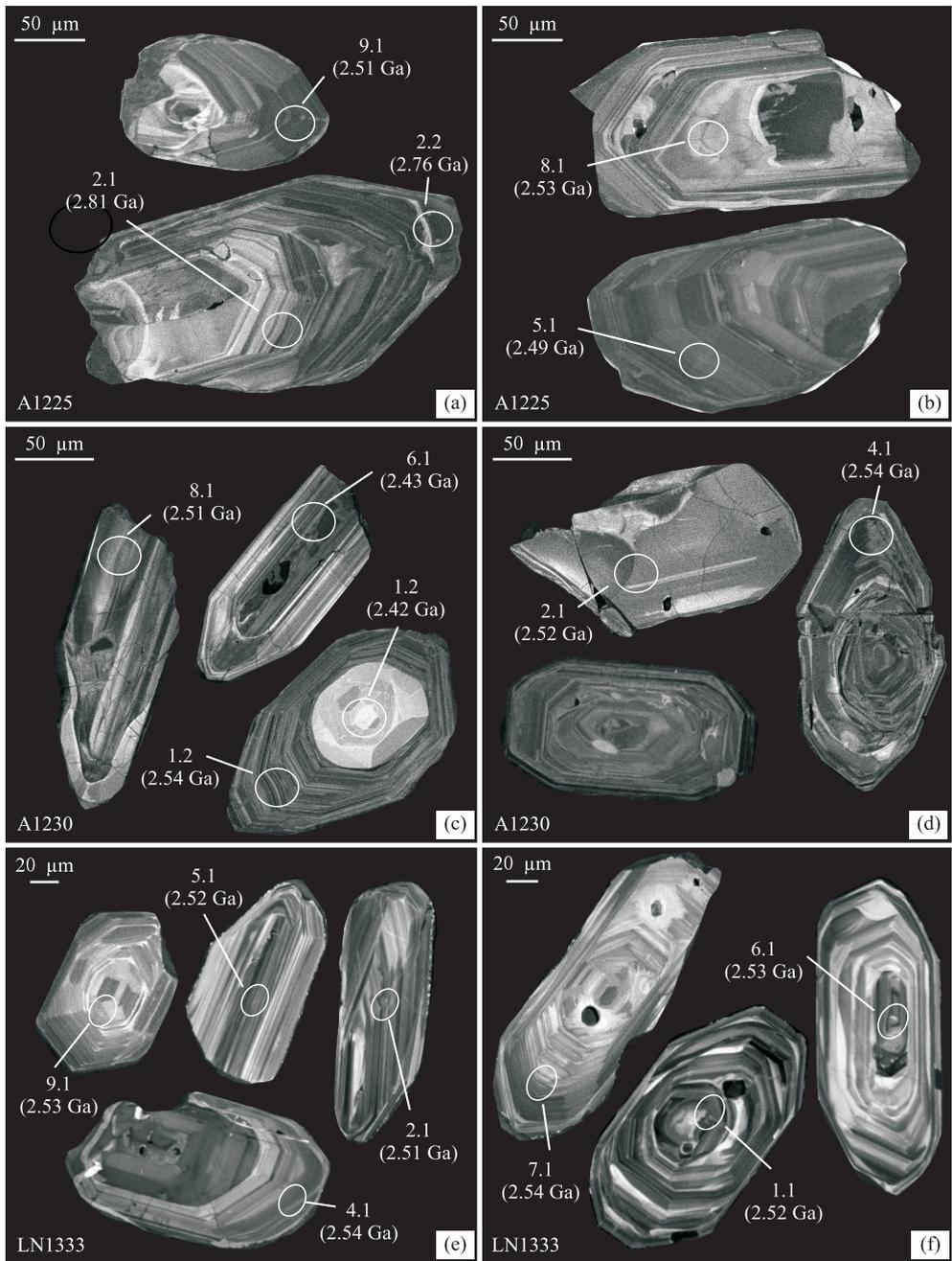


图 9 鞍本地区鞍山群表壳岩的锆石阴极发光图像

Fig.9 Cathodoluminescence images of zircons from the Anshan Group supracrustal rocks in Anben
a, b.角闪变粒岩(A1225),鸡冠山北;c, d.黑云变粒岩(A1230),鸡冠山北西;e, f.黑云变粒岩(LN1333),灯塔八家子东

$2\ 519 \pm 23\ \text{Ma}$ (MSWD = 0.23), 可解释为变质原岩中酸性火山岩的形成时代。

(9) 黑云变粒岩(细粒黑云斜长片麻岩, LN1333). 锆石呈柱状, 具封闭环带或板状环带(图 9e, 9f). 12 个数据点分析, U 含量和 Th/U 比值分别为 $125 \times 10^{-6} \sim 268 \times 10^{-6}$ 和 0.39~1.96. 部分锆石存在不同程度铅丢失, 在谐和线上或附近集中分布的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\ 531 \pm$

$6\ \text{Ma}$ (MSWD = 0.95) (图 10c), 为表壳岩形成的年龄记录。

(10) 斜长角闪岩(LN1331). 锆石呈短柱状, 原锆石具封闭震荡环带(图 11a, 11b), 故不是基性岩浆岩中的岩浆锆石, 而是外来锆石. 12 个数据点分析结果表明, U 含量和 Th/U 比值分别为 $57 \times 10^{-6} \sim 591 \times 10^{-6}$ 和 0.26~1.29. 大部分锆石发生强烈重结晶, 部分锆石具有扇形结构(图 10d). 除数据

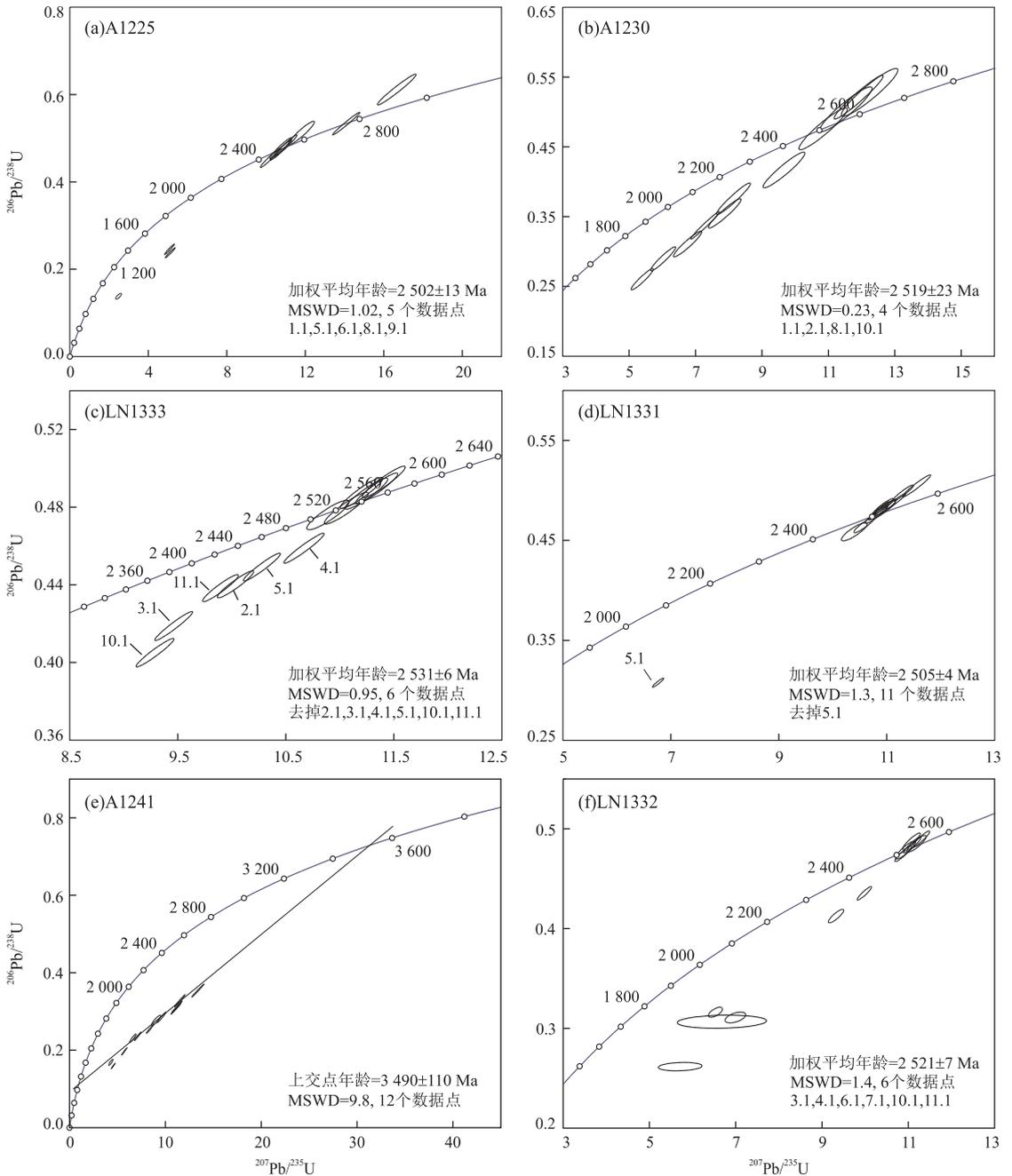


图 10 鞍山地区鞍山群表壳岩的锆石 U-Pb 谐和图

Fig.10 Concordia diagrams for SHRIMP U-Pb zircon analyses of the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a.角闪变粒岩(A1225),鸡冠山北;b.黑云变粒岩(A1230),鸡冠山北西;c.黑云变粒岩(LN1333),灯塔八家子东;d.斜长角闪岩(LN1331),歪头山西南 BIF 铁矿区间;e.黑云变粒岩(A1241),歪头山西南;f.黑云变粒岩(LN1332),歪头山西

点 5.1 外,其余数据点集中分布在谐和线上或附近(图 10d), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2505\pm 4\text{ Ma}$ (MSWD=1.3),为变质作用年龄记录。

(11)黑云变粒岩(A1241).锆石呈柱状,由于重结晶作用,岩浆环带普遍遭受破坏,只有锆石部分成分域仍保留岩浆环带(图 11c, 11d).12 个数据点分析,U 含量和 Th/U 比值分别为 $674\times 10^{-6}\sim 1156\times 10^{-6}$

和 0.51~0.85.锆石存在强烈铅丢失,但数据点位于同一不一致线上(图 10e).由于铅丢失强烈,上交点年龄误差很大($3490\pm 110\text{ Ma}$),MSWD 也很大(9.8)。

(12)黑云变粒岩(细粒黑云斜长片麻岩, LN1332).锆石呈近等轴状或短柱状,具封闭环带或板状环带,部分锆石显示重结晶,存在很窄的变质增生边(图 11e, 11f).12 个数据点分析,U 含量和 Th/

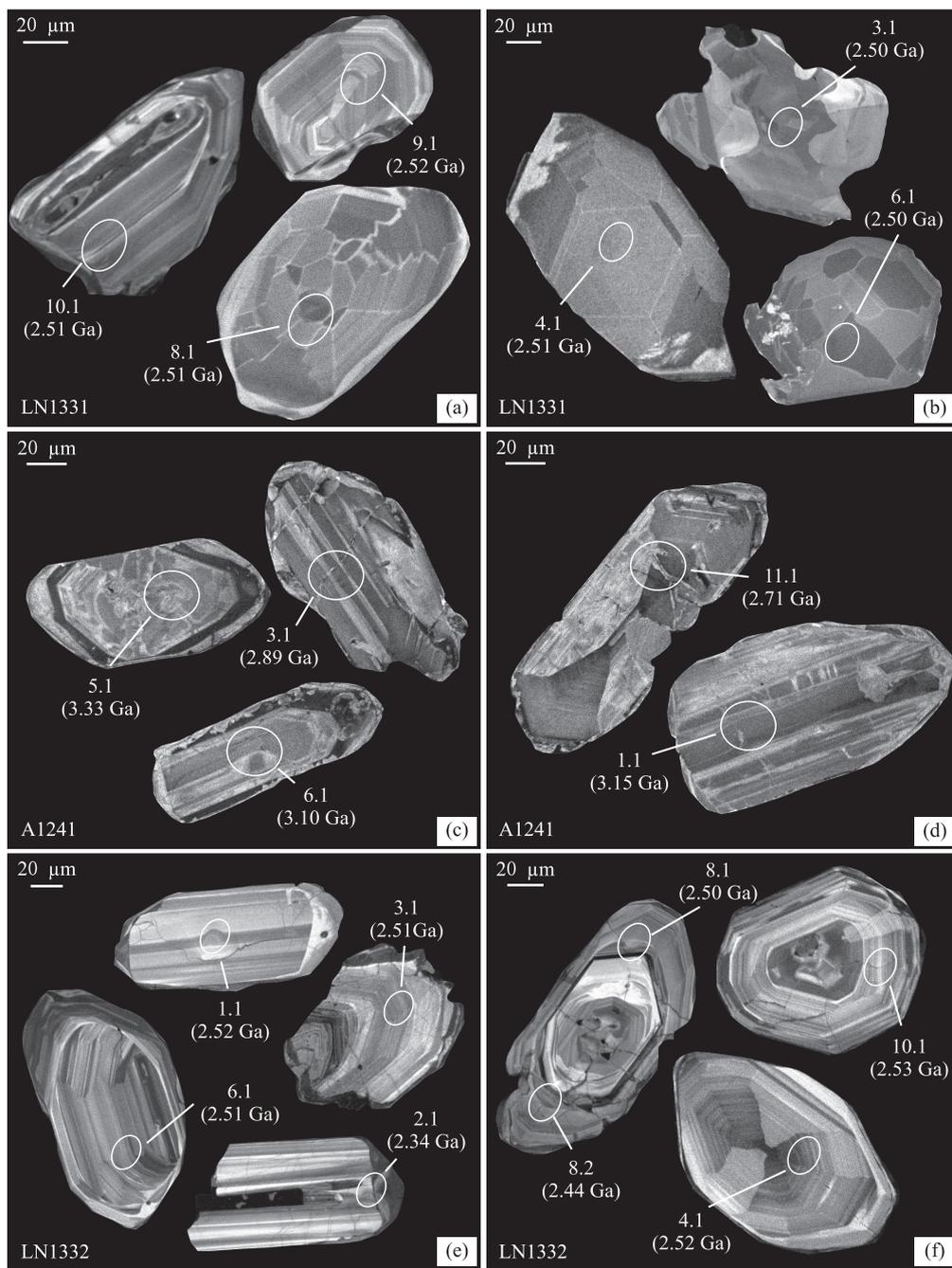


图 11 鞍本地区鞍山群表壳岩的锆石阴极发光图像

Fig.11 Cathodoluminescence images of zircons from the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

a, b.斜长角闪岩(LN1331),歪头山西南 BIF 铁矿区;c, d.黑云变粒岩(A1241),歪头山西南;e, f.黑云变粒岩(LN1332),歪头山西

U 比值分别为 $83 \times 10^{-6} \sim 343 \times 10^{-6}$ 和 $0.22 \sim 1.20$ 。部分锆石存在铅丢失,在谐和线上集中分布的数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2\,521 \pm 7\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.4$) (图 10f),代表表壳岩的形成时代。

4 讨论

本文共对 12 个表壳岩样品进行了锆石

SHRIMP U-Pb 定年,加之前人的定年样品,覆盖了鞍本地区大多数表壳岩(图 1)。笔者对大量表壳岩样品开展锆石 SHRIMP U-Pb 定年,除为了确定鞍山群表壳岩具体形成时代外,还有两个重要原因。一是寻找新太古代晚期之前的表壳岩,再就是在表壳岩样品中寻找新太古代晚期以前的古老锆石。在鞍山地区已发现大量中太古代以前的表壳岩和岩浆岩,在弓长岭、本溪、歪头山一带的新太古代晚期花岗质

岩石中存在大量古老外来锆石 (Wan *et al.*, 2015b), 最近还发现大量新太古代晚期以前的岩石 (Liu *et al.*, 2017; 刘树文, 个人通讯). 寻找新太古代晚期以前古老物质仍是鞍本地区重要的研究内容.

12 个表壳岩样品锆石定年, 大都获得 2.50 ~ 2.55 Ga 核部锆石年龄 (附表 2). 年龄大小与岩石类型之间不存在明显关系. 大多数样品核部锆石为岩浆成因, 其年龄代表火山作用, 即变质原岩形成时代, 一些样品的核部锆石为碎屑或外来锆石, 其年龄限制表壳岩最大形成时代. 核部锆石普遍具有震荡环带, 一些核部锆石具板状环带, 一些核部锆石还具有沙钟构造, 与它们来自安山质—英安质火山岩 (相对于火山成因锆石) 或花岗质侵入岩 (相对于碎屑成因锆石) 的认识相吻合 (万渝生, 未发表资料). 由于后期变质作用影响, 核部锆石普遍遭受重结晶改造, 一些核部锆石的年龄可能偏小.

代堰镔等 (2012)、Han *et al.* (2014) 对一些变质玄武岩进行了锆石定年, 具震荡环带结构锆石的年龄为 2.53 ~ 2.55 Ga, 并解释为岩浆成因. 笔者在斜长角闪岩 (LN1331) 中也获得类似锆石年龄. 一些锆石也显示震荡环带, 它们不是来自基性岩浆, 而是中酸性岩浆. 实际上, 从玄武质岩石中很难分选出岩浆锆石, 这些锆石很可能为玄武质岩浆上升过程中捕获围岩的锆石. 一些变质沉积岩样品的碎屑锆石年龄在 2.53 ~ 3.50 Ga 之间, 本身不能确定表壳岩的形成时代, 仅能限制沉积岩的最大沉积年龄; 但是, 这些表壳岩普遍被 ~2.5 Ga 正长花岗岩包裹和切割, 限定了表壳岩的最小形成年龄, 仍表明它们形成于新太古代晚期 (Wan *et al.*, 2015b, 2016a). 根据现有资料, 鞍本地区与 BIF 铁矿相关的广泛分布的表壳岩 (鞍山群) 形成时代为新太古代晚期. 华北克拉通新太古代晚期表壳岩形成时代主体为 2.52 ~ 2.55 Ga (万渝生等, 2012), 与鞍本地区的十分类似.

另一方面, 在鞍本地区发现新太古代晚期以前表壳岩的可能性不能完全排除. 鞍山 3.35 Ga 陈台沟表壳岩中存在磁铁矿含量很低的变质燧石岩, 变质原岩为化学沉积. 但氧化铁含量太低 (<15%), 按定义, 它们并不能被称之为 BIF. 有两个问题需作特别说明.

(1) 最近, 代堰镔等 (2013) 对陈台沟与齐大山之间第四系覆盖区的一钻孔 (ZK26) 中的 BIF 铁矿夹层绿泥石英片岩 (根据矿物组合和地球化学组成特征, 称其为片麻状绿泥石化黑云片麻岩更恰当, 变质

原岩很可能为中酸性火山沉积岩) 进行了锆石定年, 获得岩浆锆石和变质锆石年龄分别为 $2\ 551 \pm 10$ Ma 和 $2\ 469 \pm 23$ Ma, 岩石中还存在着一些 $2\ 608 \sim 2\ 733$ Ma 外来锆石或碎屑锆石, 并把这些 BIF 称之为陈台沟 BIF. 但它们属于新太古代晚期鞍山群表壳岩中的 BIF, 而不是古太古代陈台沟表壳岩中的 BIF, 它们属齐大山 BIF 矿带, 笔者建议称其为齐大山 BIF 或鞍山群表壳岩的 BIF. 在该区, 还存在古元古代辽河群. 三者之间均为构造接触关系.

(2) Dai *et al.* (2014) 在鞍山大孤山 BIF 铁矿区获得花岗质岩石和表壳岩的锆石年龄 ~3.1 Ga, 认为大孤山 BIF 形成时代为中太古代, 而不是新太古代晚期. 然而, 在同一东西向矿带西侧的东鞍山 BIF 铁矿和东侧的眼前山 BIF 铁矿形成时代都为新太古代晚期 (Guo *et al.*, 2017; 本文图 1). 笔者对大孤山 BIF 铁矿区也进行了研究, 获得与 Dai *et al.* (2014) 同样的锆石定年结果. 该区还存在古元古代辽河群变质沉积岩, 这些不同时代和不同成因的岩石之间为构造关系. 大孤山 BIF 铁矿形成时代仍为新太古代晚期.

歪头山西南黑云变粒岩样品 (A1241) 的锆石定年, 上交点年龄为 $3\ 490 \pm 110$ Ma. 锆石具较完好晶形, 如果为碎屑成因, 也是来自不远的单一的物源区. 存在 4 种可能: ① 代表碎屑锆石年龄, 碎屑物质来自 ~3.5 Ga 的物源区; ② 代表岩浆锆石年龄, 黑云变粒岩与 BIF 形成于同时代, 意味着鞍本地区存在 ~3.5 Ga 的 BIF 铁矿; ③ 代表岩浆锆石年龄, 但黑云变粒岩与 BIF 形成于不同时代, 两者为构造关系; ④ 变质原岩不是表壳岩, 而是侵入岩浆岩 (岩石遭受强烈变质变形, 原岩类型较难确定), 该年龄大致代表侵入年龄. 尽管该年龄的误差很大, 地质意义有待进一步确定, 但仍给出了古老陆壳物质存在的重要信息. Liu *et al.* (2017) 在歪头山一本溪一带已发现 ~3.45 Ga 岩浆岩.

一些表壳岩样品中存在 2.7 ~ 3.5 Ga 碎屑锆石或外来锆石, 与 2.5 Ga 齐大山正长花岗岩中存在大量古老外来锆石和 ≥ 2.7 Ga 岩石的发现一道, 表明古老物质在整个鞍本地区广泛存在, 并不仅局限于鞍山地区. 值得指出的是, 一些岩石中存在较多 2.7 Ga 碎屑锆石或外来锆石, 前人长期不清楚它们的物源区 (Wan *et al.*, 2015b). 最近, 在本溪—歪头山一带研究人员发现了 2.7 Ga 花岗质岩石 (刘树文, 个人通讯). 迄今, 2.7 Ga 岩石 (主要为英云闪长岩) 在华北克拉通多于 15 个地区被识别出来. 越来越

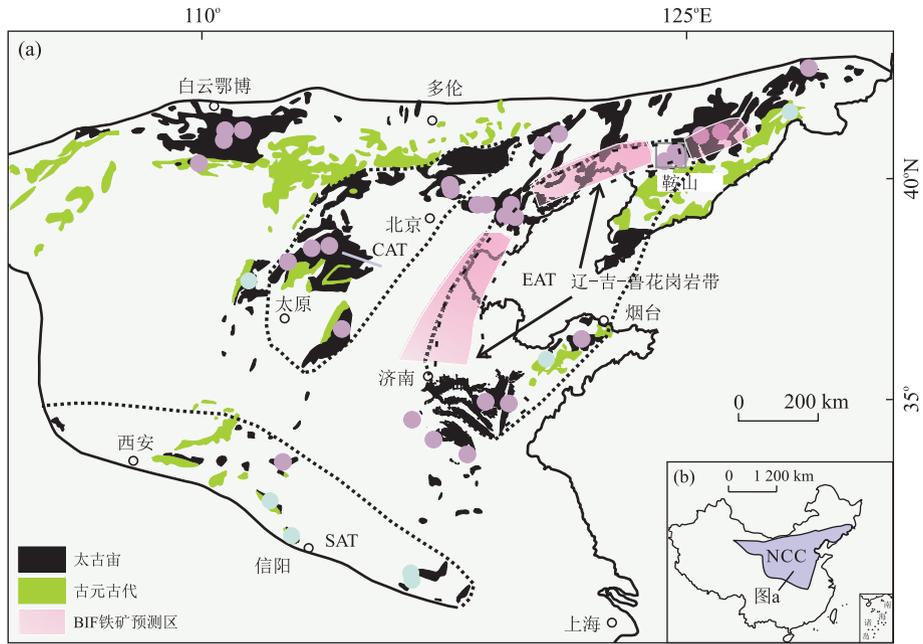


图 12 华北克拉通地质简图

Fig.12 Geological sketch of the North China Craton

据 Wan *et al.* (2016a) 修改; 图中给出了 >2.6 Ga 古陆块分布和新太古代晚期和古元古代 BIF 空间分布; EAT, 东部古陆块; SAT, 南部古陆块; CAT, 中部古陆块; 中国地图据 1:1 亿中华人民共和国地图(审图号: GS(2016)1552 号, 国家测绘地理信息局监制) 修改

多的证据支持了这样的认识: 华北克拉通与全球其他典型克拉通类似, 新太古代早期—中太古代晚期是主要的陆壳增生期, 所不同的是, 华北克拉通遭受了新太古代晚期强烈构造岩浆热事件而显示其独特性 (Zhai and Santosh, 2011; Wan *et al.*, 2014, 2015a).

鞍本地区在新太古代晚期变质程度存在空间变化。总体上, 东北部(东部)岩石比西南部(西部)岩石遭受更强烈变质, 深熔浅色体更为发育。与之相应, 东北部(东部)岩石有更多新太古代晚期—古元古代早期变质锆石年龄记录。采自歪头山西南 BIF 铁矿区的斜长角闪岩(LN1331)的变质锆石具扇形结构, 年龄为 2 505 Ma。它们不是捕获的外来锆石, 而是斜长角闪岩的变质锆石, 表明岩石曾遭受高级变质, 尽管现仅为角闪岩相变质矿物组合。华北克拉通许多地区都存在新太古代晚期—古元古代早期(2.48~2.45 Ga, 甚至更晚)变质锆石年龄记录, 这些地区都存在新太古代晚期和古元古代晚期两期构造热事件叠加改造。对此前人存在不同解释 (Dong *et al.*, 2017b): ①从新太古代晚期到古元古代早期存在一连串的构造热事件; ②存在古元古代早期一次独立的构造热事件; ③古元古代早期变质锆石年龄记录是古元古代晚期构造热事件叠加改造新太古代晚期变质锆石的结果。鞍本地区也存在古元古代晚期变质锆石年龄记录(李厚民等, 2014; Li *et al.*, 2016), 表

明这一构造热事件的存在。对于存在古元古代晚期变质锆石年龄记录的原因也有待进一步确定。

鞍山群表壳岩主要由变质玄武岩、变质安山岩—英安岩和 BIF 组成, 还存在一些变质碎屑沉积岩及其他类型岩石。根据岩石组合和地球化学组成特征, 学者们通常认为鞍山群表壳岩形成于岛弧系统环境 (Zhai *et al.*, 1990; 万渝生, 1993; 代堰镛等, 2013; 张连昌等, 2014; Sun *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2017)。变质火山岩—火山碎屑沉积岩中的锆石, 除变质成因外, 还包括了 3 个来源: ①同时代的中酸性火山岩; ②同时代的中酸性侵入岩; ③更古老的陆源区。这与鲁西地区新太古代晚期变质火山岩—火山碎屑沉积岩的锆石成因和来源十分类似, 支持了岛弧系统构造环境的认识 (Wan *et al.*, 2012b)。

≥ 2.7 Ga 岩石在鞍本地区被大量发现, 鞍山群表壳岩中存在变泥沙质碎屑沉积岩和大量 ≥ 2.7 Ga 碎屑锆石和外来锆石, 2.5 Ga 花岗质岩石中存在大量外来锆石及全岩 Nd 同位素和岩浆锆石 Hf 同位素组成普遍显示长期地壳滞留时间, 2.5 Ga 花岗质岩石切割和包裹鞍山群表壳岩, 所有这些都表明鞍山群表壳岩形成于陆壳基底之上。另一方面, BIF 的条带状构造要求沉积深度在波及面之下。所以, 鞍山群表壳岩的沉积环境可能是大陆斜坡, 或更可能是弧后盆地。不论什么沉积环境, 表壳岩都形成于陆壳

基底之上。虽然表壳岩中许多变质玄武质岩石具有 MORB 组成特征,该区在新太古代晚期并没有真正意义上的大洋出现。

从更大范围看,鞍本位于华北克拉通东部古陆块(Eastern Ancient Tarrane)的西缘,与冀东、鲁西一道,构成一个巨型新太古代晚期 BIF 成矿带(图 12; Wan *et al.*, 2015a, 2016a, 2016b)。该带也是一个新太古代晚期巨型壳源花岗岩带。在其西侧,很可能存在一个与之平行的巨型 TTG 岩带,双岩浆岩带的存在支持了板块构造体制在新太古代晚期已起作用的认识(万渝生等, 2017)。研究表明, BIF 成矿规模与早期陆壳成熟度之间存在相关性,早期陆壳成熟度越高, BIF 规模越大。这与全球其他典型克拉通的情况类似或相同(Eriksson *et al.*, 2006; Van Kranendonk *et al.*, 2012)。所以,稳定的构造环境看来有利于大规模 BIF 形成。

5 结论

(1)从许多样品中获得 2.50~2.55 Ga 岩浆锆石年龄。一些变质玄武岩中存在 2.53~2.55 Ga 捕获锆石,一些变质沉积岩样品存在 2.53~3.07 Ga 碎屑锆石,鞍山群表壳岩普遍被~2.5 Ga 正长花岗岩包裹和切割。所以,鞍本地区广泛分布的含 BIF 铁矿鞍山群表壳岩系形成时代为新太古代晚期。

(2)一些岩石中存在 2.7~3.5 Ga 碎屑锆石或外来锆石。与 2.5 Ga 齐大山正长花岗岩中存在大量古老外来锆石和 ≥ 2.7 Ga 岩石的发现一道,表明古老物质在整个鞍本地区广泛存在。鞍山群表壳岩形成于陆壳基底之上,最可能的沉积环境是大陆斜坡或弧后盆地。

(3)与西南部(西部)岩石相比,东北部(东部)岩石中存在更多新太古代晚期—古元古代早期变质锆石年龄记录,支持了这样的认识:鞍本地区在新太古代晚期变质程度存在空间变化,东北部(东部)岩石比西南部(西部)岩石遭受更强烈变质深熔作用。

致谢:锆石 SHRIMP U-Pb 定年过程中,刘建辉保障仪器正常工作,样品靶由杨淳、甘伟林制作,锆石阴极发光照片由周丽芹完成。研究过程中得到刘树文教授的帮助,深表谢意!

董申保院士是我国变质岩石学的重要奠基人之一,为我国变质地质学的发展作出了卓越贡献。正值董先生 100 华诞之际,谨以该文表达我们的纪念!

References

- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., et al., 2003. TEMORA 1: A New Zircon Standard for Phanerozoic U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7)
- Chen, Y.W., Zhong, F.D., Liu, J.Y., et al., 1981. Pb Isotopic Age Determinations of Some Precambrian Rocks from North China (Additional Discussion on Precambrian Geochronological Scale of China). *Geochimica*, 10(3): 209-219 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y.Q., 1957. Problems on the Genesis of the High-Grade Ore in the Pre-Sinian (Pre-Cambrian) Banded Iron Ore Deposits of the Anshan-Type of Liaoning and Shantung Provinces. *Acta Geologica Sinica*, 31(2): 153-180, 241-250. (in Chinese with English abstract).
- Cui, P.L., Sun, J.G., Sha, D.M., et al., 2013. Oldest Zircon Xenocryst (4.17 Ga) from the North China Craton. *International Geology Review*, 55(15): 1902-1908. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.805925>
- Dai, Y.P., Zhang, L.C., Wang, C.L., et al., 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, Y.P., Zhang, L.C., Zhu, M.T., et al., 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).
- Dai, Y.P., Zhang, L.C., Zhu, M.T., et al., 2014. The Composition and Genesis of the Mesoarchean Dagushan Banded Iron Formation (BIF) in the Anshan Area of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 63: 353-373. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.04.013>
- Dong, C.Y., Wan, Y.S., Xie, H.Q., et al., 2017a. The Mesoarchean Tiejiaoshan-Gongchangling Potassic Granite in the Anshan-Benxi Area, North China Craton: Origin by Recycling of Paleo- to Eoarchean Crust from U-Pb-Nd-Hf-O Isotopic Studies. *Lithos*, 290-291: 116-135. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.009>
- Dong, C.Y., Xie, H.Q., Kröner, A., et al., 2017b. The Complexities of Zircon Crystallization and Overprinting during Metamorphism and Anatexis: An Example from the Late Archean TTG Terrane of Western Shandong Province, China. *Precambrian Research*, 300: 181-200. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.034>
- Eriksson, P.G., Altermann, W., Hartzler, F.J., 2006. The Transvaal Supergroup and Its Precursors. In: Johnson,

- M.R., Anhaeusser, C.R., Thomas, R.J., eds., The Geology of South Africa. *Johannesburg*, 237—260.
- Guo, R. R., Liu, S. W., Gong, E. P., et al., 2017. Arc-Generated Metavolcanic Rocks in the Anshan-Benxi Greenstone Belt, North China Craton: Constraints from Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Systematics. *Precambrian Research*, in Press. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.028>
- Han, C.M., Xiao, W.J., Su, B.X., et al., 2014. Formation Age and Genesis of the Gongchangling Neoproterozoic Banded Iron Deposit in Eastern Liaoning Province: Constraints from Geochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Precambrian Research*, 254:306—322. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.007>
- Li, H.M., Liu, M.J., Li, L.X., et al., 2014. SHRIMP U-Pb Geochronology of Zircons from the Garnet-Rich Altered Rocks in the Mining Area II of the Gongchangling Iron Deposit: Constraints on the Ages of the High-Grade Iron Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1205—1217 (in Chinese with English abstract).
- Li, L.X., Li, H.M., Liu, M.J., et al., 2016. Timing of Deposition and Tectonothermal Events of Banded Iron Formations in the Anshan-Benxi Area, Liaoning Province, China: Evidence from SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Wall Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129:276—293. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.08.022>
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of $\geq 3\ 800$ Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4): 339—342. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0339:romcit>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0339:romcit>2.3.co;2)
- Liu, D.Y., Wilde, S.A., Wan, Y.S., et al., 2008. New U-Pb and Hf Isotopic Data Confirm Anshan as the Oldest Preserved Segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3):200—231. <https://doi.org/10.2475/03.2008.02>
- Liu, S. W., Wang, M. J., Wan, Y. S., et al., 2017. A Reworked ~ 3.45 Ga Continental Microblock of the North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb-Lu-Hf Isotopic Systematics of the Archean Beitai-Waitoushan Migmatite-Syenogranite Complex. *Precambrian Research*, in Press. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.003>
- Ludwig, K. R., 2001. Squid 1.02: A User's Manual. Berkeley Geochronology Centre, Berkeley.
- Qiao, G. S., Zhai, M. G., Yan, Y. H., 1990. Geochronological Study of Archean Rocks in Anshan, Liaoning Province. *Scientia Geologica Sinica*, 25(2):158—165 (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).
- Song, B., Nutman, A.P., Liu, D.Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1—3):79—94. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00070-4)
- Sun, X. H., Zhu, X. Q., Tang, H. S., et al., 2014. The Gongchangling BIFs from the Anshan-Benxi Area, NE China: Petrological-Geochemical Characteristics and Genesis of High-Grade Iron Ores. *Ore Geology Reviews*, 60: 112—125. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.017>
- Van Kranendonk, M. J., Altermann, W., Beard, B. L., et al., 2012. A Chronostratigraphic Division of the Precambrian: A Chronostratigraphic Division of the Precambrian: Possibilities and Challenges. In: Gradstein, F.M., Ogg, J. G., Schmitz, M., et al., eds., The Geologic Time Scale. Elsevier, New York, 299—392.
- Wan, Y. S., 1993. Formation and Evolution of Liaoning Gongchangling Iron Rocks. Beijing Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Wan, Y.S., Dong, C.Y., Ren, P., et al., 2017. Spatial and Temporal Distribution, Compositional Characteristics and Formation and Evolution of Archean TTG Rocks in North China Craton: A Synthesis. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1405—1419 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Wan, Y.S., Geng, Y.S., Shen, Q.H., et al., 2002. Geochemical Characteristics of Supracrustal Enclaves in Mesoproterozoic Tiejianshan Granite in Anshan Area and Its Geological Significance. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 143—151, 164 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., 1993. Ages of Zircons from Mid-Archean Gneissic Granite and Fuchsite Quartzite in the Gongchangling Area, Liaoning. *Geological Review*, 39(2):124—129 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2015a. Formation and Evolution of Archean Continental Crust of the North China Craton. In: Zhai, M. G., ed., Precambrian Geology of China. Springer, Berlin, 59—136. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47885-1_2
- Wan, Y. S., Ma, M., Dong, C. Y., et al., 2015b. Widespread Late Neoproterozoic Reworking of Meso- to Paleoproterozoic

- Continental Crust in the Anshan-Benxi Area, North China Craton, as Documented by U-Pb-Nd-Hf-O Isotopes. *American Journal of Science*, 315(7): 620–670. <https://doi.org/10.2475/07.2015.02>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Nutman, A., et al., 2012a. Multiple 3.8–3.1 Ga Tectono-Magmatic Events in a Newly Discovered Area of Ancient Rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54–55: 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.03.007>
- Wan, Y. S., Wang, S. J., Liu, D. Y., et al., 2012b. Redefinition of Depositional Ages of Neoproterozoic Supracrustal Rocks in Western Shandong Province, China; SHRIMP U-Pb Zircon Dating. *Gondwana Research*, 21(4): 768–784. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.05.017>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Song, B., et al., 2005. Geochemical and Nd Isotopic Compositions of 3.8 Ga Meta-Quartz Dioritic and Trondhjemitic Rocks from the Anshan Area and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563–575. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.02.009>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Xie, H. Q., et al., 2016a. Formation Ages and Environments of Early Precambrian Banded Iron Formation in the North China Craton. In: Zhai, M. G., ed., *Main Tectonic Events and Metallogeny of the North China Craton*. Springer, Berlin, 65–83. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1064-4_4
- Wan, Y. S., Liu, S. J., Kröner, A., et al., 2016b. Eastern Ancient Terrane of the North China Craton. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(4): 1082–1096. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12763>
- Wan, Y. S., Xie, S. W., Yang, C. H., et al., 2014. Early Neoproterozoic (~2.7 Ga) Tectono-Thermal Events in the North China Craton: A Synthesis. *Precambrian Research*, 247: 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.019>
- Wang, S. L., Zhang, R. H., 1995. U-Pb Isotope Age of Individual Zircon from Biotite Leptynite in the Qidashan Iron Deposit and Its Significance. *Mineral Deposits*, 14(3): 216–219 (in Chinese with English abstract).
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: Mickibben, M. A., Shanks III, W. C., Ridley, W. I., eds., *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Review Economic Geology*, 7: 1–35. <https://doi.org/10.1080/00241160410006483>
- Wu, J. S., Geng, Y. S., Shen, Q. H., et al., 1989. *Geological Characteristics and Tectonic Evolution of the Sino Korean Continent*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, F. C., Sun, J. G., Song, Y. H., et al., 2016. SHRIMP U-Pb Age, Hf Isotope Composition and Geochemical Characteristics of Neoproterozoic Granitic Complex in Liaodong Lianshanguan Area, NE China. *Earth Science*, 41(12): 2008–2018 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.140>
- Yang, X. Q., Li, H. M., Xue, C. J., et al., 2013. Geochemical Characteristics of Two Iron Ores from the Waitoushan Iron Deposit, Liaoning Province: Constraints on Ore-Forming Mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1580–1592 (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. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhai, M. G., Windley, B. F., Sills, J. D., 1990. Archean Gneisses, Amphibolites and Banded Iron-Formations from the Anshan Area of Liaoning Province, NE China: Their Geochemistry, Metamorphism and Petrogenesis. *Precambrian Research*, 46(3): 195–216. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(90\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90002-8)
- Zhang, L. C., Dai, Y. P., Wang, C. L., et al., 2014. Age, Material Sources and Formation Setting of Precambrian BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(4): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, F. D., 1984. Geochronological Study of Archean Granite-Gneisses in Anshan Area, Northeast China. *Geochimica*, 13(3): 195–205 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. T., Dai, Y. P., Zhang, L. C., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Nanfen Iron Deposit in the Anshan-Benxi Area, North China Craton: Implications for ~2.55 Ga Crustal Growth and the Genesis of High-Grade Iron Ores. *Precambrian Research*, 260: 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.01.001>

附中中文参考文献

- 陈毓蔚, 钟富道, 刘菊英, 等, 1981. 我国北方前寒武岩石铅同位素年龄测定——兼论中国前寒武地质年表. *地球化学*, 10(3): 209–219.
- 程裕淇, 1957. 中国东北部辽宁山东等省前震旦纪鞍山式条带状铁矿中富矿的成因问题. *地质学报*, 31(2): 153–180, 241–250.
- 代堰镔, 张连昌, 王长乐, 等, 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, 等, 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.
- 李厚民,刘明军,李立兴,等,2014.弓长岭铁矿二矿区蚀变岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义.岩石学报,30(5): 1205—1217.
- 乔广生,翟明国,阎月华,1990.鞍山地区太古代岩石同位素地质年代学研究.地质科学,25(2): 158—165.
- 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.
- 万渝生,1993.辽宁弓长岭含铁岩系的形成与演化.北京:北京科学技术出版社.
- 万渝生,董春艳,任鹏,等,2017.华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化:综述.岩石学报,33(5): 1405—1419.
- 万渝生,董春艳,颜颜强,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.
- 万渝生,耿元生,沈其韩,等,2002.鞍山中太古代铁架山花岗岩中表壳岩包体的地球化学特征及地质意义.地质科学,37(2): 143—151, 164.
- 万渝生,刘敦一,1993.辽宁弓长岭中太古代片麻岩和铬云母石英岩的锆石年龄.地质论评,39(2): 124—129.
- 王守伦,张瑞华,1995.齐大山铁矿黑云母变粒岩单锆石年龄及意义.矿床地质,14(3): 216—219.
- 伍家善,耿元生,沈其韩,等,1989.中朝古大陆的地质特征及构造演化.北京:地质出版社.
- 杨凤超,孙景贵,宋运红,等,2016.辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义.地球科学,41(12): 2008—2018.
- 杨秀清,李厚民,薛春纪,等,2013.辽宁歪头山铁矿两类矿石地球化学特征及其对成矿作用的制约.地质学报,87(10): 1580—1592.
- 张连昌,代堰镭,王长乐,等,2014.鞍山—本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代、物质来源与形成环境.地球科学与环境学报,36(4): 1—15.
- 钟富道,1984.鞍山铁甲山花岗岩片麻岩同位素年代学研究.地球化学,13(3): 195—205.

附表 1 鞍山地区鞍山群表壳岩的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄
Appendix table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons from the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

黑云变粒岩(A1502)		云母石英片岩(A1114)														
数据点	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/ U	$^{206}\text{Pb}^*$ (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$	±%	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	±%	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	±%	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U 年龄(Ma)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	
1.1	1.36	499	251	0.52	150	0.1590	1.10	7.520	1.8	0.343 2	1.4	0.80	1 902	2 445	±18	22
2.1	2.88	725	143	0.20	159	0.1521	1.40	5.148	1.9	0.245 6	1.4	0.74	1 416	2 369	±22	40
3.1	2.47	329	119	0.37	122	0.1689	1.70	9.740	2.2	0.418 7	1.5	0.65	2 255	2 546	±28	11
4.1	0.38	133	16	0.12	54	0.171 6	0.86	11.190	1.8	0.473 1	1.5	0.87	2 497	2 573	±14	3
5.1	0.22	432	271	0.65	149	0.165 7	0.60	9.140	1.6	0.400 3	1.5	0.92	2 170	2 515	±10	14
6.1	1.40	371	157	0.44	153	0.166 2	1.00	10.840	1.8	0.473 3	1.5	0.83	2 498	2 519	±17	1
7.1	5.25	1 887	543	0.30	183	0.096 2	3.40	1.403	3.6	0.106 0	1.5	0.41	649	1 549	±61	58
8.1	0.95	158	146	0.95	67	0.169 1	1.10	11.400	1.9	0.489 3	1.6	0.83	2 567	2 548	±18	-1
9.1	0.27	205	187	0.94	70	0.164 9	0.79	9.000	1.8	0.395 6	1.6	0.89	2 149	2 507	±13	14
10.1	6.74	363	429	1.22	104	0.153 8	4.20	6.450	4.5	0.305 0	2.1	0.46	1 716	2 385	±69	28
11.1	1.74	386	185	0.50	131	0.162 6	1.00	8.690	1.9	0.387 6	1.6	0.84	2 112	2 482	±17	1
12.1	2.35	682	320	0.48	172	0.152 6	1.20	6.010	1.8	0.285 6	1.5	0.80	1 620	2 374	±19	32
13.1	6.37	3 356	1 666	0.51	216	0.082 6	4.10	0.794	4.2	0.069 8	1.5	0.35	435	1 259	±78	65
14.1	-0.01	97	79	0.84	41	0.168 5	0.76	11.460	1.7	0.492 9	1.6	0.90	2 583	2 543	±13	-2
15.1	0.13	288	420	1.51	105	0.168 6	0.63	9.840	1.7	0.423 4	1.6	0.93	2 276	2 544	±11	11
1.1	0.95	197	311	1.63	103	0.233 0	1.50	19.270	3.1	0.600 0	2.7	0.86	3 029	3 073	±25	1
2.1	0.13	663	127	0.20	331	0.232 4	0.39	18.610	2.4	0.581 0	2.4	0.99	2 952	3 069	±6	4
3.1	0.58	2 803	639	0.24	380	0.103 1	10.00	2.233	2.4	0.157 1	2.2	0.91	940	1 681	±18	44
4.1	0.33	1 644	465	0.29	346	0.151 0	1.00	5.090	2.4	0.244 3	2.2	0.91	1 409	2 357	±17	40
5.1	0.28	2 805	529	0.19	381	0.099 4	0.68	2.162	2.2	0.157 7	2.1	0.95	944	1 613	±13	41
6.1	0.39	1 651	486	0.30	297	0.158 3	0.73	4.560	2.3	0.208 8	2.2	0.95	1 223	2 438	±12	50
7.1	0.35	2 281	721	0.33	337	0.103 9	0.87	2.455	2.3	0.171 4	2.1	0.93	1 020	1 694	±16	40
8.1	0.37	733	246	0.35	239	0.201 4	0.73	10.520	2.3	0.378 9	2.2	0.95	2 071	2 838	±12	27
9.1	0.35	2 192	811	0.38	386	0.120 5	0.78	3.389	2.3	0.204 0	2.2	0.94	1 197	1 964	±14	39
10.1	0.32	705	651	0.95	267	0.205 7	0.76	12.440	2.3	0.438 8	2.2	0.95	2 345	2 872	±12	18
11.1	0.34	1 467	582	0.41	342	0.162 8	0.96	6.060	2.4	0.270 1	2.2	0.92	1 541	2 485	±16	38
12.1	0.12	891	191	0.22	391	0.219 7	0.51	15.450	2.3	0.510 0	2.2	0.97	2 657	2 979	±8	11
13.1	0.27	885	197	0.23	283	0.190 0	0.67	9.740	2.3	0.371 9	2.2	0.96	2 038	2 742	±11	26

续表 1

黑云二长变粒岩(A1217)																
数据点	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/(10^{-6})$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	±%	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	
1.1	0.00	139	53	0.39	56.9	0.1634	1.10	10.720	3.7	0.476 0	3.5	0.95	±72	2 492	±19	-1
2.1	0.04	167	71	0.44	69.6	0.1611	0.81	10.790	3.5	0.486 0	3.4	0.97	±72	2 467	±14	-3
3.1	0.00	352	151	0.44	137	0.1602	0.57	9.970	3.3	0.451 0	3.3	0.99	±66	2 458	±10	2
4.1	0.32	181	37	0.21	78.5	0.1635	1.00	11.360	3.6	0.504 0	3.4	0.96	±74	2 493	±17	-5
5.1	0.11	276	363	1.36	84.2	0.1555	0.74	7.590	4.0	0.354 0	3.9	0.98	±66	2 407	±13	19
6.1	0.05	667	449	0.70	158	0.1454	0.69	5.510	3.5	0.274 8	3.5	0.98	±48	2 293	±12	32
7.1	0.04	434	297	0.71	144	0.1542	0.56	8.190	3.4	0.385 0	3.4	0.99	±60	2 393	±10	12
白云片岩(A1437)																
1.1	0.64	1 329	1 277	0.99	144	0.1794	0.63	3.106	1.2	0.125 5	1.0	0.85	±7	2 648	±11	71
2.1	0.04	474	362	0.79	204	0.2967	0.25	20.550	1.0	0.502 4	1.0	0.97	±22	3 453	±4	24
3.1	0.40	1 012	710	0.73	165	0.1450	0.49	3.782	1.3	0.189 2	1.2	0.92	±12	2 287	±9	51
4.1	0.82	2 341	1 379	0.61	171	0.1028	0.78	1.195	1.2	0.084 3	1.0	0.77	±5	1 676	±14	69
5.1	0.25	864	189	0.23	142	0.1826	0.86	4.815	1.3	0.191 2	1.0	0.75	±10	2 677	±14	58
6.1	0.67	744	373	0.52	112	0.1631	0.56	3.922	1.1	0.174 4	1.0	0.87	±9	2 488	±10	58
7.1	0.03	238	138	0.60	84	0.1652	0.58	9.330	1.3	0.409 8	1.1	0.89	±21	2 510	±10	12
8.1	0.00	197	117	0.61	105	0.3161	0.60	27.120	1.2	0.622 2	1.1	0.88	±27	3 551	±9	12
9.1	0.14	276	435	1.63	92	0.1635	0.46	8.750	1.2	0.388 0	1.1	0.92	±19	2 492	±8	15
10.1	0.02	244	112	0.48	111	0.1865	0.48	13.610	1.4	0.529 5	1.3	0.94	±29	2 711	±9	-1
11.1	0.04	88	89	1.04	37	0.1866	0.79	12.570	1.6	0.488 4	1.4	0.87	±29	2 713	±13	6
12.1	—	149	118	0.82	59	0.1681	0.65	10.710	1.4	0.462 1	1.2	0.88	±25	2 539	±11	4
黑云变粒岩(A1504)																
1.1	1.11	365	262	0.74	130	0.1651	0.83	9.300	1.6	0.408 6	1.4	0.87	±27	2 508	±14	12
2.1	0.38	388	173	0.46	152	0.1658	0.61	10.370	1.5	0.453 8	1.4	0.92	±28	2 515	±10	4
3.1	0.10	150	91	0.63	64	0.1669	0.72	11.420	1.7	0.496 1	1.5	0.90	±33	2 527	±12	-3
4.1	0.00	228	105	0.48	94	0.1658	0.65	10.930	1.6	0.477 9	1.5	0.91	±31	2 516	±11	0
5.1	0.28	168	141	0.87	60	0.1670	0.82	9.480	1.7	0.411 8	1.5	0.87	±27	2 528	±14	12
6.1	0.07	292	172	0.61	130	0.1680	0.57	11.970	1.5	0.516 8	1.4	0.93	±30	2 538	±10	-6
9.1	1.30	423	317	0.77	131	0.1649	1.50	8.020	2.1	0.352 9	1.4	0.68	±24	2 506	±25	22
7.1	0.58	79	61	0.80	33	0.1686	1.10	11.230	1.9	0.483 0	1.6	0.82	±33	2 544	±19	0
8.1	0.39	293	224	0.79	98	0.1620	0.69	8.620	1.6	0.385 9	1.4	0.90	±25	2 476	±12	15
10.1	0.81	358	238	0.69	116	0.1639	0.76	8.390	1.6	0.371 6	1.4	0.88	±25	2 496	±13	18
11.1	3.95	312	140	0.46	112	0.1805	1.90	9.840	2.3	0.396 1	1.6	0.67	±29	2 655	±29	19
12.1	0.23	257	200	0.81	94	0.1655	0.65	9.740	1.6	0.427 0	1.4	0.91	±28	2 513	±11	9
13.1	0.33	381	302	0.82	119	0.1682	0.64	8.420	1.6	0.363 1	1.4	0.91	±24	2 540	±11	21
14.1	0.10	187	114	0.63	78	0.1662	0.68	11.130	1.6	0.485 6	1.5	0.91	±31	2 520	±11	-1
15.1	0.05	238	140	0.61	98	0.1670	0.61	11.060	1.6	0.480 5	1.4	0.92	±30	2 527	±10	0
16.1	0.03	104	88	0.87	44	0.1668	0.88	11.320	1.8	0.492 0	1.6	0.87	±34	2 526	±15	-2

续表 1

变质酸性火山岩(A1505)														
数据点	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/ U	$^{206}\text{Pb}^*$ (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	
1.1	0.86	644	425	0.68	121	0.1546	1.30	4.600	0.2159	0.72	1 260	2 396	±23	47
2.1	0.04	233	195	0.86	93	0.1647	0.64	10.520	0.4631	0.91	2 453	2 504	±11	2
3.1	0.31	387	190	0.68	93	0.1609	0.81	8.290	0.3740	0.89	2 048	2 465	±14	17
4.1	1.77	225	222	0.70	126	0.1661	1.00	10.130	0.4427	0.83	2 363	2 518	±17	6
5.1	10.95	612	612	1.03	156	0.1543	5.00	5.430	0.2564	0.35	1 471	2 387	±79	38
6.1	1.86	176	140	0.82	45	0.1595	2.10	6.400	0.2911	0.71	1 647	2 449	±35	33
7.1	1.10	552	548	1.03	132	0.1567	0.89	5.930	0.2747	0.86	1 565	2 419	±15	35
8.1	2.30	596	387	0.67	147	0.1553	1.20	5.960	0.2786	0.79	1 584	2 404	±19	34
9.1	1.58	573	328	0.59	146	0.1576	0.99	6.310	0.2905	0.85	1 644	2 429	±16	32
10.1	0.16	118	68	0.59	44	0.1680	0.91	10.140	0.4376	0.88	2 340	2 538	±15	8
11.1	0.05	283	315	1.15	105	0.1664	0.65	9.920	0.4325	0.92	2 317	2 521	±11	8
12.1	2.14	584	510	0.90	100	0.1536	1.40	4.124	0.1949	0.77	1 148	2 385	±22	52
13.1	0.65	509	324	0.66	122	0.1561	0.79	5.970	0.2774	0.89	1 578	2 414	±13	35
14.1	0.09	163	138	0.87	62	0.1664	0.67	10.070	0.4390	0.98	2 347	2 521	±11	7
15.1	0.05	291	190	0.68	111	0.1645	0.54	10.050	0.4429	0.93	2 364	2 503	±9	6
角闪变粒岩(A1225)														
1.1	0.07	197	110	0.58	82	0.1652	0.76	11.000	0.4830	0.98	2 541	2 510	±13	-1
2.1	0.33	133	104	0.81	70	0.1977	0.90	16.650	0.6110	0.97	3 073	2 808	±15	-9
2.2	0.07	217	20	0.09	99	0.1915	0.56	14.090	0.5330	0.99	2 756	2 756	±9	0
3.1	0.08	636	292	0.48	134	0.1500	0.64	5.080	0.2456	0.98	1 416	2 346	±11	40
4.1	0.96	915	808	0.91	110	0.1305	2.50	2.483	0.1378	0.80	832	2 107	±43	61
5.1	0.10	131	76	0.60	51	0.1630	0.76	10.230	0.4550	0.97	2 418	2 487	±13	3
6.1	0.07	89	104	1.20	37	0.1634	0.96	10.750	0.4770	0.96	2 514	2 491	±16	-1
7.1	0.03	377	58	0.16	77	0.1562	0.68	5.120	0.2375	0.98	1 374	2 415	±12	43
8.1	0.08	73	38	0.53	32	0.1672	1.30	11.800	0.5120	0.94	2 664	2 530	±22	-5
9.1	0.07	182	124	0.70	74	0.1650	0.81	10.760	0.4730	0.97	2 497	2 508	±14	0
黑云变粒岩(A1230)														
1.1	0.00	33	17	0.54	15	0.1681	1.70	12.240	0.5280	0.93	2 733	2 539	±28	-8
1.2	0.28	316	193	0.63	92	0.1566	0.72	7.280	0.3370	0.98	1 873	2 420	±12	23
2.1	0.15	126	134	1.10	57	0.1657	1.10	11.910	0.5210	0.97	2 704	2 515	±18	-7
3.1	0.79	548	312	0.59	124	0.1503	1.30	5.390	0.2600	0.95	1 488	2 351	±23	37
4.1	0.96	291	180	0.64	105	0.1682	1.50	9.650	0.4160	0.94	2 241	2 541	±24	12
5.1	0.30	222	167	0.78	55	0.1509	1.30	6.020	0.2890	0.95	1 638	2 357	±22	31
6.1	0.87	282	371	1.36	76	0.1578	1.40	6.750	0.3100	0.95	1 741	2 434	±23	28
7.1	0.41	250	149	0.62	81	0.1572	1.20	8.140	0.3750	0.96	2 054	2 427	±20	15
8.1	0.13	113	153	1.40	46	0.1652	1.60	10.840	0.4760	0.94	2 508	2 510	±26	0
9.1	0.56	346	513	1.53	106	0.1611	1.30	7.870	0.3540	0.95	1 954	2 469	±22	21
10.1	0.38	56	48	0.88	24	0.1659	1.70	11.520	0.5030	0.93	2 628	2 517	±28	-4

续表 1

黑云变粒岩(LNI333)																	
数据点	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/ U	$^{206}\text{Pb}^*$ (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	误差相 关系数	^{238}U 年龄(Ma)	$^{206}\text{Pb}/$ ^{206}Pb 年龄(Ma)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	
1.1	0.02	200	152	0.78	82	0.1659	0.55	10.890	1.2	0.4759	1.1	0.89	2 510	± 22	2 517	± 9	0
2.1	0.17	214	142	0.68	81	0.1653	0.38	10.030	1.1	0.4400	1.0	0.94	2 351	± 21	2 511	± 6	6
3.1	0.06	268	225	0.87	97	0.1639	0.33	9.460	1.2	0.4187	1.2	0.96	2 255	± 22	2 496	± 6	10
4.1	0.05	257	121	0.49	101	0.1686	0.31	10.670	1.2	0.4588	1.1	0.96	2 434	± 23	2 544	± 5	4
6.1	0.10	173	98	0.59	72	0.1667	0.42	11.200	1.2	0.4872	1.1	0.93	2 559	± 23	2 525	± 7	-1
7.1	0.09	168	64	0.40	71	0.1678	0.40	11.400	1.2	0.4929	1.1	0.94	2 583	± 23	2 536	± 7	-2
8.1	0.08	170	76	0.46	71	0.1675	0.42	11.240	1.2	0.4869	1.1	0.93	2 557	± 23	2 533	± 7	-1
5.1	0.07	257	286	1.15	99	0.1660	0.32	10.280	1.1	0.4491	1.1	0.96	2 391	± 21	2 518	± 5	5
9.1	0.07	125	55	0.46	52	0.1673	0.46	11.060	1.2	0.4794	1.1	0.93	2 525	± 24	2 531	± 8	0
10.1	0.03	219	417	1.96	76	0.1663	0.36	9.290	1.2	0.4050	1.2	0.96	2 192	± 22	2 521	± 6	13
11.1	0.10	229	145	0.66	86	0.1638	0.37	9.890	1.1	0.4382	1.0	0.94	2 342	± 21	2 495	± 6	6
12.1	0.05	185	70	0.39	78	0.1680	0.38	11.340	1.1	0.4896	1.1	0.94	2 569	± 23	2 538	± 6	-1
斜长角闪岩(LNI331)																	
1.1	0.21	158	63	0.42	65	0.1648	0.45	10.800	1.3	0.4753	1.2	0.93	2 507	± 25	2 506	± 8	0
2.1	0.12	162	80	0.51	67	0.1638	0.40	10.930	1.2	0.4839	1.1	0.94	2 544	± 23	2 496	± 7	-2
3.1	0.03	207	53	0.26	85	0.1645	0.36	10.840	1.1	0.4780	1.1	0.95	2 519	± 22	2 502	± 6	-1
4.1	0.03	259	69	0.28	109	0.1656	0.30	11.170	1.1	0.4891	1.0	0.96	2 567	± 22	2 514	± 5	-2
5.1	0.09	591	250	0.44	156	0.1594	0.33	6.761	1.0	0.3076	1.0	0.95	1 729	± 15	2 449	± 6	29
6.1	0.04	322	159	0.51	133	0.1638	0.29	10.870	1.1	0.4813	1.0	0.96	2 533	± 21	2 496	± 5	-1
7.1	0.06	184	81	0.45	79	0.1648	0.37	11.300	1.1	0.4974	1.1	0.95	2 602	± 23	2 506	± 6	-4
8.1	0.09	126	50	0.41	51	0.1649	0.47	10.580	1.2	0.4654	1.1	0.92	2 463	± 23	2 506	± 8	2
9.1	0.05	164	139	0.88	71	0.1661	0.39	11.550	1.5	0.5045	1.4	0.96	2 633	± 31	2 518	± 7	-5
10.1	0.34	192	239	1.29	80	0.1650	0.55	10.930	1.3	0.4806	1.2	0.91	2 530	± 25	2 507	± 9	-1
11.1	0.16	135	43	0.33	56	0.1648	0.47	10.980	1.2	0.4830	1.1	0.92	2 540	± 23	2 506	± 8	-1
12.1	0.10	57	68	1.23	23	0.1644	0.79	10.400	1.5	0.4585	1.3	0.86	2 433	± 26	2 502	± 13	3

续表 1

黑云变粒岩(AI241)																	
数据点	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Th/ U	$^{206}\text{Pb}^*$ (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U	$\pm\%$	误差相 关系数	^{238}U 年龄(Ma)	$^{206}\text{Pb}/$ ^{206}Pb 年龄(Ma)	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	
1.1	0.20	901	692	0.79	221	0.244 4	0.71	9.390	3.3	0.284 5	3.2	0.98	1 614	± 46	3 149	± 11	49
2.1	0.06	822	530	0.67	113	0.207 7	0.44	4.360	3.2	0.159 3	3.2	0.99	953	± 28	2 888	± 7	67
3.1	0.21	823	510	0.64	164	0.207 4	1.20	6.600	3.4	0.230 8	3.2	0.94	1 339	± 38	2 886	± 19	54
4.1	0.94	866	663	0.79	192	0.238 9	0.51	8.380	3.2	0.254 3	3.2	0.99	1 461	± 42	3 114	± 8	53
5.1	0.16	682	476	0.72	208	0.274 5	0.33	13.390	3.2	0.354 0	3.2	0.99	1 952	± 54	3 332	± 5	41
6.1	0.87	697	477	0.71	167	0.236 6	1.60	9.010	3.6	0.276 0	3.2	0.89	1 571	± 45	3 098	± 25	49
7.1	0.34	674	456	0.70	182	0.260 6	0.36	11.200	3.2	0.311 8	3.2	0.99	1 750	± 49	3 251	± 6	46
8.1	0.03	938	614	0.68	248	0.262 4	0.35	11.110	3.2	0.307 0	3.2	0.99	1 726	± 48	3 261	± 6	47
9.1	0.13	864	546	0.65	146	0.210 3	0.44	5.690	3.2	0.196 4	3.2	0.99	1 156	± 34	2 908	± 7	60
10.1	0.53	811	397	0.51	165	0.218 9	0.63	7.100	3.2	0.235 3	3.2	0.98	1 362	± 39	2 973	± 10	54
11.1	3.71	1 156	947	0.85	174	0.185 4	1.60	4.270	3.5	0.166 5	3.2	0.91	993	± 30	2 709	± 24	63
12.1	0.18	915	702	0.79	258	0.254 8	0.45	11.490	3.2	0.327 0	3.2	0.99	1 824	± 50	3 215	± 7	43
黑云变粒岩(LNI332)																	
1.1	0.16	274	233	0.88	102	0.166 3	0.41	9.380	1.1	0.435 2	1.0	0.93	2 329	± 20	2 521	± 7	8
2.1	2.54	337	71	0.22	94	0.149 8	1.30	6.480	1.6	0.314 1	1.1	0.67	1 761	± 16	2 343	± 20	25
3.1	0.08	163	108	0.68	68	0.164 8	0.50	11.070	1.2	0.487 4	1.1	0.91	2 559	± 24	2 505	± 9	-2
4.1	0.17	173	109	0.65	71	0.166 2	0.44	10.880	1.2	0.474 7	1.1	0.93	2 504	± 22	2 520	± 7	1
5.1	10.70	321	321	1.03	95	0.158 0	10.00	6.440	10.0	0.296 8	1.5	0.15	1 676	± 22	2 428	± 170	31
6.1	0.17	83	48	0.60	34	0.165 7	0.68	10.930	1.4	0.478 4	1.2	0.88	2 520	± 26	2 514	± 11	0
7.1	0.17	193	113	0.61	81	0.167 3	0.43	11.290	1.2	0.489 6	1.1	0.93	2 569	± 23	2 531	± 7	-2
8.2	1.11	343	327	0.99	78	0.158 4	5.80	5.690	5.9	0.260 9	1.1	0.18	1 494	± 14	2 438	± 98	39
8.1	0.24	162	188	1.20	58	0.163 9	0.65	9.320	1.3	0.412 3	1.1	0.86	2 225	± 20	2 497	± 11	11
9.1	3.09	160	170	1.09	44	0.163 1	1.90	6.920	2.2	0.308 1	1.2	0.53	1 732	± 18	2 487	± 32	30
10.1	0.46	122	53	0.45	51	0.167 4	0.64	11.180	1.3	0.484 4	1.1	0.88	2 546	± 24	2 532	± 11	-1
11.1	0.09	155	132	0.88	64	0.166 3	0.44	11.090	1.2	0.483 7	1.1	0.93	2 543	± 23	2 521	± 7	-1

附表 2 鞍本地区表壳岩锆石年龄总结

Appendix table 2 Summary of zircon U-Pb ages for the Anshan Group supracrustal rocks in Anben

顺序号	样品编号	岩石名称	位置	外来或碎屑 锆石年龄 (Ma)	岩浆锆石年龄 (Ma)	变质锆石年龄 (Ma)	定年方法	经纬度	数据来源
1	A1114	二云石英片岩	弓长岭岭东矿区	3 069±12			SHRIMP	N41°05'49"/E123°32'6"	本文
2	A1217	黑云二长变粒岩	连山关北			2 469±13	SHRIMP	N41°00'11"/E123°44'51"	本文
3	A1225	角闪变粒岩	鸡冠山北	2 756	2 502±13		SHRIMP	N41°22'24"/E123°34'56"	本文
4	A1230	黑云变粒岩	鸡冠山西北		2 519±23		SHRIMP	N41°23'41"/E123°31'03"	本文
5	A1241	黑云变粒岩	歪头山西南	3 490±110		2 505±4	SHRIMP	N41°28'05"/E123°35'48"	本文
6	LN1331	斜长角闪岩	歪头山西南				SHRIMP	N41°28'04"/E123°35'57"	本文
7	LN1332	黑云变粒岩	歪头山西		2 521±7		SHRIMP	N41°29'51"/E123°32'22"	本文
8	LN1333	黑云变粒岩	灯塔市八家子东		2 531±6		SHRIMP	N41°26'36"/E123°33'58"	本文
9	A1437	白云片岩	鸡冠山	2 711, 2 539			SHRIMP	N41°18'11"/E123°35'22"	本文
10	A1502	黑云变粒岩	眼前山		2 538±17		SHRIMP	N41°04'23"/E123°08'07"	本文
11	A1504	黑云变粒岩	鸡冠山		2 528±9		SHRIMP	N41°18'07"/E123°35'16"	本文
12	A1505	变质酸性火山岩	鸡冠山		2 514±9		SHRIMP	N41°18'07"/E123°35'16"	本文
13	WTS1-15	斜长角闪岩(变质基性岩脉)	歪头山		2 523±12	2 481±19	L.A-ICP-MS	N41°18'07"/E123°35'16"	本文
14	CTG-7	片麻状绿泥石化黑云片麻岩(绿泥石英片岩)	陈台沟 (ZK26 钻孔的负 815m)	2 608~2 733	2 551±10	2 469±23	L.A-ICP-MS		代堰铭等, 2013
15	G02-8	斜长角闪片岩	弓长岭	2 554±12			SHRIMP		Han <i>et al.</i> , 2014
16	A0420	黑云变粒岩	弓长岭	2 705, 2 911	2 528±10		SHRIMP		万渝生等, 2012
17	ZK7921	黑云变粒岩	齐大山 (ZK7921 钻孔的负 207m)		2 533±53		同位素稀释法		王守伦和邢端华, 1995
18	WTS-11	斜长角闪岩	歪头山	2 611±5, 2 530±7			CAMECA		代堰铭等, 2012
19	15YK30-1	绿泥片岩(变质英安岩)	鸡冠山东南	2 756±11	2 574±13		L.A-ICP-MS		Guo <i>et al.</i> , 2017
20	15YK24-2	绿泥片岩(变质英安岩)	东鞍山	3 009, 2 609~2 612	2 560±7		L.A-ICP-MS		Guo <i>et al.</i> , 2017
21		石英片岩, 黑云变粒岩	齐大山	2 700~3 000	2 530~2 560	1 840~1 880	L.A-ICP-MS		Li <i>et al.</i> , 2016
22	DNF4-3	绿泥角闪片岩	南芬铁矿		2 552±18	2 482	L.A-ICP-MS		Zhu <i>et al.</i> , 2015