

内蒙古白乃庙岛弧发现古元古代变质基底 ——来自双胜地区斜长角闪岩年龄和地球化学的证据

钱程¹, 陆露^{2,3}, 汪岩¹, 郭荣荣⁴, 唐振¹
QIAN Cheng¹, LU Lu^{2,3}, WANG Yan¹, GUO Rongrong⁴, TANG Zhen¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
 2. 沈阳师范大学古生物学院, 辽宁 沈阳 110034;
 3. 自然资源部东北亚古生物演化重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;
 4. 东北大学地质系, 辽宁 沈阳 110819
1. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;
2. College of Paleontology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, Liaoning, China;
3. Key Laboratory of Evolution of Past Life in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, Liaoning, China;
4. Department of Geology, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

摘要:白乃庙岛弧位于兴蒙造山带南缘,是研究古亚洲洋早古生代地质的重要单元,其基底属性存在争议。在内蒙古东部阿鲁科尔沁旗附近开展地质调查过程中,在双胜地区发现了一套古元古代变质杂岩,为白乃庙岛弧基底属性研究提供了新素材。对该杂岩中的斜长角闪岩进行岩相学、年代学和地球化学研究。该斜长角闪岩原岩属于辉长岩类,至少经历了2期变质作用,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄研究表明变质年龄为 1924 ± 17 Ma 和 1814.2 ± 9.4 Ma。地球化学研究显示,该岩石原岩属拉斑玄武岩系列,具有富铁、镁、钙、钛,贫碱,高 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (2.05~3.12),中等 $\text{Mg}^\#$ 值 (41.09~51.71) 等特征,稀土和微量元素曲线特征与洋岛玄武岩相似,推测其来源于岩石圈地幔,形成于大洋板内背景。双胜地区变质杂岩可能记录了古元古代哥伦比亚超大陆聚合过程中的洋陆转化事件。结合区域资料,推测白乃庙岛弧具有统一的前寒武纪基底,与华北克拉通具有极好的构造亲缘性。

关键词:兴蒙造山带;古元古代;斜长角闪岩;双胜地区;白乃庙岛弧

中图分类号: P534.3; P588.12⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)06-0905-14

Qian C, Lu L, Wang Y, Guo R R, Tang Z. Age and geochemistry of amphibolite in Shuangsheng area, eastern Inner Mongolia: New evidence from the Paleoproterozoic basement of Bainaimiao island arc. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(6): 905-918

Abstract: Located on the south margin of the Xing'an-Mongolian orogenic belt, Bainaimiao arc is an important part for studying the early Paleozoic geology of the Paleo-Asian Ocean, but its basement property is still controversial. During the geological survey in Ar Horqin Banner, eastern Inner Mongolia, the authors discovered a set of Paleoproterozoic metamorphic complexes in Shuangsheng area, which provides new evidence for the study of the basement property of Bainaimiao arc. In this paper, amphibolite in the metamorphic complex was studied in the aspects of petrography, geochronology and geochemistry. The results show that the protolith of the amphibolite belongs to gabbroite, and had undergone at least two stages of metamorphism at 1924 ± 17 Ma 和 1814.2 ± 9.4 Ma

收稿日期: 2019-09-20; **修订日期:** 2020-02-19

资助项目: 中国地质调查局项目《松辽盆地西缘扎赉特-巴林左旗区域地质调查》(编号:DD20190039)、《大兴安岭成矿带突泉—翁牛特地区基础地质综合研究与片区总结》(编号:DD20160048-01)、《地质调查综合智能编图系统与应用》(编号:DD20190415)、《国家地质数据库建设与整合》(编号:DD20160351)、《国家地质大数据汇聚与管理》(编号:DD20190383)

作者简介: 钱程 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 构造地质学专业, 从事区域地质研究。E-mail: qch1985123@163.com

通讯简介: 陆露 (1985-), 女, 博士, 讲师, 构造地质学专业, 从事岩石和构造相关的教学和科研工作。E-mail: yangchunyulu@163.com

respectively. Geochemical features show that the protolith of the amphibolite belongs to tholeiitic series, characterized by relatively high Fe, Mg, Ca, Ti, and $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (2.05~3.12), medium $\text{Mg}^\#$ (41.09~51.71), and relatively low alkali, with curve characteristics of rare earth and trace elements similar to those of OIB, suggesting that the protolith originated from lithosphere mantle and was formed in ocean intraplate. The metamorphic complex from Shuangsheng area may have recorded the event of ocean-continent transformation during the assembly of the Columbia supercontinent in the Paleoproterozoic. Combined with regional data, it is concluded that Bainaimiao arc had a uniform Precambrian basement, which had tectonic affinity to the North China Craton definitely.

Key words: Xing'an-Mongolian orogenic belt; Paleoproterozoic; amphibolite; Shuangsheng area; Bainaimiao arc

中亚造山带夹持于西伯利亚、东欧、塔里木、华北克拉通之间,是新元古代—早中生代持续活动的增生型造山带,同时也是世界上显生宙地壳生长最显著的地区(图1-a)^[1-10]。中亚造山带的形成与古亚洲洋的俯冲-消减-闭合密切相关,主体由岛弧、蛇绿岩、洋岛-海山、洋底高原、增生杂岩,以及其中的微陆块等构造单元构成,与西南太平洋中生代增生造山带相似^[5, 8, 11-12]。兴蒙造山带属中亚造山带东段,记录了古亚洲洋消亡过程中西伯利亚板块南缘与华北板块北缘的增生-碰撞历史(图1-b)^[5, 13-15],中新生代受蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造域叠加作用。

白乃庙岛弧位于兴蒙造山带南缘,西起包尔汉图—白云鄂博,经达茂旗、白乃庙、图林凯、翁牛特旗,东至吉林省南部的四平、伊通、桦甸地区,延伸约1300 km^[16],南北分别以白云鄂博—赤峰—开原断裂带和温都尔庙—柯丹山—西拉木伦蛇绿岩混杂岩带为界与华北克拉通和索伦—林西缝合带相接。白云鄂博北、白乃庙、四平—桦甸等地区浅变质火山—沉积岩系及侵入体研究显示,白乃庙岛弧形成于早古生代古亚洲洋的向南俯冲^[16-26]。但该弧的构造属性、前寒武纪基底性质等仍存争议:①该弧来源于冈瓦纳大陆东部陆缘,古生代具有印度群岛式古构造格局^[9];②该弧与华北克拉通具构造亲缘性^[17, 22-24, 27],叠加于华北克拉通基底之上,属大陆边缘弧,早志留世之前在其南侧发育弧后盆地并延续到晚志留世,该陆缘弧与北侧的温都尔庙俯冲增生杂岩之间存在早古生代大洋(温都尔庙洋)^[22-23];③该弧前寒武纪基底与华北克拉通差异较大,为外来地体,其与华北板块之间存在大洋(南白乃庙洋),二者拼合于晚志留世—早泥盆世^[21, 25],其前寒武纪基底性质或与扬子或塔里木克拉通相似^[16],或与冈瓦纳大陆东北相似^[26]。

20世纪90年代以来,学者们对达茂旗—白乃庙等地区变质火山—沉积岩系及侵入岩的年代格

架、岩石成因、构造背景进行了研究,揭示了白乃庙岛弧西段早古生代岩浆-变质作用时空构架,证实该区存在前寒武纪基底^[13, 16-25, 28-34]。也有学者在四平—桦甸等地区发现了一系列早古生代岛弧岩浆岩及前寒武纪地质记录^[16, 26]。在赤峰市东北—翁牛特旗地区(白乃庙岛弧中段)也发育弧岩浆活动及前寒武纪基底,主要以八当山火山岩和寒武纪—奥陶纪花岗岩为特征,近年来有学者在其中解体出新太古代花岗岩、古元古代斜长角闪岩、早泥盆世和早二叠世火山岩、晚志留世—早石炭世、中三叠世花岗岩等^[27, 35-41]。笔者在内蒙古东部阿鲁科尔沁旗附近开展地质调查过程中,在双胜地区发现一套古元古代变质杂岩,本文对其中的斜长角闪岩进行岩相学、年代学和地球化学分析,研究其年代格架与岩石成因等,并结合区域资料探讨白乃庙岛弧的基底属性,为兴蒙造山带构造格局划分提供新材料。

1 区域地质背景

研究区位于白乃庙岛弧中段北缘的赤峰东北部地区,北以西拉木伦蛇绿混杂岩带为界毗邻索伦—林西缝合带,行政区属内蒙古赤峰市东北阿鲁科尔沁旗双胜镇。大地构造上,研究区及周边由南向北可划分为华北克拉通、白乃庙岛弧和索伦—林西缝合带(图1-b)。

华北板块是中国最大、最老的构造单元,其演化历史长达3.8 Ga^[42],太古代大体经历了大于3.0 Ga的陆核与微陆块形成阶段、2.9~2.7 Ga地壳增生阶段、2.5 Ga岩浆-变质作用与克拉通化阶段^[43]。其东部和西部地块于古元古代早期(2.3~1.9 Ga)开始相互作用,并于古元古代中晚期(1.9~1.8 Ga)沿中部造山带发生最后拼合^[44-45]。古元古代末—早古生代在华北克拉通周缘发育被动大陆边缘沉积,期间古元古代晚期(1.78~1.60 Ga)(古、中元古代时间界限引用2018年国际地层年代表^[46],为1600

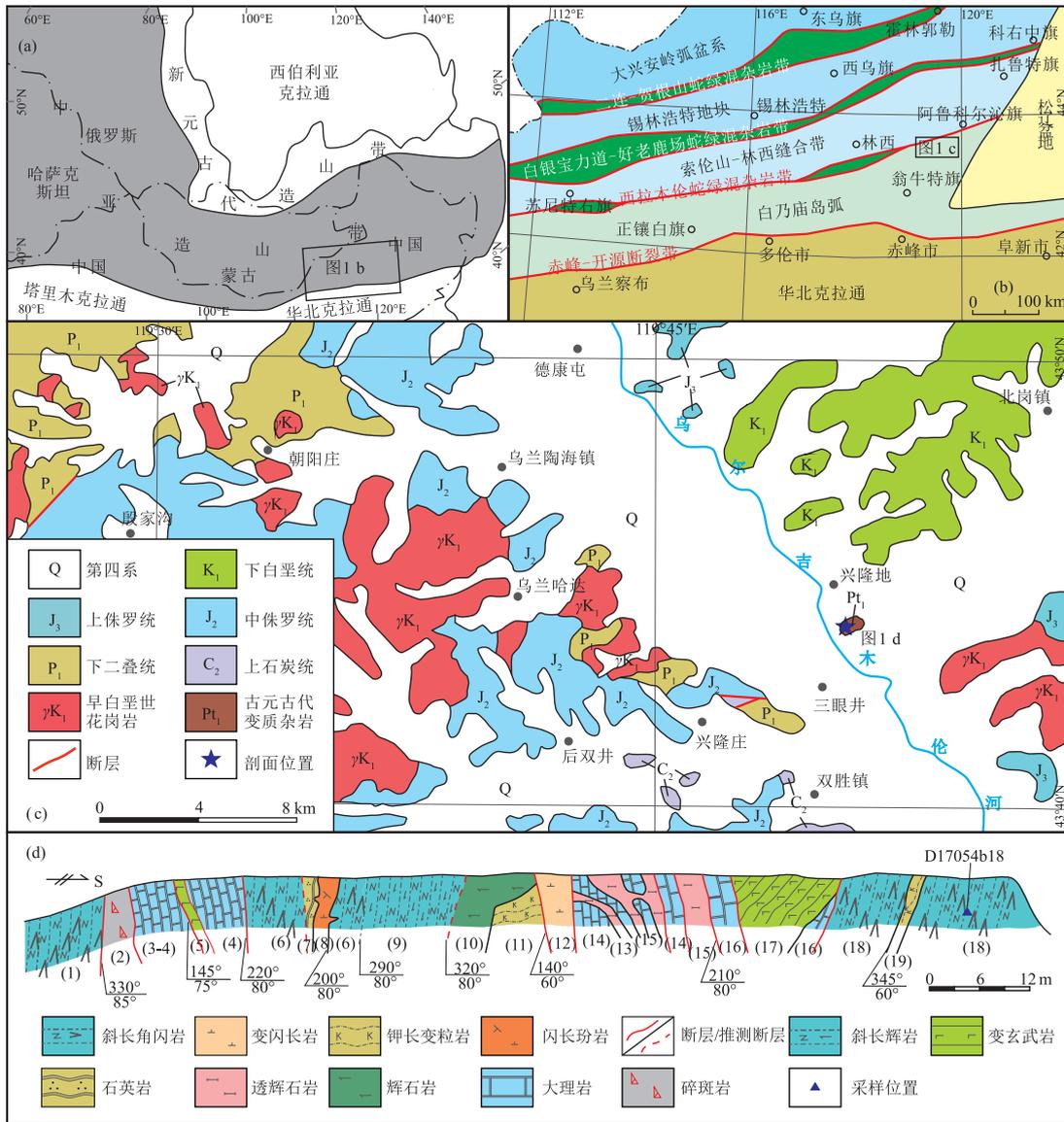


图 1 研究区地质简图及采样位置剖面

Fig. 1 Geological sketch map of the study area and profile of sampling sites

a—中亚地区构造简图(据参考文献[9]修改); b—兴蒙造山带东部构造简图(据参考文献[14]修改);
 c—双胜地区地质简图; d—采样位置剖面图; (1)—斜长角闪岩; (2)—透辉石碎斑岩; (3)—变粉晶灰岩; (4)—含透辉石硅灰石大理岩;
 (5)—变玄武岩; (6)—斜长角闪岩; (7)—长石石英岩; (8)—闪长玢岩; (9)—斜长辉岩; (10)—辉石岩; (11)—透辉钾长变粒岩;
 (12)—变微晶闪长岩; (13)—含阳起黑云母绿泥石透辉石岩; (14)—含镁橄榄石白云石大理岩; (15)—黝帘石透辉石岩;
 (16)—含石榴石蛇纹石大理岩; (17)—变玄武岩(阳起片岩); (18)斜长角闪岩; (19)—黑云钾长变粒岩

Ma,后文同)、中元古代(1.40~1.21 Ga)、新元古代早期(0.92~0.80 Ga)发生裂谷岩浆事件^[47-54]。晚古生代以来,克拉通周边相继活化,北部受古亚洲洋和蒙古-鄂霍茨克洋影响发育晚古生代-三叠纪岩浆岩带,南部与扬子克拉通碰撞形成三叠纪岩浆岩带,东部受太平洋俯冲影响发育中生代岩浆岩

带^[55],在板块内部伴有中生代岩石圈减薄和去克拉通化岩浆作用^[44]。

白乃庙岛弧在其西段的温都尔庙-达茂旗-白乃庙地区出露较好,主要包括白乃庙群、白音都西群、温都尔庙群等变质地质体及其上覆的上志留统徐尼乌苏组和西别河组。白乃庙群和白音都西群

是岛弧的主体,前者主要由浅变质的中基性火山岩及变质砂岩和千枚岩组成,后者主要由砂岩和泥质岩石变质形成的长英质变质岩组成,前人在二者中获得了中元古代 Sm-Nd 等时线年龄和早古生代 K-Ar 年龄^[28-29],近年的年代学研究显示二者的原岩成岩形成于早古生代(0.52~0.40 Ga)^[16-20, 24-25, 32, 34]。温都尔庙群分布在岛弧北侧,主体由枕状玄武岩、绿片岩、蓝片岩、变安山岩、石英岩、石英片岩等组成,有学者将其厘定为中奥陶世—早志留世俯冲增生杂岩^[5, 9]。岛弧还发育寒武纪—志留纪闪长质—花岗质侵入岩^[16, 20, 22-23, 32-34]。

索伦—林西缝合带位于白乃庙岛弧北侧,西起中蒙边境的索伦山,经苏尼特右旗、克什克腾旗、林西县,东接长春—延吉缝合带,整体呈近东西向延伸,被大量学者认定为古亚洲洋晚古生代—早中生代最终闭合的位置^[5, 7-8, 14, 56-57]。西部的索伦山—苏尼特右旗—克什克腾旗地区发育大石寨组、寿山沟组和哲斯组,并伴有二叠纪枕状玄武岩、镁铁质—超镁铁质岩、前弧沉积、深海放射虫硅质岩、增生杂岩,以及三叠纪同碰撞花岗岩等^[58-63]。东部的林西地区被二叠纪末—早三叠世林西组—老龙头组陆相盆地沉积覆盖,在天山镇—扎鲁特旗地区零星出露二叠纪高镁安山岩和埃达克质花岗岩。

赤峰市东北—翁牛特旗地区以古元古代红旗营子岩群斜长角闪岩系、明安山岩群大理岩夹片岩系及解放营子新太古代石英闪长岩为基底^[27, 38],上覆上寒武统锦山组、奥陶纪—早志留世碳酸盐岩夹绢云石英片岩,以及中志留统晒乌苏组等海相建造。早古生代末—三叠纪受白乃庙岛弧和华北板块拼合、古亚洲洋持续南向俯冲及最终闭合影响,相继发育晚志

留世—早泥盆世后碰撞岩浆活动^[36-37, 39]、泥盆纪—二叠纪岛弧岩浆活动^[40-41]和三叠纪后碰撞—后造山花岗岩^[35, 40]。研究区出露的地层主要为中生代火山—沉积地层,零星出露晚古生代地层和古元古代变质杂岩,晚古生代地层主要包括上石炭统阿木山组生物碎屑灰岩和下二叠统额里图组安山质火山碎屑岩,区内还发育早白垩世花岗岩(图 1-c)。

2 岩石学特征

本文所研究的变质杂岩发育于双胜镇北侧的平安地,周边被第四系覆盖(图 1-c),主体由斜长角闪岩、斜长辉岩、辉石岩、变玄武岩、大理岩、长石英岩、钾长变粒岩等组成,地质体之间多为断层接触,并被晚期的闪长玢岩脉穿插(图 1-d)。本次重点对斜长角闪岩开展岩相学、年代学和地球化学分析。斜长角闪岩(D7054b18)呈深灰色,片麻状构造(图 2-a),粒状柱状变晶结构,由角闪石(65%)、斜长石(20%)、黑云母(5%)、碳酸盐矿物(5%)及金属矿物(5%)组成。角闪石为浅绿色,长柱状、粒状,略呈定向排列,重结晶形成小粒的角闪石,粒径为 0.05~1.2 mm;斜长石为粒状,边缘呈齿状,属重结晶现象,表面土化明显,粒径为 0.3~1.6 mm;黑云母为黄褐色,不规则片状,以集合体形式呈条带状分布;碳酸盐矿物呈粒状,粒径为 0.2~1.0 mm;金属矿物呈不透明粒状,被碳酸盐包围,粒径为 0.03~0.5 mm(图 2-c)。角闪石和斜长石呈现变晶结构,显示岩石经历了角闪岩相变质作用。结合野外斜长角闪岩、斜长辉岩、辉石岩的共生特征,认为辉石岩可能代表了斜长角闪岩、斜长辉岩的原岩残留体,推测斜长角闪岩原岩为辉长岩类岩石。

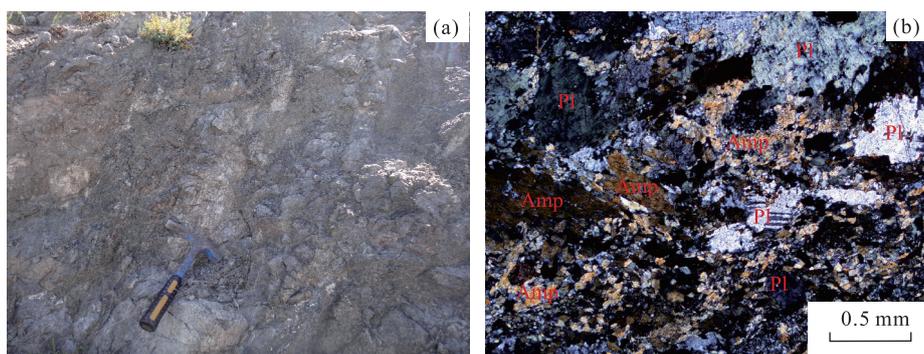


图 2 双胜地区斜长角闪岩岩貌(a)及显微特征(b)

Fig. 2 The outcrop(a) and microscopic characteristics(b) of the amphibolite from Shuangsheng area

Amp—角闪岩;Pl—斜长石

3 锆石 U-Pb 测年

3.1 分析方法

样品的锆石挑选、制靶、照相由河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院地质所深地动力学实验室完成。对待测样品的锆石与标样环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,然后对其进行反射光、透射光和阴极发光(CL)图像的采集,以确定锆石的内部结构和成因。锆石 U-Pb 定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm。激光剥蚀斑束直径为 30 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度为 2.5 J/cm^2 , 以氦为载气。结合锆石反射光、透射光照片,避开锆石内部裂隙和包裹体。实验标样为 91500, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄加权平均值误差为 1σ 。样品锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果见表 1。

3.2 锆石 U-Pb 年龄测试结果

样品 D7054b18 的锆石主体为半透明浅褐色,晶体多为浑圆状,粒度为 100~120 μm ,长宽比约为 2:1。锆石的结构构造呈现 3 种特征:①具核边构造,占测试锆石的大多数,内部结构不发育,颜色较深, Th/U 值为 0.17~0.41, 边部发育较薄的白色变质边,呈现变质成因锆石特征;②具核幔边构造,核部呈板状,较大,幔部绕核发育,宽 15~40 μm ,核、幔内部结构均不发育,呈浅灰色-灰色,边部发育较

薄的白色变质边(如测点 2、19、25、28 所在锆石),核、幔的 Th/U 值为 0.16~0.51,呈现变质成因锆石特征;③具核边或核幔构造,内部具有较大的继承核,呈灰白色-浅灰色,多为短柱状,阴极发光图像显示其发育明显的同心状、韵律环带(如测点 13、14、22、23、29 所在锆石),为岩浆锆石结构特征,受变质热液影响, Th/U 值变化较大,为 0.09~0.83,外侧普遍包裹宽 5~40 μm 厚度不等的暗色变质环带, Th/U 值为 0.16~0.29,二者之间隐约可见灰白色变质细边(图 3)。值得注意的是,点 5、28 所在锆石核部具冷杉状斑纹,暗示岩石变质达到中级变质及以上。

本次选择 23 颗不同特征的锆石进行测试分析,测点共 30 个,均为古元古代年龄。其中点 2 和 23 误差较大、不予考虑,其他 28 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄介于 1746.6 \pm 14.7~2477.8 \pm 13.1 Ma 之间(图 4-a)。依据测点所在锆石结构特征、Th/U 值及测年结果,可将测试结果分为 3 类:①点 17 数据较大, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 2477.8 \pm 13.1 Ma, Th/U 值为 0.83;②点 13、14、22 所在区域(锆石核部)具岩浆成因锆石特征,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄较接近,为 1987.0 \pm 10.8~2044.1 \pm 17.0 Ma, Th/U 值较大(0.27~0.64),暗示 1987~2044 Ma 可能存在一次岩浆事件;③变质年龄,共 24 个数据,点 18 数据较小(1746.6 \pm 14.7 Ma),其他 23 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 1775.9 \pm 11.6~1931.8 \pm 17 Ma(图 4-b), Th/U 值较大(0.12~0.47),可进一步划分为 2 个区间,分别为 1775.9 \pm 11.6~1838.9 \pm 13.1 Ma(年龄加权平

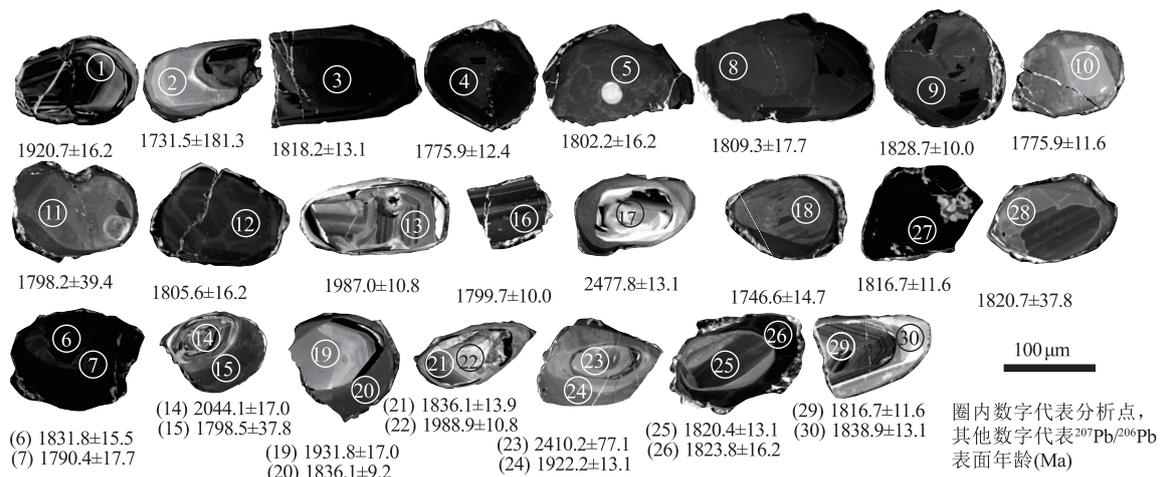


图 3 双胜地区斜长角闪岩锆石阴极发光(CL)图像及 U-Pb 年龄

Fig. 3 CL images and U-Pb data of zircons of the amphibolite from Shuangsheng area

均为 1814.2 ± 9.4 Ma, $MSWD = 2.2$, $n = 20$) 和 $1920.7 \pm 16.2 \sim 1931.8 \pm 17$ Ma (年龄加权平均值为 1924 ± 17 Ma, $MSWD = 0.14$, $n = 3$) (图 4-c), 可代表 2 期变质事件。

4 岩石地球化学特征

4.1 分析方法

本次对配套的 5 件样品进行了主量、稀土及

微量元素测试, 测试结果见表 2。主量、稀土及微量元素分析在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成, 整个过程均在无污染设备中进行, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法 (XRF), 其中 FeO 分析采用重铬酸钾容量法, 分析精度优于 1%~5%; 稀土和微量元素采用电感耦合等离子质谱仪法 (ICP-MS) 完成, 分析精度和准确度优于 5%~10%。

表 1 双胜地区斜长角闪岩 (D7054b18) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 年龄测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb data of zircons of the amphibolite (D7054b18) from Shuangsheng area

点号	同位素比值及误差						同位素年龄及误差/Ma						含量/ 10^{-6}			Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	Th	U	Pb	
1	0.1176	0.0010	0.3399	0.0081	5.5144	0.1387	1920.7	16.2	1886.0	39.4	1902.8	22.6	89.0	578.0	509	0.15
2	0.1060	0.0009	0.3166	0.0088	4.6263	0.1251	1731.5	181.3	1773.2	43.5	1754.0	23.3	72.4	142.7	294	0.51
3	0.1111	0.0010	0.3132	0.0039	4.8008	0.0700	1818.2	13.1	1756.3	19.7	1785.0	13.7	245.8	791.0	1074	0.31
4	0.1085	0.0008	0.3149	0.0061	4.7144	0.0953	1775.9	12.4	1765.0	30.4	1769.8	18.0	123.9	626.6	584	0.20
5	0.1102	0.0009	0.3161	0.0074	4.8018	0.1053	1802.2	16.2	1770.8	36.8	1785.2	19.4	101.1	572.1	492	0.18
6	0.1120	0.0010	0.3157	0.0082	4.8746	0.1134	1831.8	15.5	1768.5	40.3	1797.9	20.5	169.4	870.0	809	0.19
7	0.1095	0.0011	0.2947	0.0077	4.4474	0.0961	1790.4	17.7	1664.9	38.5	1721.2	18.8	245.3	1190.2	1091	0.21
8	0.1106	0.0008	0.3149	0.0065	4.8017	0.0953	1809.3	17.7	1765.0	32.2	1785.2	17.7	117.7	659.6	574	0.18
9	0.1118	0.0009	0.3153	0.0067	4.8614	0.0931	1828.7	10.0	1766.9	33.2	1795.6	17.2	158.3	842.8	768	0.19
10	0.1085	0.0008	0.3161	0.0047	4.7303	0.0702	1775.9	11.6	1770.8	23.4	1772.6	13.8	102.4	250.2	433	0.41
11	0.1099	0.0007	0.3129	0.0049	4.7428	0.0738	1798.2	39.4	1755.0	24.3	1774.8	14.4	83.8	480.2	399	0.17
12	0.1104	0.0008	0.3147	0.0058	4.7882	0.0818	1805.6	16.2	1763.6	28.9	1782.8	15.6	120.3	683.9	583	0.18
13	0.1220	0.0008	0.3638	0.0060	6.1220	0.1100	1987.0	10.8	2000.1	29.0	1993.4	17.1	181.3	584.6	919	0.31
14	0.1261	0.0012	0.3703	0.0087	6.4369	0.1376	2044.1	17.0	2030.9	41.4	2037.3	20.0	366.4	574.0	1719	0.64
15	0.1099	0.0007	0.3157	0.0055	4.7869	0.0828	1798.5	37.8	1768.7	27.2	1782.6	15.7	111.1	664.8	543	0.17
16	0.1100	0.0007	0.3136	0.0056	4.7592	0.0833	1799.7	10.0	1758.6	28.0	1777.7	15.9	196.7	835.3	888	0.24
17	0.1611	0.0014	0.4705	0.0123	10.4547	0.3244	2477.8	13.1	2485.7	54.6	2475.9	30.0	339.7	407.6	1953	0.83
18	0.1069	0.0006	0.3151	0.0041	4.6439	0.0639	1746.6	14.7	1765.9	20.4	1757.2	13.0	73.3	461.0	356	0.16
19	0.1184	0.0011	0.3531	0.0051	5.7639	0.0759	1931.8	17.0	1949.4	24.8	1941.0	13.2	93.2	196.8	427	0.47
20	0.1122	0.0007	0.3149	0.0094	4.8732	0.1409	1836.1	9.2	1764.7	46.3	1797.6	25.1	119.3	767.2	594	0.16
21	0.1122	0.0008	0.3447	0.0090	5.3370	0.1525	1836.1	13.9	1909.4	43.4	1874.8	25.3	60.1	210.9	287	0.29
22	0.1215	0.0008	0.3646	0.0063	6.1091	0.1107	1988.9	10.8	2004.0	30.2	1991.6	17.2	124.1	458.7	632	0.27
23	0.1558	0.0070	0.4473	0.0383	9.7217	1.2569	2410.2	77.1	2383.3	170.7	2408.8	119.3	68.2	764.4	660	0.09
24	0.1170	0.0011	0.3451	0.0058	5.5689	0.0915	1922.2	13.1	1911.2	28.3	1911.3	15.6	73.5	416.2	404	0.18
25	0.1112	0.0008	0.3145	0.0054	4.8222	0.0701	1820.4	13.1	1762.9	26.7	1788.8	13.6	286.2	826.5	1227	0.35
26	0.1115	0.0008	0.3147	0.0075	4.8372	0.1044	1823.8	16.2	1763.7	37.2	1791.4	19.2	262.5	1074.6	1194	0.24
27	0.1110	0.0008	0.2725	0.0074	4.1705	0.1232	1816.7	11.6	1553.5	37.9	1668.2	24.9	342.6	1913.4	1504	0.18
28	0.1113	0.0008	0.3138	0.0062	4.8170	0.0924	1820.7	37.8	1759.6	30.5	1787.9	17.2	105.5	574.5	508	0.18
29	0.1110	0.0008	0.3289	0.0065	5.0328	0.0991	1816.7	11.6	1833.1	31.9	1824.8	17.8	58.4	504.6	332	0.12
30	0.1123	0.0010	0.3395	0.0055	5.2577	0.0807	1838.9	13.1	1884.2	26.7	1862.0	14.5	70.3	449.0	393	0.16

表 2 双胜地区斜长角闪岩主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions of the amphibolite from Shuangsheng area

样号	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5	样号	GS1	GS2	GS3	GS4	GS5
SiO ₂	49.04	47.71	44.55	46.54	46.69	Ho	0.84	0.92	0.84	1.49	1.11
Al ₂ O ₃	12.67	12.56	12.36	13.11	12.64	Er	2.35	2.64	2.39	3.99	3.29
Fe ₂ O ₃	2.69	2.81	3.80	3.99	3.23	Tm	0.32	0.35	0.31	0.58	0.43
FeO	10.15	10.74	13.12	11.23	10.56	Yb	2.01	2.19	2.00	3.49	2.76
CaO	10.94	11.54	12.06	12.00	12.12	Lu	0.30	0.32	0.29	0.48	0.41
MgO	7.55	7.59	6.76	5.80	7.35	ΣREE	109.48	104.89	94.49	144.13	131.18
K ₂ O	0.60	0.60	0.36	0.40	0.72	LREE	94.21	88.65	79.06	119.38	110.99
Na ₂ O	1.88	1.73	0.86	1.17	1.49	HREE	15.27	16.25	15.43	24.76	20.20
TiO ₂	1.76	2.09	2.97	3.24	2.24	L/H	6.17	5.46	5.12	4.82	5.50
P ₂ O ₅	0.21	0.25	0.31	0.39	0.25	La _N /Yb _N	6.44	5.41	4.70	4.29	5.39
MnO	0.26	0.28	0.35	0.33	0.28	δCe	0.99	1.01	1.05	1.01	1.02
烧失量	2.06	1.88	2.07	1.77	2.14	δEu	0.98	0.87	0.90	0.88	0.97
总计	99.81	99.77	99.58	99.95	99.71	Li	4.36	2.74	3.35	4.13	3.44
TFeO	12.57	13.27	16.54	14.82	13.46	Be	1.48	1.35	1.01	1.38	1.44
Mg [#]	51.71	50.49	42.15	41.09	49.32	Sc	36.15	32.48	27.71	37.66	40.21
Na ₂ O/K ₂ O	3.12	2.89	2.39	2.90	2.05	V	248.27	275.40	372.31	311.58	288.02
Na ₂ O+K ₂ O	2.48	2.33	1.22	1.57	2.21	Cr	488.11	550.51	243.68	133.37	546.92
m/f	0.92	0.97	1.36	1.42	1.02	Co	68.62	59.66	43.91	49.62	65.10
σ	0.90	0.99	0.58	0.58	1.06	Ni	355.95	286.12	82.93	130.50	316.97
Y	21.52	23.02	21.74	36.87	29.06	Ga	17.95	17.46	20.36	18.50	18.68
La	18.07	16.49	13.13	20.86	20.71	Rb	13.34	9.27	5.29	5.79	12.05
Ce	39.65	37.62	32.83	49.34	47.06	Sr	328.00	324.93	318.14	445.66	394.24
Pr	5.24	4.95	4.48	6.84	6.05	Zr	165.24	163.46	212.27	250.26	167.99
Nd	24.70	23.20	22.32	32.92	29.05	Nb	20.36	23.26	23.42	26.70	22.59
Sm	5.01	5.02	4.90	7.39	6.22	Ba	428.97	347.11	348.55	307.87	576.10
Eu	1.53	1.37	1.39	2.02	1.90	Hf	1.51	1.56	1.26	1.71	2.16
Gd	4.38	4.41	4.38	6.38	5.49	Ta	1.37	0.60	0.66	0.84	0.57
Tb	0.77	0.83	0.79	1.28	1.01	Th	1.09	0.87	0.43	0.85	1.14
Dy	4.31	4.59	4.43	7.07	5.71	U	0.50	0.46	0.13	0.26	0.56

注: TFeO = FeO + 0.8998 * Fe₂O₃; Mg[#] = 100 * (MgO) / (TMgO + FeO) (mol); m/f = (TFeO/72) / (MgO/40); 组合指数 (σ) = (Na₂O + K₂O)² / (SiO₂ - 43); L/H 为 LREE/HREE 值; 主量元素单位含量为%, 微量和稀土元素单位含量为 10⁻⁶

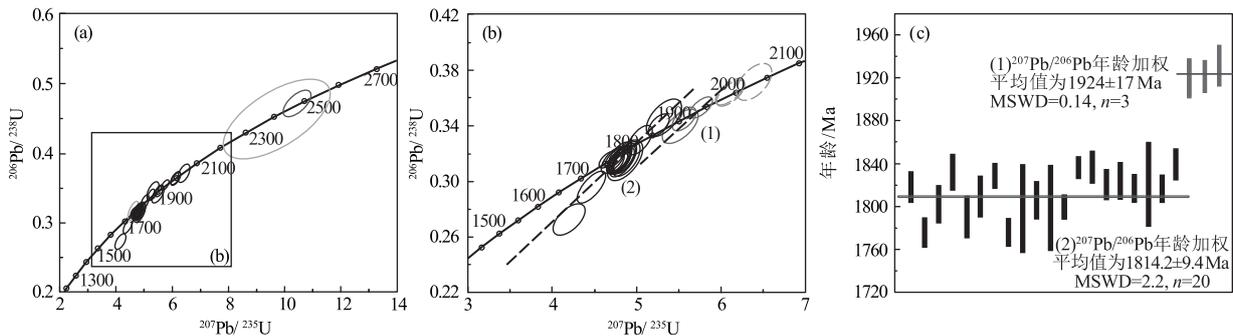


图 4 双胜地区斜长角闪岩 U-Pb 年龄谱和图 (a, b) 和 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄柱状图 (c)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, b) and ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb weighted average histograms (c) of the amphibolite from Shuangsheng area

4.2 主量元素特征

本套斜长角闪岩经历了角闪岩相变质作用,其烧失量(LOI)较小(1.77%~2.14%),具可靠性和代表性。本套岩石主量元素含量及特征较一致,均具有低 SiO₂(44.55%~49.04%),中 Al₂O₃(12.36%~13.11%),高 TFeO、CaO 和 MgO 含量(分别为 12.57%~16.54%、10.94%~12.12%、5.80%~7.59%),富钛(TiO₂为 0.63%~0.66%),贫碱(Na₂O、K₂O 分别为 0.36%~0.72%、0.86~1.88%,Na₂O+K₂O 为 1.22%~2.48%),中等 Mg[#]和 m/f 值(分别为 41.09~51.71 和 0.92~1.41),具体见表 2。Na₂O/K₂O 值为 2.05~3.12,在 SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(图 5-a)中,样品点落入辉长岩区,σ 为 0.58~1.06,属亚碱性系列,在 TFeO/SiO₂-MgO 图解(图 5-b)中,样品点落入拉斑系列。结合岩相学分析,本套斜长角闪岩原岩应为拉斑系列辉长岩类岩石。

4.3 稀土和微量元素特征

样品的变质程度达角闪岩相,可能会对一些较活泼元素(如 Cs、Rb、Ba、Li 等)产生影响,因此在相关分析和讨论过程中避免使用这些元素,主要讨论受变质作用影响较小的稀土元素、高场强元素等。本套岩石的稀土元素总量较低(ΣREE=94.49×10⁻⁶~144.13×10⁻⁶),轻稀土元素相对富集(LREE=79.06×10⁻⁶~119.38×10⁻⁶),重稀土元素相对亏损(HREE=15.27×10⁻⁶~24.74×10⁻⁶),轻、重稀土元素分馏较强(LREE/HREE=4.82~6.17、La_N/Yb_N=4.29~6.44),Ce 异常不明显, Eu 呈弱负异常(0.87~0.98),稀土元素曲线呈右倾型,相似于 OIB(洋岛玄武岩)配分曲线(图 6-a)。样品微量元素相对原始地幔整体富集, Hf 亏损明显, Th、U、K、P 相对亏损, Nb、Ti 相对富集, Ta 略具变化,整体曲线形态与 OIB 相似(图 6-b)。

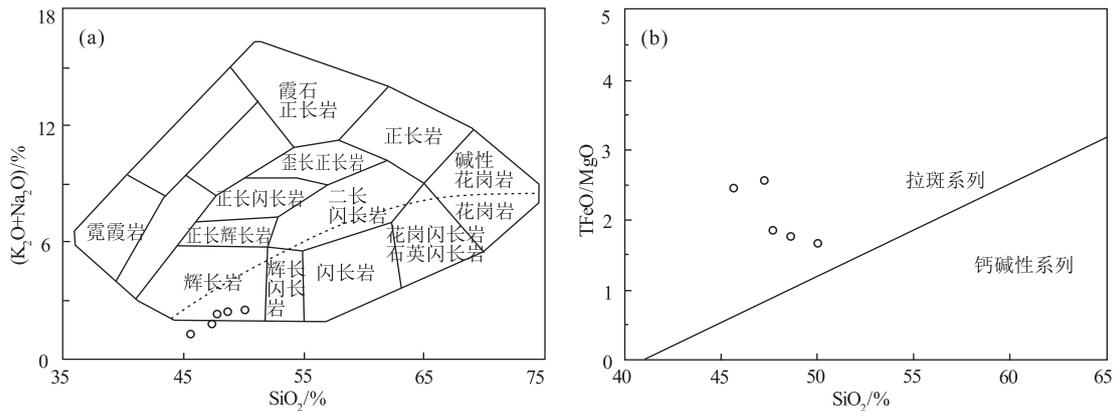


图 5 双胜地区斜长角闪岩岩石分类(a)及岩石系列图解(b)

Fig. 5 Classification(a) and serial diagrams(b) of the amphibolite from Shuangsheng area

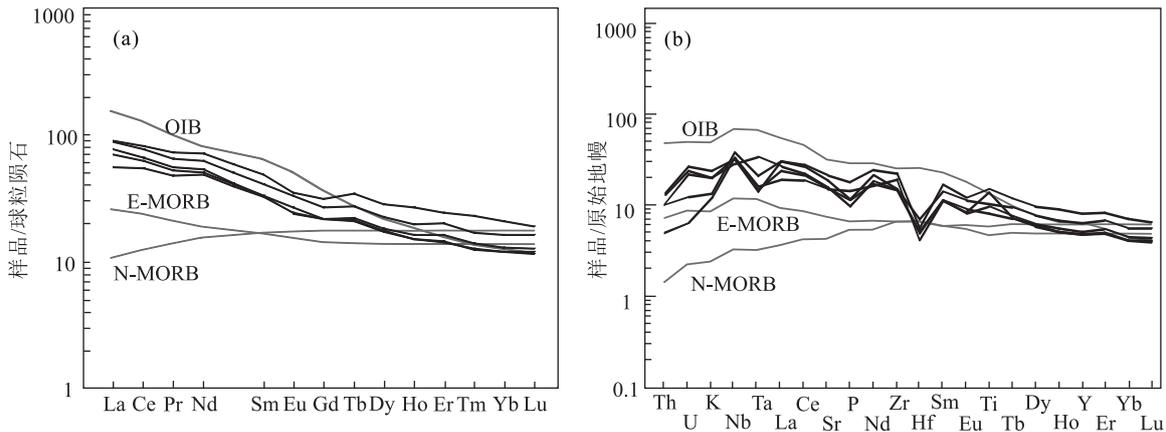


图 6 双胜地区斜长角闪岩稀土元素模式图(a)及微量元素蛛网图(b)(OIB、N-MORB、E-MORB 数据及标准化值据参考文献[64])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle normalized trace element spider diagram(b) of the amphibolite from Shuangsheng area

OIB—洋岛玄武岩地幔;N-MORB—正常大洋中脊地幔;E-MORB—富集地幔

5 讨 论

5.1 年代格架

目前在赤峰市东北热水地区和翁牛特旗解放营子地区报道有 2550~2500 Ma 和 1860 Ma 的岩石记录^[27,38],本次在阿鲁科尔沁旗双胜地区发现了古元古代斜长角闪岩。该岩石锆石 U-Pb 定年数据提供了 3 个信息:①岩浆事件年龄,共 3 个点,测点位于锆石核部,晶形较好,岩浆振荡环带发育,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄为 1987.0~2044.1 Ma, Th/U 值较大(0.27~0.64),可能代表了一次区域性构造岩浆事件;②第一期变质年龄,测点所在锆石强烈暗化或呈板状且环带不发育,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄加权平均值为 1924±17 Ma (MSWD=0.14, n=3),代表了一期变质年龄;③第二期变质年龄,测点所在锆石呈板状且内部结构不发育,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄加权平均为 1814.2±9.4 Ma (MSWD=2.2, n=20),代表了样品的另一期变质年龄。点 14 和 15、点 21 和点 22 两对测点分别位于锆石的继承岩浆成因核和变质幔上,测年结果体现了岩浆结晶和第二期变质事件,点 19 和 20 分别位于锆石的早期变质核和晚期变质幔上,测年结果体现了 2 期变质事件(图 3)。2019 年开展的内蒙古 1:5 万白音敖包等 3 幅区域地质调查项目,也在本套杂岩中获得了一批锆石 U-Pb 年龄,显示斜长角闪岩、变玄武岩、变辉长岩和变辉绿岩的变质年龄为 1757~1805 Ma。综上,斜长角闪岩经历了 2 期古元古代变质事件,变质事件发生于 1924±17 Ma 和 1814.2±9.4 Ma,且蕴含了一期区域构造岩浆事件(1987.0~2044.1 Ma)。

该斜长角闪岩记录了古元古代中期(2000~1800 Ma)的岩浆、变质事件。前人在白乃庙岛弧上获得了大量的古元古代地质记录信息。在白云鄂博北部地区早古生代辉长岩中获得古元古代锆石 Hf 同位素模式年龄^[25]。在白乃庙组绿片岩(原岩为火山岩)^[18,24]、太仆寺地区早古生代镁铁质岩脉^[23]、白乃庙地区石英二长闪长玢岩^[30]和吉林中部机房沟群、桦甸杂岩^[26]中也有古元古代的捕获锆石年龄。此外,陈井胜等^[38]在赤峰东部热水一带的斜长角闪岩中获得变质年龄为 1860 Ma,与本次发现的斜长角闪岩变质年龄相近。众所周知,古元古代中期(2.0~1.8 Ga)是哥伦比亚超大陆汇聚时期,期间华北、劳伦西亚、波罗的海、西伯利亚、亚马逊、西

非、南非、印度、澳大利亚、南极洲等一系列克拉通地块发生碰撞拼接^[65],而双胜地区斜长角闪岩的年代信息与该时限相近,暗示其可能参与了哥伦比亚超大陆汇聚事件。

5.2 岩石成因及构造背景

本套斜长角闪岩原岩为拉斑系列辉长岩,具有低 SiO₂,高 TFeO、CaO、MgO 和 TiO₂ 含量,贫碱,高 Na₂O/K₂O (2.05~3.12),中等的 Mg[#](41.09~51.71)、m/f 值(0.92~1.41)及较高的 V (248×10⁻⁶~372×10⁻⁶)、Co (44×10⁻⁶~69×10⁻⁶)、Ni (83×10⁻⁶~356×10⁻⁶)、Cr 含量(133×10⁻⁶~551×10⁻⁶)等,暗示其来源于幔源区且未受到大陆地壳物质参与^[66]。样品的 Th/Ce 和 Th/La 值较低(分别为 0.01~0.03 和 0.03~0.06),略低于 OIB,而 Ta/Yb、La/Yb 和 Nb/Yb 值较高(分别为 0.01~0.03 和 0.03~0.06),介于 OIB 和 E-MORB(富集地幔)之间^[67],且稀土和微量元素曲线特征与 OIB 基本一致(图 6),在 Zr/Y-Nb/Y 图解(图 7-a)中,样品点落入 OIB 区域。以上显示该斜长角闪岩原岩具 OIB 特征。

在 Ti-V/1000 图解(图 7-b)中,样品远离与俯冲带相关的 IAT(岛弧拉斑玄武岩)和 CA(钙碱性玄武岩)区,而落入 MORB(洋中脊玄武岩)&BABB(弧后盆地玄武岩)、CFB(大陆溢流玄武岩)、OIB&ALK(碱性玄武岩)的叠置区域,暗示岩石形成于板内或离散边界构造背景;在 Y-Cr 图解(图 7-c)中,样品点也偏离了岛弧相关的 IAT 背景,落入 WPB(板内玄武岩)和 MORB 的叠置区;在 Zr-Zr/Y 图解(图 7-d)、TiO₂-TFeO/MgO 图解(图 7-e)和 La/Nb-La 图解(图略)中,样品点偏离了 IAT、IAB(岛弧玄武岩)及 MORB 背景,落入 WPB 区,暗示岩石形成于板内构造背景。在 Ta/Hf-Th/Hf 图解(图 7-f)中,样品点落入地幔热柱玄武岩区,暗示岩石来自于岩石圈地幔,并受到软流圈物质的明显影响^[73]。结合前文的源区分析,推测该套斜长角闪岩原岩来源于岩石圈地幔,形成于大洋板内构造背景。

5.3 地质意义

双胜地区变质杂岩主体由斜长角闪岩、斜长辉岩、辉石岩、变玄武岩、大理岩、长石石英岩、钾长变粒岩等组成,产出状态上钾长变粒岩在斜长角闪岩中呈变质脉状产出,可能为变质杂岩变质之前的长英质脉体,而斜长角闪岩和斜长辉岩同属基性岩中

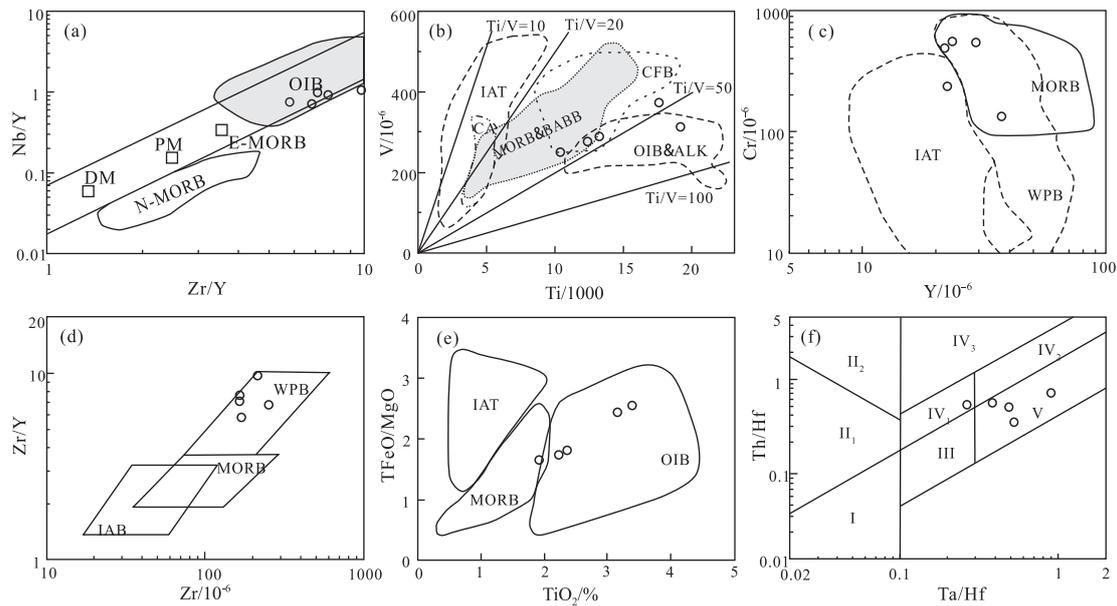


图7 双胜地区斜长角闪岩构造环境判别图解

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams of the amphibolite from Shuangsheng area

a—Zr/Y-Nb/Y 图解^[68]; b—Ti/1000-V 图解^[69]; c—Y-Cr 图^[70]; d—Zr-Zr/Y 图解^[71]; e—TiO₂-TFeO/MgO 图解^[72]; f—Ta/Hf-Th/Hf 图解^[73]; 图 f: I—板块发散边缘 N-MORB 区; II—板块汇聚边缘 (II₁—大洋岛弧玄武岩区; II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV—大陆板内 (IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区; IV₃—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区; V—地幔热柱玄武岩区; 其他图中: DM—亏损地幔; N-MORB—正常大洋中脊地幔; PM—原始地幔; E-MORB—富集地幔; MORB—洋中脊玄武岩; CA—钙碱性玄武岩; ALK—碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; MORB&BABB—弧后盆地玄武岩; WPB—板内玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; CFB—大陆溢流玄武岩

级变质的产物,辉石岩与斜长辉岩空间展布连续且野外岩貌上极相似,因此推测辉石岩属于斜长角闪岩和斜长辉岩的变质残留体。据以上分析推测,双胜地区变质杂岩原岩主体为玄武岩、灰岩及辉长岩,结合上文的年代格架分析,它们均经历了古元古代(约 1.8 Ga)的变质作用。其中玄武岩和灰岩岩石组合相似于洋岛海山火山-沉积序列,同时辉长岩(斜长角闪岩原岩)的地球化学性质也类似于大洋板内的 OIB,因此暂将双胜地区变质杂岩的原岩构造背景厘定为洋岛海山,但该结论尚需玄武岩的构造背景研究支持。关于该变质杂岩原岩(玄武岩、灰岩及辉长岩)的形成时代,基于变质年龄确定其应该形成于 1924 Ma 之前,甚至是形成于在目前厘定的构造岩浆事件(1987.0~2044.1 Ma)之前。斜长角闪岩的 2 期变质年龄分别为 1924±17 Ma 和 1814.2±9.4 Ma,与古元古代中期(2.0~1.8 Ga)哥伦比亚超大陆中各克拉通地块的汇聚时限相近^[65],暗示该套暂定的洋岛海山地质体可能参与了哥伦比

亚超大陆碰撞造山,属克拉通地块间碰撞造山带的一部分,换言之,双胜地区变质杂岩可能记录了古元古代哥伦比亚超大陆聚合过程中的洋陆转化事件。

大量年代学研究显示,在白乃庙岛弧西段白乃庙群、白音都西群及寒武纪-志留纪弧侵入岩中发现了诸多前寒武纪记录^[16, 18, 22-25, 28-30, 33-34],在东段机房沟组、桦甸杂岩及志留纪岛弧侵入岩中也发现相应记录^[16, 26],在中段赤峰东北-翁牛特旗发现了前寒武纪岩石^[27, 38-39]。白乃庙岛弧早古生代变质火山-沉积岩碎屑锆石和岛弧侵入岩锆石 Hf 同位素模式年代学研究显示,岛弧西段和东段早古生代构造背景及地质事件年代格架一致^[16, 26],暗示华北板块北缘的白乃庙岛弧是一个统一的地体。本次对白乃庙岛弧前寒武纪岩石的年龄资料及早古生代地质体中的前寒武纪年龄记录进行了详细统计(表 3)。统计结果显示,除少量新元古代碎屑锆石外,岛弧东、中、西段前寒武纪年代格架较相似,均

表 3 白乃庙岛弧前寒武纪地质记录信息
Table 3 Information of Precambrian geological record of Bainaimiao arc

构造位置	位置	岩石	年龄说明	年龄范围/Ma	峰期年龄值或范围/Ma	文献
白乃庙岛弧西段 (温都尔庙— 白乃庙地区)	白乃庙铜矿	白乃庙群绿片岩	锆石 Hf 二阶段年龄	693~2843	971~1238	[34]
	白云鄂博北部地区	早古生代辉长岩	锆石 Hf 模式年龄	1000~3670	1000~1300 1600~2050	[25]
	白乃庙地区	白乃庙组绿片岩(火山岩)	捕获锆石 U-Pb 年龄		1421 1928, 2027	[24]
	白乃庙铜矿	早古生代花岗岩	捕获锆石 U-Pb 年龄		1082	[33]
	太仆寺地区	早古生代镁铁质岩脉	捕获锆石 U-Pb 年龄		961 1796~1985	[23]
	大庙地区	早古生代花岗岩	捕获锆石 U-Pb 年龄		1235 2427~2532	[22]
			捕获锆石 U-Pb 年龄		1731~1757	[18]
			锆石 Hf 二阶段年龄	1073~1470	1285	[16]
			碎屑锆石 U-Pb 年龄	458~3109	622 960~1158	[30]
			碎屑锆石 U-Pb 年龄	612, 845	986~1254 1607	
白乃庙岛弧中段 (赤峰北部— 翁牛特旗地区)	达茂旗地区	早古生代变质砂岩	碎屑锆石 U-Pb 年龄	446~2954	591, 889	2174
	达茂旗地区	早古生代变质砂岩	碎屑锆石 U-Pb 年龄		981, 1134	
	白乃庙地区	早古生代黑云母石英片岩	捕获锆石 U-Pb 年龄		1231~1277	1709~1881
	白乃庙地区	石英二长闪长玢岩	捕获锆石 U-Pb 年龄			
	翁牛特旗	晚志留世二长花岗岩	捕获锆石 U-Pb 上交点年龄		2504±53	[39]
		石英闪长岩	锆石 U-Pb 年龄(结晶年龄)		2502.6±9.1	
					2551±7.3	[27]
		新太古代石英闪长岩	锆石 Hf 二阶段年龄	2705~2744	2705~2744	
		宝音图群斜长角闪岩	锆石 U-Pb 年龄(变质年龄)	1738~1976	1860.1±7.9	[38]
		早泥盆世火山岩	锆石 Hf 二阶段年龄	2423~2770	2423~2770	[36]
白乃庙岛弧东段 (吉林南部地区 (吉南地区))	翁牛特旗解放营子	中三叠世花岗岩	锆石 Hf 二阶段年龄	936~1126	936~1126	[35]
	阿鲁科尔沁旗双胜	古元古代变斜长角闪岩	锆石 U-Pb 年龄	1731~2478	1987~2044	2478 本文
			碎屑锆石 U-Pb 年龄	582, 642, 837~865	950~960 1770~1880 2284~2644	[26]

呈现新太古代末—古元古代初(2600~2300 Ma)、古元古代中晚期(2000~1600 Ma)、中元古代中晚期(1300~950 Ma)3个阶段,暗示岛弧具有统一的前寒武纪基底,进一步证实白乃庙岛弧是一个统一的地体。前人通过白乃庙岛弧基底、岛弧性质、白乃庙铜—钼—金矿床成矿背景、古元古代锆石特征等研究,认为白乃庙岛弧与华北克拉通具构造亲缘性^[22-24]。Wang等^[74]在翁牛特旗解放营子获得新太古代石英闪长岩,认为其属于华北克拉通的新太古代基底,并将白乃庙岛弧厘定为安迪斯型陆缘弧。本次获得的古元古代变质杂岩恰好位于华北克拉通北侧的内蒙—冀北古元古代造山带和中部新太古代末造山带叠加区的北部,且其构造属性相似于洋岛—海山,与内蒙—冀北造山带的背景和时限吻合,因此推测双胜镇地区变质杂岩属于华北克拉通的古元古代变质基底,结合白乃庙岛弧前寒武纪年代格架资料,认为该岛弧与华北克拉通具有极好的构造亲缘性。

6 结 论

(1)内蒙古东部阿鲁科尔沁旗双胜地区发育一套变质杂岩,主体由斜长角闪岩、斜长辉岩、辉石岩、变玄武岩、大理岩、长石石英岩、钾长变粒岩等组成,通过LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得斜长角闪岩2期变质年龄分别为 1924 ± 17 Ma和 1814.2 ± 9.4 Ma,一期区域构造岩浆事件年龄为 $1987.0 \sim 2044.1$ Ma。

(2)斜长角闪岩原岩为辉长岩类,属拉斑玄武岩系列,具有富铁、镁、钙、钛,贫碱,高 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (2.05~3.12),中等 $\text{Mg}^\#$ 值(41.09~51.71)等特征,稀土和微量元素特征与OIB相似,推测其来源于岩石圈地幔,形成于大洋板内构造背景。

(3)双胜地区变质杂岩原岩构造属性类似于洋岛—海山,可能记录了古元古代哥伦比亚超大陆聚合过程中的洋陆转化事件;结合区域资料,推测白乃庙岛弧具有统一的前寒武纪基底,与华北克拉通具有极好的构造亲缘性。

致谢:测试分析过程中得到中国地质科学院地质所深地动力学实验室、河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司和自然资源部东北矿产资源监督检测中心等相关单位和个人的大力支持与帮助;成文过程中得到中国地质调查局沈阳地质调查中心

付俊或和杨晓平教授级高工的指导和帮助;审稿专家对本文提出了宝贵的建议,在此表示最诚挚的谢意。

参考文献

- [1] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [2] 吴福元, 孙德有. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 181-189.
- [3] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23(2): 82-92.
- [4] Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 87-110.
- [5] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069.
- [6] 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等. 从中亚正 ϵ_{Nd} 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系 [J]. *地质学报*, 2003, (2): 203-209.
- [7] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3): 207-224.
- [8] Windley B F, Alexeiew D, Xiao W J, et al. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(12): 31-47.
- [9] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian orogenic belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth [J]. *Lithos*, 2008, 101: 233-259.
- [10] Kröner A, Kovach V, Belousova E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian orogenic belt [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 103-125.
- [11] Safonova I Y, Seltman R, Kröner A, et al. A new concept of continental construction in the Central Asian orogenic belt (compared to actualistic examples from the western Pacific) [J]. *Episodes*, 2011, 34: 186-196.
- [12] Safonova I Y, Santosh M. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 126-158.
- [13] 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 兴安造山带前中生代构造单元划分初探 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1841-1857.
- [14] 潘桂棠, 肖荣阁. 中国大地构造图说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 2015: 1-160.
- [15] Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean [J]. *Earth - Science Reviews*, 2018, 186: 76-93.

- [16] Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2014, 126(9/10): 1275–1300.
- [17] Zhang W, Jian P, Kröner A, et al. Magmatic and metamorphic development of an early to mid-Paleozoic continental margin arc in the southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72(Complete): 63–74.
- [18] 柳长峰, 刘文灿, 王慧平, 等. 华北克拉通北缘白乃庙组变质火山岩锆石定年与岩石地球化学特征[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 67–81.
- [19] Li W B, Hu C S, Zhong R C, et al. U–Pb, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ geochronology of the metamorphosed volcanic rocks of the Bainaimiao Group in central Inner Mongolia and its implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 251–259.
- [20] 李俊建, 党智财, 赵泽霖, 等. 内蒙古白乃庙铜矿床成矿时代的研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(8): 1448–1457.
- [21] Teng X M, Yang Q Y, Santosh M. Devonian magmatism associated with arc–continent collision in the northern North China Craton: Evidence from the Longwangmiao ultramafic intrusion in the Damiao area[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113(2): 626–643.
- [22] Wu C, Liu C F, Zhu Y, et al. Early Paleozoic magmatic history of central Inner Mongolia, China: implications for the tectonic evolution of the Southeast Central Asian Orogenic Belt[J]. *Berlin Heidelberg: Springer*, 2016, 105(5): 1307–1327.
- [23] Wu J H, Li H, Xi X S, et al. Geochemistry and geochronology of the mafic dikes in the Taipusi area, northern margin of North China Craton: Implications for Silurian tectonic evolution of the Central Asian Orogen[J]. *Journal of Earth System Science*, 2017, 126(5): 64.
- [24] Zhou Z H, Mao J W, Ma X H, et al. Geochronological framework of the early Paleozoic Bainaimiao Cu–Mo–Au deposit, NE China, and its tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 144: 323–338.
- [25] Zhou H, Zhao G, Han Y, et al. Geochemistry and zircon U–Pb–Hf isotopes of Paleozoic intrusive rocks in the Damiao area in Inner Mongolia, northern China: Implications for the tectonic evolution of the Bainaimiao arc[J]. *Lithos*, 2018, 314/415: 119–139.
- [26] Zhou H, Pei F P, Zhang Y, et al. Origin and tectonic evolution of early Paleozoic arc terranes abutting the northern margin of North China Craton[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(5): 1911–1933.
- [27] Wang X A, Li S C, Xu Z Y, et al. Neoproterozoic quartz diorites in the Jiefangyingzi area, Central Asian Orogenic Belt: geological and tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 2016, 58(3): 358–370.
- [28] Nie F J, Zhanf H T, Chen Q, et al. The zircon U–Pb age of metamorphosed basic volcanic rocks from the Bainaimiao group in Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(9): 738–742.
- [29] Nie F J, Bjorlykke A. Nd and Sr isotope constraints on the age and origin of Proterozoic meta–mafic volcanic rocks in the Bainaimiao–Wenduermiao District, south–central Inner Mongolia, China[J]. *Continental Dynamics*, 1999, 4(1): 1–14.
- [30] 张华锋, 周志广, 刘文灿, 等. 内蒙中部白乃庙地区格林威尔岩浆事件记录: 石英–二长闪长岩脉锆石 LA–ICP–MS U–Pb 年龄证据[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 218–224.
- [31] 李建峰, 张志诚, 韩宝福. 内蒙古达茂旗北部闪长岩锆石 SHRIMP U–Pb、角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 732–740.
- [32] 李凤宪, 白新会, 万乐, 等. 内蒙苏尼特右旗吉布胡楞土岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(2): 98–109.
- [33] 赵利刚, 李承东, 常青松, 等. 内蒙古白乃庙铜矿区含矿中酸性侵入岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及成矿时代[J]. *地质通报*, 2016, (4): 542–552.
- [34] 高旭, 周振华, 车合伟, 等. 内蒙古白乃庙铜–金–钼矿床侵入岩和围岩成因: 岩石地球化学和 Hf 同位素的证据[J]. *矿床地质*, 2018, 37(2): 420–440.
- [35] Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. Petrogenesis of middle Triassic post–collisional granite from Jiefangyingzi area, southeast Inner Mongolia: constraint on the Triassic tectonic evolution of the north margin of the Sino–Korean paleoplate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 147–159.
- [36] 刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 等. 华北克拉通北缘与弧–陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩——锆石 U–Pb 定年及地球化学证据[J]. *地质通报*, 2013, 32(2): 267–278.
- [37] 徐博文, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 内蒙古赤峰地区晚古生代 A 型花岗岩锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(1): 60–71.
- [38] 陈井胜, 李斌, 邢德和, 等. 赤峰东部宝音图群斜长角闪岩锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(2): 81–88.
- [39] 陈井胜, 刘森, 李斌, 等. 内蒙古翁牛特旗晚志留世二长花岗岩年代学及地球化学特征[J]. *地质通报*, 2017, 36(8): 1359–1368.
- [40] Cui Y L, Qu H J, Chen Y F, et al. The age of the original Silurian Badangshan formation and its ductile deformation in the northern margin of North China Craton: new evidence from zircon SHRIMP U–Pb ages[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 2330–2332.
- [41] Chen J S, Li B, Yang H, et al. New zircon U–Pb age of granodiorite in Chifeng at the northern margin of North China Craton and constraints on plate tectonic evolution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(1): 410–413.
- [42] 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等. 鞍山东山风景区 3.8~2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 363–370.
- [43] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 24–36.
- [44] Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6–25.
- [45] Tang L, Santosh M. Neoproterozoic–Paleoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: an overview from the central segment of the Trans–North China Orogen[J]. *Earth–Science Reviews*, 2018, 182: 1–27.
- [46] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS International

- Chronostratigraphic Chart[J]. Episodes, 2013, 36: 199-204.
- [47] 胡国辉, 胡俊良, 陈伟, 等. 华北克拉通南缘中条山-嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境[J]. 岩石学报, 2009, 26(5): 1563-1576.
- [48] 裴福萍, 叶铁凡, 王枫, 等. 吉林通化地区中元古代辉绿岩墙的发现及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(1): 113-121.
- [49] Li H K, Lu S N, Su W B, et al. Recent advances in the study of the Mesoproterozoic geochronology in the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Science, 2013, 72(10): 216-227.
- [50] Li Z, Chen B, Wang J L. Geochronological framework and geodynamic implications of mafic magmatism in the Liaodong Peninsula and adjacent regions, North China Craton[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(1): 138-153.
- [51] 韩吉龙, 王清海. 华北克拉通辽东半岛新元古代早期基性岩浆活动: 辉绿岩墙年代学和岩石地球化学证据[J]. 世界地质, 2015, 34(4): 886-902.
- [52] Wang W, Liu S W, Santosh M, et al. Late Paleoproterozoic geodynamics of the North China Craton: geochemical and zircon U-Pb-Hf records from a volcanic suite in the Yanliao rift[J]. Gondwana Research, 2015, 27(1): 300-325.
- [53] Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. Early Neoproterozoic emplacement of the diabase sill swarms in the Liaodong Peninsula and pre-magmatic uplift of the southeastern North China Craton[J]. Precambrian Research, 2016, 272: 203-225.
- [54] Zhang S H, Zhao Y, Li X H, et al. The 1.33-1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 465(Complete): 112-125.
- [55] Tang Y J, Zhang H F, Santosh M., et al. Differential destruction of the North China Craton: a tectonic perspective[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 78: 71-82.
- [56] Wang Q, Liu X Y. Paleoplate tectonics between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China[J]. Tectonics, 1986, 5(7): 1073-1088.
- [57] Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. Journal of Asian Earth Science, 2009, 34(3): 245-257.
- [58] 尚庆华. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2574-2579.
- [59] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565-582.
- [60] 谷丛楠, 周志广, 张有宽, 等. 内蒙古白乃庙地区白音都西群的碎屑锆石年龄及其构造意义[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 1-9.
- [61] 王炎阳, 徐备, 程胜东, 等. 内蒙古克什克腾旗五道石门基性火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 217-224.
- [62] 江思宏, 梁清玲, 聂凤军, 等. 内蒙古林西双井子杂岩锆石 LA-MC-ICP-MS 测年初步研究[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1108-1123.
- [63] 李钢柱, 王玉净, 李成元, 等. 内蒙古索伦山蛇绿岩带早二叠世放射虫动物群的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 2017, 62(5): 60-66.
- [64] Sun S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [65] Zhao G C, Li S Z, Sun M, et al. Assembly, accretion, and break-up of the Palaeo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: record in the North China Craton revisited [J]. International Geology Review, 2011, 53(11): 1331-1356.
- [66] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Rudnick R L. The crust. Treatise on geochemistry. Elsevier - Pergamon, Oxford, 2005: 1-64.
- [67] 冯志硕, 张志诚, 李建锋, 等. 敦煌三危山地区白垩纪 OIB 型基性岩墙的特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 607-616.
- [68] Feng Z Q, Jia J, Liu Y J, et al. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous magmatism in the northern Great Xing'an Range, NE China: constraints on the timing of amalgamation of Xing'an and Songnen blocks[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 411-426.
- [69] Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(1): 101-118.
- [70] Pearce J A. Supra-subduction zone ophiolites: the search for modern analogues[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 2003, 373: 269-293.
- [71] Wood D A, Joron J L, Treuil M. A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 45(2): 326-336.
- [72] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1983, 147(6): 2162-2173.
- [73] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413-421.
- [74] Kusky T M, Polat A, Windley B F, et al. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: A record of outward growth of Precambrian continents[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 162: 387-432.