

燕山中部四海盆地髻髻山组年代学 分析及其地质意义

郑艺龙,贺瑾瑞,吴家悦,于兆林,冉淑红,孙霖,安立伟,王弘初

北京市地质灾害防治研究所,北京,110120



内容提要:四海盆地位于燕山中部北京北山腹地,区内广泛分布中生代髻髻山组火山岩系,其形成时代对区域构造环境和地球动力学演化均具有重要意义,但针对该地区髻髻山组的精确同位素年代学分析较少。在四海盆地中部水泉子村髻髻山组地层中发现气孔杏仁玄武岩、安山玄武质沉火山岩,这些基性岩石与前人发现的流纹质岩石构成双峰式火山岩,表明该地区的髻髻山组可能形成于裂谷环境。对该剖面下部沉火山岩中的安山玄武岩角砾、中部的流纹质凝灰角砾岩分别进行岩石学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析。结果显示,安山玄武岩形成于 159.8 ± 3.7 Ma,流纹质凝灰角砾岩形成于 159.0 ± 1.5 Ma。该年龄范围表明北山地区的髻髻山组主要形成于晚侏罗世早期,这与燕山造山带中髻髻山组火山岩系自东向西形成时代逐渐变年轻的大趋势相吻合,对于正确认识髻髻山组地层乃至华北克拉通中生代构造演化具有重要意义。

关键词:华北克拉通;髻髻山组;双峰式火山岩;锆石 U-Pb 年龄;燕山;燕山运动;

华北克拉通形成于古元古代末期,其东部在侏罗纪—白垩纪经历了强烈的造山作用和大规模火山—岩浆作用(葛肖虹,1989;张宏仁,1998;宋鸿林,1999;邓晋福等,2000; Davis et al., 2001; 赵国春,2002; Zhu Rixiang et al., 2012; 李三忠等,2016; ; Wu Fuyuan et al., 2019)。中国地质学先驱者之一—翁文灏将该期构造—岩浆事件命名为“燕山运动”,并划分为“绪动/A 幕”、中间幕和侏罗纪末期的 B 幕(Wong, 1927, 1929; 李海龙等,2014)。大多数学者认同燕山运动结束了华北克拉通长达十多亿年的相对稳定时期,是中国东部由近 E—W 向的古亚洲洋构造域转变为 NE—NNE 向太平洋构造域的重要阶段(赵越等,1994,2004;王瑜,1996;董树文等,2007; Zhang Jiheng et al., 2010; 张宏仁等,2013; Xu Wenliang et al., 2013; 张宏仁,2016; Tang Jie et al., 2018; 翟明国等,2019)。蒙古—鄂霍茨克海于中—晚侏罗世闭合,古太平洋板块从中侏罗世开始向欧亚大陆斜向俯冲,两个板块构造事件在一定时间段内共同作用于华北克拉通东部(赵越等,2002,2004; 赵盼等,2023),但二者在不同时期的主导程度仍不清晰。燕山造山带位于华北克拉通的东北部,区内

广泛分布具有明显规律性的侏罗纪—白垩纪火山岩和侵入岩。其中,火山岩主要包括早侏罗世南大岭组基性火山岩系,(中—)晚侏罗世髻髻山组中性火山岩系和早白垩世张家口组酸性火山岩系(Davis et al., 2001; 赵越等,2004),是研究华北克拉通北部不同阶段构造运动性质和演化的重要依据。

髻髻山组火山岩系是北京地区分布面积最广、厚度最大的火山岩系(北京市地质调查研究所,2025)。燕山运动 A 幕通常以髻髻山组(含下部砾岩?)之下的角度不整合为标志(Wong Wenhao, 1927; 李海龙等,2014; 张宏仁,2016);在辽西建昌髻髻山组地层中曾发现飞行恐龙 *Aurornis xui* (Godefroit et al., 2013)。因此,该组火山岩系的形成时代对于区域构造环境和地球动力学演化均具有重要意义,受到国内外学者的普遍关注。诸多学者通过锆石 U-Pb,全岩 Ar-Ar 和单矿物 Ar-Ar 等方法,对燕山地区的髻髻山组的形成时代进行了分析,获得的年龄值主要分布于 170~142 Ma 之间(Davis et al., 2001; 李伍平等,2001; 赵越等,2004; 张宏等,2005; 刘建等,2006; 杨蔚,2007; 张宏等,2008; 于海飞等,2016; 李斌等,2019; Guo Jianfang et al., 2022;

注:本文为中国地质调查局项目(编号:1212011220044;DD20190074;DD20221771)的成果。

收稿日期:2025-01-24;改回日期:2025-06-11;网络首发:2025-06-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.065

作者简介:郑艺龙,男,1986年生,博士,工程师,主要从事区域地质调查和构造地质学研究;Email: zhengyl011051@163.com。通讯作者:

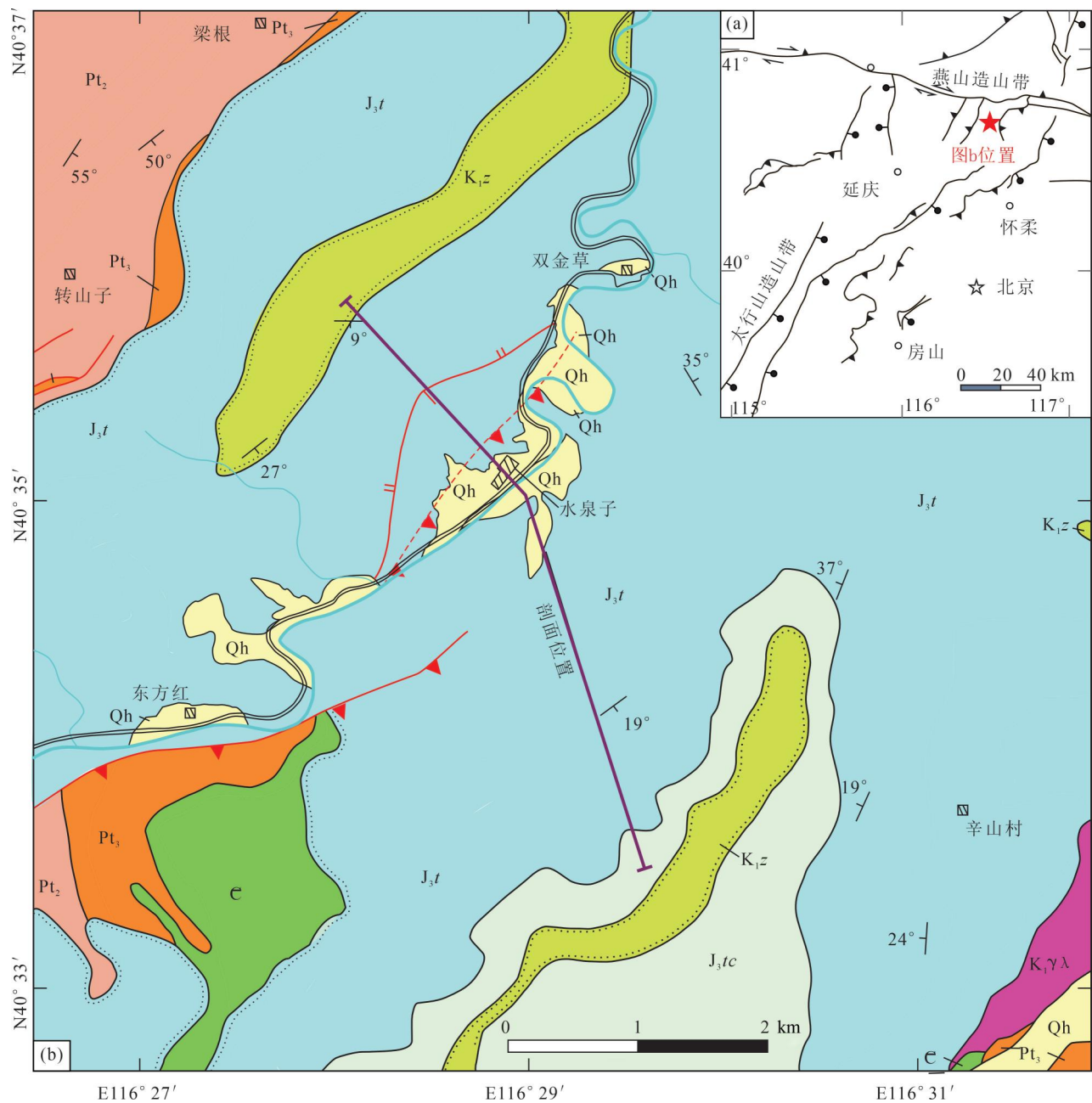
贺瑾瑞,男,1984年生,硕士,正高级工程师,主要从事区域地质调查和地层学研究;Email: laury@qq.com。

白春东等, 2024a, 2024b; 杨济远等, 2024)。

以上研究成果是进一步认识髻髻山组地层和燕山造山带的形成与演化的重要基石, 但相关测年成果范围跨度较大。为此, 部分学者提出燕山地区的髻髻山组火山岩系具有自东向西迁移的趋势 (Guo Jianfang et al., 2022), 但缺少来自燕山中部的北京北山地区的年代学证据。四海地区位于北京北山腹地, 该地区出露一套结构复杂的火山—沉积岩石组合, 其间存在多种接触关系, 前人将其划分为髻髻山组、后城组 (土城子组) 和张家口组 (东岭台组) (姬广义和汪洋, 2002)。并认为其中的火山岩由高钾钙碱性系列、富钾质的拉斑系列和过渡型高钾钙碱

性系列三套岩石组成, 形成于燕山早、中期造山变形事件结束后的造山带环境中 (汪洋和姬广义, 2003)。

北山地区髻髻山组的形成环境和时代在横向和纵向上均具有对比意义。前人曾在北山南端十三陵水库附近以安山岩、粗安岩为主的髻髻山组火山岩中获得了 $157.2 \pm 1.2 \text{ Ma} \sim 153.1 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄 (于海飞等, 2016)。水泉子村位于北京北山腹地四海盆地中部, 是北山地区含流纹质火山岩系髻髻山组的典型出露地区。本文对北京北山腹地四海盆地中的髻髻山组开展了详细调查, 在该组地层下部和顶部新发现玄武质沉火山岩和玄武岩, 与剖



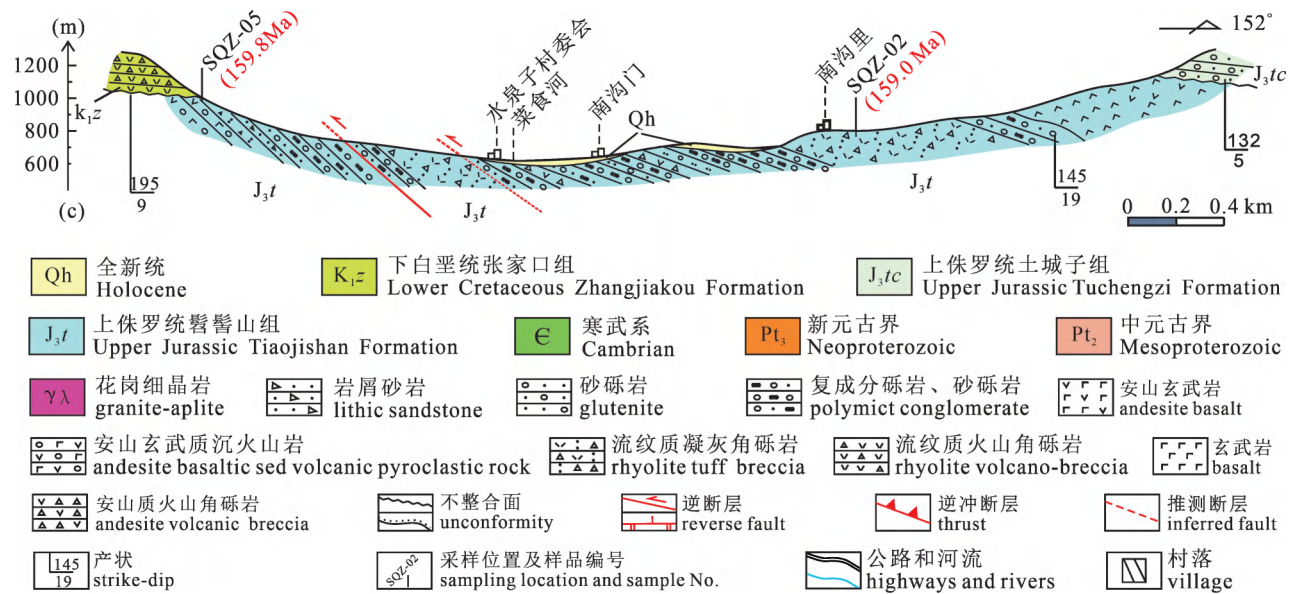


图 1 燕山中部四海盆地地质概况: (a) 四海盆地所处大地构造位置(修改自张长厚等,2011); (b) 水泉子村及其邻区地质简图(修改自四海幅、琉璃庙幅 1:50000 地质图); (c) 水泉子村上侏罗统髻髻山组地质剖面

Fig. 1 Geological settings of the Sihai Basin, central Yanshan Mountains: (a) the tectonic location of the Sihai Basin and the location of the Shuiquanzi Village (modified from Zhang Changhou et al., 2011&); (b) simplified geological map of the Shuiquanzi Village and its adjacent areas (modified from the 1:50000 geological maps of the Sihai-scale and Liulimiao-scale), (c) geological section of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation in the Shuiquanzi Village

面中的流纹质岩石构成双峰式火山岩。对典型火山岩、火山碎屑岩进行采样,获得其高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,结合前人研究成果,对区域构造演化进行探讨。

1 地质背景

水泉子村构造上位于华北克拉通北部承德—武安火山喷发带凤驼梁—四海盆地,是燕山运动典型的中生代火山沉积盆地。该地区隶属华北地层区燕山分区,出露地层涵盖中上元古界至新生界。其中,中—新元古界是区内最老的地层,主要分布于工作区西北和西南邻区,是一套未变质或轻变质的海相碳酸盐岩夹少量细碎屑岩,包括蓟县系高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组,待建系下马岭组,青白口系龙山组和景儿峪组。古生界仅出露寒武系地层,主要分布于工作区西南邻区,包括昌平组、馒头组。中生界在工作区广泛分布,是主体地层(图 1),具体包括:

髻髻山组,下部为粗安岩夹角砾凝灰岩、安山玄武质沉火山岩和复成分砾岩;中部为安山岩、粗安岩、粗面岩、流纹岩及相应的火山碎屑岩组合;上部安山质砾岩、角砾岩和玄武岩、安山玄武岩。

土城子组,下部为紫红色—灰绿色复成分砾岩

夹凝灰质粉砂岩,石英粗面质熔结角砾凝灰岩、凝灰角砾岩和凝灰质粉砂岩;中部为紫、灰绿色含砾岩屑砂岩夹凝灰质粉砂岩;顶部为复成分砾岩、砂砾岩夹紫灰色石英粗面质熔结凝灰岩。

张家口组,下部为紫灰色石英粗面质熔结复成分砾岩、石英粗面质熔结凝灰岩、粗面粗安质凝灰岩、流纹质熔结角砾凝灰岩;中部为流纹岩及其火山碎屑岩夹石英粗面质熔结复成分砾岩;上部为粗安岩、粗面质火山碎屑岩夹紫灰色流纹岩、流纹质火山碎屑岩。

髻髻山组是四海盆地分布最广的地层,笔者等在水泉子村开展地质文化村相关地质调查时,在髻髻山组剖面下部发现安山玄武质沉火山岩,底部被张家口组流纹质火山角砾岩、球粒流纹岩角度不整合覆盖(图 1、图 2)。在剖面中部发现两处流纹质凝灰角砾岩、角砾凝灰岩组合,厚度分别为 270 m(北坡)和 780 m(南坡)。在剖面顶部发现气孔、杏仁玄武岩组合,总厚度约 600 m,下部含大量气孔、杏仁构造,上部逐渐过渡为安山玄武岩。

2 岩矿特征与样品采集

2.1 岩石学与矿物学特征

水泉子村髻髻山组主要为复成分砾岩(夹含砾



图2 四海盆地水泉子村北部上侏罗统髫髻山组与下白垩统张家口组(?)之间的角度不整合
Fig. 2 Unconformity between the Upper Jurassic Tiaojishan Formation and the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation (?) on the north of Shuiquanzi Village, the Sihai Basin

砂岩、粉砂岩)、流纹质凝灰角砾岩、角砾凝灰岩、气孔杏仁玄武岩和安山玄武岩质沉火山岩等,不同岩性之间多为整合接触,局部为断层接触。剖面中几种典型岩性包括:

(1) 张家口组球粒流纹岩:岩石由斑晶和基质组成,部分基质由纤维状长英质集合体构成球粒结构,部分长英质集合体构成流纹构造。岩石中可见杏仁体。斑晶成分为长石,偶见黑云母。长石呈半自形—自形板状,粘土化较强,部分隐约可见聚片双晶、格子双晶。黑云母呈自形片状,被绿帘石、不透明金属矿物交代。斑晶粒度为0.1~0.75 mm。球粒成分为长英质集合体,部分球粒由两层放射状集合体组成。粒度为0.25~2.25 mm。杏仁体由隐晶质石英组成,呈放射状、扇形(图3a、b)。

(2) 髫髻山组顶部杏仁玄武岩:岩石由斑晶和基质组成。斑晶的主要矿物成分为斜长石、辉石。基质由细小斜长石微晶,颗粒间充填褐色玻璃质,构成间隐结构。岩石中含有较多杏仁体,构成杏仁状构造。岩石具较强绢云母化。斜长石为半自形—自形板状,具较强绢云母化,隐约可见聚片双晶、卡钠复合双晶。斜长石熔蚀孔洞发育,被玻璃质充填。粒度,为0.04×0.08 mm~1.25×2.75 mm。辉石为半自形短柱状,无色,粒度为0.1~0.4 mm。杏仁体呈不规则状,被玻璃质充填,玻璃质具较强绢云母化、绿泥石化,呈纤维交织状,局部被粒状方解石交代,呈高级白干涉色。杏仁体局部呈规则圆弧状(图3c、d)。

(3) 髫髻山组中部流纹质凝灰角砾岩:岩石由火山角砾、晶屑、岩屑和火山灰充填物组成。火山角砾呈次棱角状—次圆状,成分为球粒流纹岩、流纹

岩、珍珠岩,粒度为2.5~10.0 mm。晶屑呈棱角状,成分为石英、钾长石,石英表面干净,钾长石表面较脏,具较强高岭土化,晶屑粒度为0.05~1.25 mm。岩屑呈次棱角状—次圆状,成分与角砾一致,以火山岩为主,可见球粒流纹岩、流纹岩、珍珠岩、变质石英岩。岩屑粒度为0.2~2.0 mm。玻屑无色,呈鸡骨状、弧状,具脱玻化。填隙物由紫红色火山灰组成,充填在上述颗粒间(图3e、f)。

(4) 髫髻山组下部安山玄武岩角砾:岩石由斑晶和基质组成。斑晶主要为斜长石、辉石。基质由细小斜长石微晶定向排列,颗粒间充填褐色玻璃质,构成玻基交织结构。岩石中含有少量杏仁体。斜长石为半自形—自形板状,具较强绢云母化,隐约可见聚片双晶、卡钠复合双晶。粒度为0.25~2.0 mm。辉石为半自形短柱状,浅棕色,多色性不明显,正高突起,局部可见辉石横截面发育两组辉石式解理,干涉色Ⅱ级蓝绿。边部有暗化特征,内部被方解石交代。粒度为0.2~0.5 mm。杏仁体内部被放射状硅质充填,外部充填方解石(图3g、h)。

2.2 样品采集

在对水泉子村髫髻山组进行系统地质调查的基础上,系统采集岩石薄片样品进行岩石学分析,并在底部安山玄武质沉火山岩和中上部流纹质凝灰角砾岩配套采取同位素测年样品SQZ05和SQZ02。其中,SQZ05样品为安山玄武岩角砾,采样重量约5kg,采样位置地理坐标为N40°35′37.65″,E116°28′02.77″;SQZ02样品为流纹质凝灰角砾岩,采样重量约3kg,采样位置地理坐标为N40°34′25″,E116°29′15.76″。

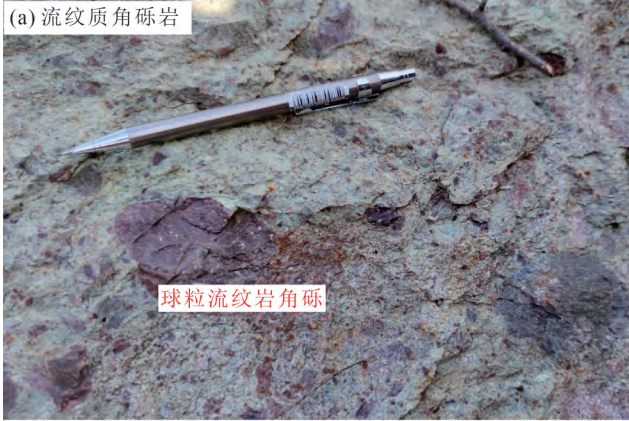
3 年代学分析

3.1 分析方法

岩石薄片鉴定由天津市地质矿产测试中心完成。锆石分选、锆石制靶、阴极发光显微照相、透射

光和反射光照相均由河北省区域地质调查院实验室完成。在双目镜下挑选出具有代表性的锆石,将锆石放入环氧树脂支撑的样品靶中,并对其进行抛光,

(a) 流纹质角砾岩



(c) 气孔杏仁玄武岩



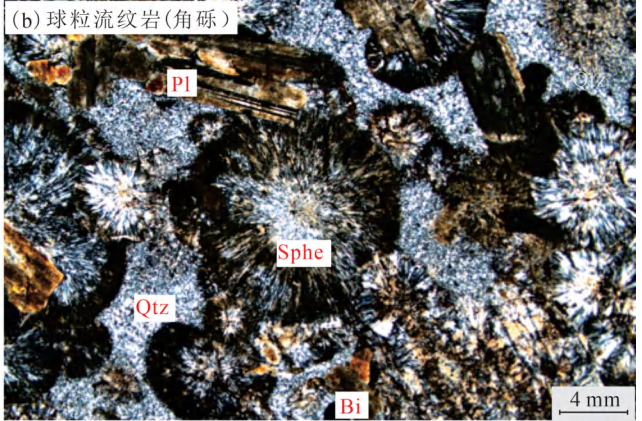
(e) 流纹质凝灰角砾岩



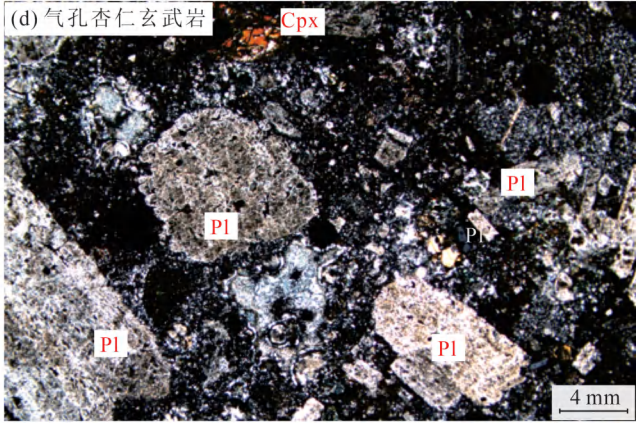
(g) 安山玄武岩质沉火山岩



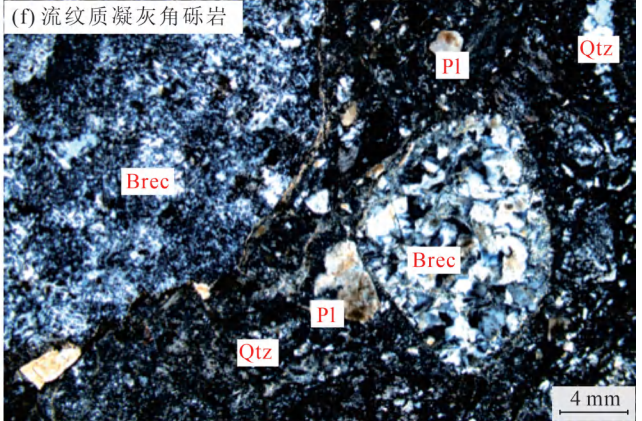
(b) 球粒流纹岩(角砾)



(d) 气孔杏仁玄武岩



(f) 流纹质凝灰角砾岩



(h) 安山玄武岩砾石

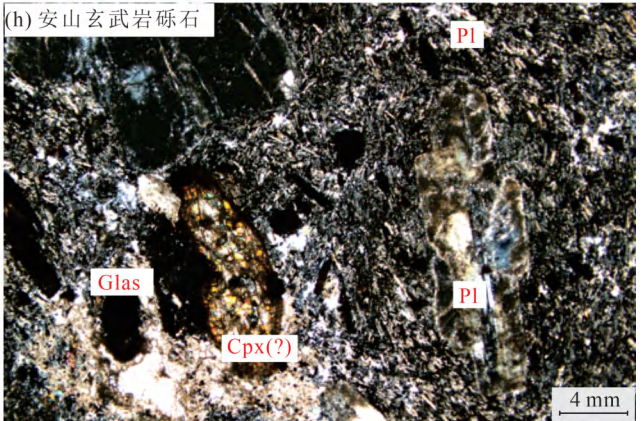


图3 四海盆地水泉子村中生代地层剖面典型岩性特征:(a)(b)下白垩统张家口组流纹质火山角砾岩野外产状和正交偏光显微照片;(c)(d)上侏罗统髫髻山组顶部柱状节理杏仁玄武岩野外产状和正交偏光显微照片;(e)(f)上侏罗统髫髻山组中部流纹质凝灰角砾岩野外产状和正交偏光显微照片;(g)(h)上侏罗统髫髻山组下部,安山玄武岩质沉火山岩野外产状和正交偏光显微照片

Fig. 3 Typical lithology of the Mesozoic stratigraphic profile in the Shuiquanzi Village: (a) (b) field occurrences and orthogonal polarizing microscopic photos of the rhyolitic volcano-breccia of the Lower Cretaceous Zhangjiakou Formation; (c) (d) field occurrences and orthogonal polarizing microscopic photos of the columnar jointed amygdaloidal basalt from the top of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation; (e) (f) field occurrences and orthogonal polarizing microscopic photos of the rhyolite tuff breccia from the middle part of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation; (g) (h) field occurrences and orthogonal polarizing microscopic photos of the andesite—basaltic sed-volcanic rock from the bottom of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation

Qtz—石英; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Sphe—球粒; Cpx—单斜辉石; Brec—角砾; Glas—玻璃质

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Bi—biotite; Sphe—spherulites; Cpx—clinopyroxene; Brec—breccia; Glas—Glassy

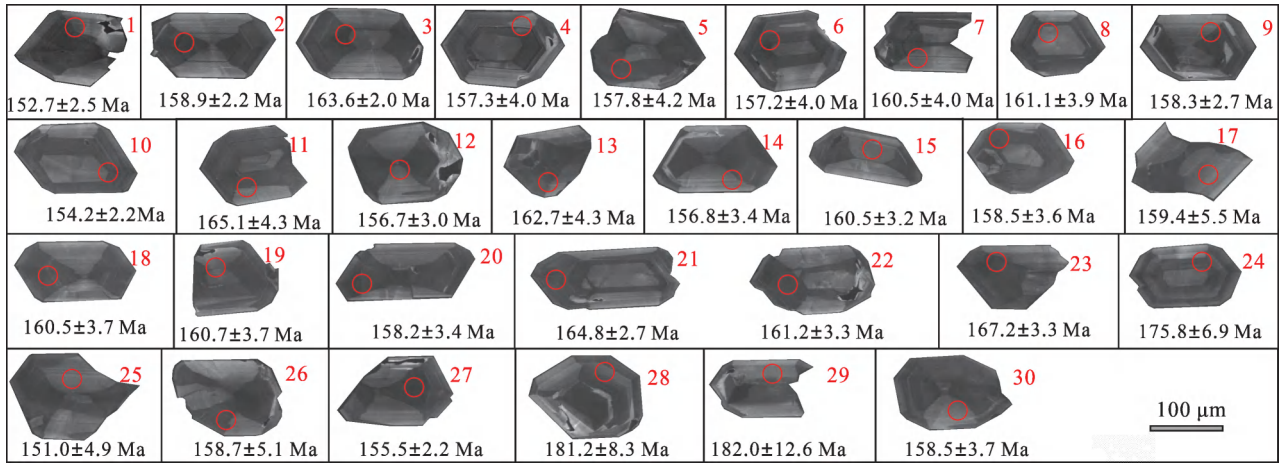


图4 四海盆地水泉子村上侏罗统髫髻山组中部流纹质凝灰角砾岩(SQZ02)中锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL images of the zircons from the rhyolite tuff breccia (SQZ02) selected from the middle part of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation in Shuiquanzi Village, the Sihai Basin

直到样品露出一个光洁的平面,然后进行透射光、反射光以及阴极发光上进行锆石显微照相。同位素测试点的选取基于反射光、透射光照片以及 CL 图像的反复对比,以避免内部裂隙和包裹体。

U-Pb 同位素测年由 中国地质调查局西安地质调查中心实验测试室完成。同位素测试采用的激光剥蚀系统为 Geolaspro, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)为 Agilent7700x。实验过程中采用氦气作为剥蚀物质载气,氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入电感耦合等离子体(ICP)之前先通过一个 T 型接头混合,剥蚀直径为 24 μm,每个剥蚀点的分析时间大致包括空白信号的 10 s 和样品信号的 40 s。关于样品、空白信号的选择,仪器灵敏度漂移校正,元素质量分数、U—Th—Pb 同位素比值测定以及年龄计算等数据的分析和处理利用软件 Glitter4.4 完成,详细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015)。

3.2 分析结果

流纹质凝灰角砾岩中的锆石以无色透明为主,半自形—他形柱状、粒状,颗粒长径主要分布于 100~160 μm,长宽比为 1:1~2.3:1,锆石中包裹体和裂隙较发育。在阴极发光图像中,锆石整体较暗,振荡环带发育,但颜色差异较弱,多数颗粒未发现暗色核部,也不具有变质增生边(图 4)。振荡环带 Th/U 值分布于 0.71~1.84,均值为 1.18,表明这些锆石以岩浆成因为主。流纹质凝灰角砾岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果见表 1。

流纹质凝灰角砾岩年代学分析共测试 30 颗锆石 30 个点,其中点 24、28、29 3 点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄大于 175 Ma,可能为流纹质岩浆上升捕获的锆石年龄或混合年龄;其余 27 个点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄集中于 151.0~167.1 Ma 之间,且都在谐和线附近(图 5a),表明这些锆石在形成后 U-Pb 同位素保持封闭状态,所形成的

表 1 燕山中段四海盆地水泉子村上侏罗统髻髻山组流纹质凝灰角砾岩、安山玄武岩角砾锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircon grains from rhyolite tuff breccia (SQZ02) and andesite-basaltic breccia (SQZ05) of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation in Shuiquanzi Village, the Sihai Basin, central Yanshan Mountains

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度 (%)					
	Pb	Th	U	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		测值	1σ	测值	1σ		
				测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ						
SQZ02 流纹质凝灰角砾岩																	
1	72.56	987.6	699.1	1.411	0.02398	0.00040	0.1553	0.0084	0.04729	0.00252	152.7	2.5	146.3	7.4	43.53	142.71	96
2	135.1	1546	960.0	1.609	0.02496	0.00035	0.1718	0.0094	0.05069	0.00262	158.9	2.2	162.3	7.6	233.9	132.3	98
3	93.37	1066	761.5	1.430	0.02571	0.00032	0.1676	0.0096	0.04812	0.00303	163.6	2.0	159.0	9.1	71.17	164.64	97
4	38.83	419.8	450.2	0.9472	0.02471	0.00063	0.1713	0.0151	0.05065	0.00451	157.3	4.0	159.9	13.0	140.5	218.1	98
5	28.02	345.0	338.6	1.018	0.02479	0.00066	0.1720	0.0132	0.04997	0.00354	157.9	4.2	160.6	11.3	146.7	180.5	98
6	68.91	811.1	623.1	1.337	0.02469	0.00063	0.1762	0.0134	0.05195	0.00402	157.2	4.0	164.2	11.6	233.5	177.9	96
7	48.75	576.3	498.6	1.166	0.02521	0.00063	0.1729	0.0127	0.05016	0.00311	160.5	4.0	161.5	10.9	199.8	157.8	99
8	29.13	348.8	377.0	0.9413	0.02531	0.00063	0.1743	0.0111	0.04928	0.00340	161.1	3.9	162.7	9.6	185.2	153.7	99
9	108.5	1430	856.0	1.697	0.02486	0.00043	0.1670	0.0092	0.04896	0.00297	158.3	2.7	156.5	8.1	117.6	141.4	99
10	54.01	738.4	586.8	1.270	0.02420	0.00036	0.1798	0.0145	0.05416	0.00432	154.2	2.2	169.6	11.9	355.3	191.0	90
11	34.05	381.8	404.7	0.938	0.02594	0.00069	0.1798	0.0174	0.05027	0.00460	165.1	4.3	166.9	14.9	178.9	214.4	99
12	161.4	2272	1254	1.805	0.02461	0.00047	0.1702	0.0074	0.05070	0.00237	156.7	3.0	159.4	6.4	193.7	114.5	98
13	33.59	402.0	451.8	0.8925	0.02557	0.00069	0.1783	0.0147	0.05122	0.00421	162.7	4.3	165.9	12.8	230.6	201.6	98
14	29.23	353.5	413.7	0.8647	0.02462	0.00054	0.1920	0.0167	0.05767	0.00510	156.8	3.4	177.5	14.2	490.3	193.6	87
15	33.37	423.1	430.4	0.9816	0.02522	0.00050	0.1874	0.0175	0.05441	0.00520	160.5	3.2	173.4	15.0	386.8	216.2	92
16	56.57	811.5	619.2	1.312	0.02489	0.00057	0.1683	0.0105	0.05022	0.00328	158.5	3.6	159.3	8.6	205.4	136.8	99
17	18.97	260.9	305.2	0.8599	0.02504	0.00087	0.1746	0.0213	0.05049	0.00674	159.4	5.5	162.0	18.3	125.0	308.4	98
18	57.23	715.4	555.4	1.307	0.02522	0.00060	0.1847	0.0133	0.05464	0.00422	160.5	3.7	171.6	11.4	310.2	186.8	93
19	53.14	636.1	547.8	1.158	0.02524	0.00059	0.1764	0.0174	0.05035	0.00520	160.7	3.7	164.0	15.1	310.3	227.6	98
20	113.4	1385	759.0	1.820	0.02485	0.00053	0.1733	0.0106	0.05194	0.00280	158.2	3.4	164.0	8.4	278.5	136.5	96
21	26.01	441.8	411.5	1.073	0.02590	0.00044	0.1782	0.0140	0.05229	0.00471	164.8	2.7	165.9	12.0	225.9	201.1	99
22	43.15	518.6	472.2	1.097	0.02532	0.00052	0.1724	0.0144	0.04879	0.00382	161.2	3.3	160.9	12.5	123.3	199.9	100
23	38.85	439.9	443.0	0.9828	0.02628	0.00053	0.1775	0.0151	0.04902	0.00416	167.2	3.3	165.2	12.9	95.0	182.5	99
24	16.97	230.1	213.5	1.059	0.02764	0.00110	0.1757	0.0197	0.04652	0.00544	175.8	6.9	166.2	16.2	-49.05	306.91	95
25	14.56	218.6	262.0	0.8164	0.02370	0.00078	0.1773	0.0192	0.05213	0.00653	151.0	4.9	164.6	16.5	293.5	300.6	91
26	27.31	398.6	333.7	1.166	0.02493	0.00081	0.1719	0.0198	0.05008	0.00622	158.7	5.1	159.8	17.2	147.2	297.5	99
27	147.5	2000	1059	1.845	0.02442	0.00034	0.1642	0.0098	0.05005	0.00337	155.5	2.2	156.0	9.2	131.4	159.6	100
28	10.72	114.2	153.5	0.7108	0.02851	0.00132	0.2066	0.0311	0.05418	0.00925	181.2	8.3	187.8	26.7	406.2	375.8	96
29	7.225	73.00	87.91	0.7766	0.02865	0.00201	0.2175	0.0471	0.05228	0.01052	182.0	12.6	200.7	36.8	444.0	390.1	90
30	29.87	420.1	353.7	1.131	0.02489	0.00060	0.1695	0.0206	0.05011	0.00647	158.5	3.7	157.6	17.9	41.13	347.51	99

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值			同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)				
	Pb	Th		U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$						
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
1	17.11	221.9	344.5	0.6224	0.02387	0.00046	0.1772	0.0156	0.05234	0.00459	152.1	2.9	164.9	13.4	304.3	208.0	92
2	7.769	103.8	157.2	0.6476	0.02533	0.00084	0.2008	0.0174	0.05891	0.00500	161.2	5.3	184.9	14.6	468.3	191.2	87
3	7.047	91.03	151.63	0.5950	0.02523	0.00072	0.1741	0.0187	0.05051	0.00571	160.6	4.5	161.9	16.2	73.14	280.56	99
4	8.630	120.4	164.2	0.7081	0.02530	0.00055	0.2580	0.0370	0.07420	0.01038	161.0	3.5	229.4	29.3	939.0	257.5	70
5	9.117	85.47	136.2	0.5982	0.02539	0.00090	0.2643	0.0404	0.07505	0.01077	161.6	5.6	233.8	32.3	1051	280	69
6	11.57	135.7	181.6	0.7260	0.02510	0.00064	0.1637	0.0127	0.04809	0.00353	159.8	4.0	153.4	11.1	124.9	212.8	96
7	5.392	82.02	135.4	0.5896	0.02505	0.00087	0.1692	0.0185	0.04926	0.00600	159.5	5.5	157.7	16.0	125.8	280.7	99
8	13.04	108.2	172.7	0.6053	0.02595	0.00083	0.3419	0.0285	0.09580	0.00773	165.1	5.2	296.7	21.4	1512	143	56
9	10.58	100.7	146.5	0.6761	0.02471	0.00068	0.2440	0.0207	0.07209	0.00645	157.3	4.3	220.5	17.0	960.0	177.9	71
10	56.18	90.30	131.9	0.6796	0.04298	0.00158	2.284	0.180	0.3779	0.0185	271.2	9.8	1193	57	3817	78	0
11	5.958	56.08	88.57	0.6120	0.02682	0.00092	0.1792	0.0265	0.04800	0.00677	170.6	5.7	165.2	22.5	-29.17	360.43	97
12	6.153	71.85	89.54	0.7934	0.02770	0.00091	0.1951	0.0294	0.05060	0.00811	176.1	5.7	178.4	25.1	217.9	352.0	99
13	6.193	67.39	90.78	0.7424	0.02664	0.00088	0.2357	0.0253	0.06458	0.00704	169.5	5.5	213.1	20.8	713.1	218.5	80
14	9.426	98.32	112.1	0.8826	0.02748	0.00088	0.2208	0.0292	0.05898	0.00787	174.7	5.5	200.1	24.1	551.9	259.5	87
15	3.086	38.80	61.70	0.6182	0.02785	0.00095	0.1916	0.0289	0.04915	0.00744	177.0	5.9	175.5	24.4	92.23	364.02	99
16	8.077	25.84	44.54	0.5723	0.03494	0.00203	1.0448	0.0704	0.22104	0.01795	221.3	12.7	721.3	34.4	2964	124	0
17	5.436	48.06	71.14	0.6688	0.03097	0.00086	0.3425	0.0423	0.08368	0.01122	196.6	5.4	301.5	33.6	1197	264	0
18	9.904	83.44	108.1	0.7820	0.02893	0.00072	0.3295	0.0462	0.08442	0.01211	183.8	4.5	284.3	34.0	1147	267	65
19	4.082	42.25	59.41	0.7307	0.02887	0.00108	0.2370	0.0279	0.05774	0.00600	183.5	6.8	218.4	21.3	603.5	239.6	84
20	2.879	29.02	44.52	0.6497	0.02980	0.00151	0.2424	0.0440	0.06125	0.01186	189.2	9.4	215.1	35.8	467.0	515.9	88
21	9.015	56.32	42.34	1.278	0.03248	0.00152	0.9553	0.0823	0.2168	0.0220	206.0	9.5	673.4	42.3	2876	165	0
22	4.624	41.68	56.70	0.7150	0.03037	0.00152	0.3088	0.0358	0.07794	0.01047	192.8	9.5	270.0	27.8	1117	255	71
23	3.889	48.34	68.20	0.7138	0.02808	0.00093	0.1885	0.0321	0.05104	0.00897	178.5	5.9	177.9	29.2	335.7	418.9	100
24	6.196	33.90	59.21	0.5945	0.03032	0.00099	0.4385	0.0439	0.1092	0.0112	192.5	6.2	365.3	30.7	1683	191	53
25	18.09	38.19	61.58	0.6225	0.03876	0.00169	1.463	0.1114	0.2853	0.02557	245.1	10.5	926.9	53.0	3391	143	0
26	8.648	35.81	54.83	0.6449	0.03649	0.00117	0.8541	0.0816	0.1695	0.0189	232.3	7.7	627.1	47.4	2512	192	37
27	13.71	37.19	67.24	0.5529	0.03554	0.00104	1.086	0.083	0.2275	0.0169	225.1	6.5	739.8	40.6	2987	127	0
28	21.92	161.8	160.3	0.9768	0.02976	0.00072	0.3679	0.0244	0.09228	0.00611	189.0	4.5	316.8	18.2	1453	134	60
29	10.37	58.85	94.00	0.6334	0.03050	0.00085	0.6535	0.0474	0.1570	0.0119	193.6	5.3	507.1	29.0	2394	138	38
30	25.34	73.81	111.20	0.6555	0.03364	0.00092	1.2208	0.0655	0.2623	0.0137	213.3	5.7	806.4	29.9	3256	89	0

SQZ05 安山玄武岩角砾

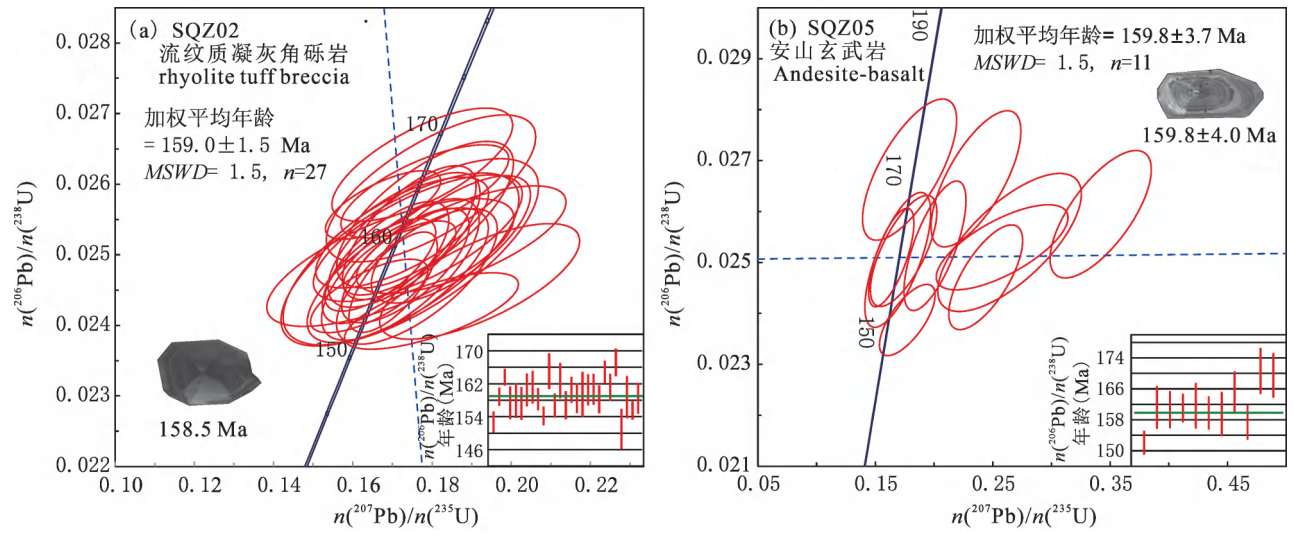


图 5 四海盆地水泉子村上侏罗统髻髻山组中部流纹质凝灰角砾岩 (a) 和下部安山玄武岩角砾 (b) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams for zircon grains from the rhyolitic tuff breccia (a) and andesite—basaltic breccia (b) of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation in Shuiquanzi Village, the Sihai Basin

$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 159.0 ± 1.5 Ma (图 5a)。

安山玄武岩(角砾)锆石多呈无色,自形—半自形柱状为主,少量颗粒为他形粒状,颗粒长径 100~200 μm ,长宽比在 1.3:1~2.8:1 之间。在阴极发光图像中,锆石具有清晰的内部结构,多数具有暗色核部,边部振荡环带明显,不具有变质增生边(图 6),边部 Th/U 值主要分布于 0.55~0.97 之间,仅有 1 颗锆石 Th/U 值为 1.27,具有典型的岩浆锆石成

因特征。安山玄武岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果见表 1。

安山玄武岩年代学分析共测试 30 颗锆石 30 个点,其中点 10、16、17、21、25、27、30 等 7 个点远离谐和线,剩余 23 个点中,点 12、14、15、18、19、20、22、23、24、26、28、29 等 12 个点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄分布于 174~232 Ma 之间,代表安山玄武岩岩上升捕获的锆石年龄或混合年龄;其余 11 个点的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄集中于 152.0~170.7 Ma

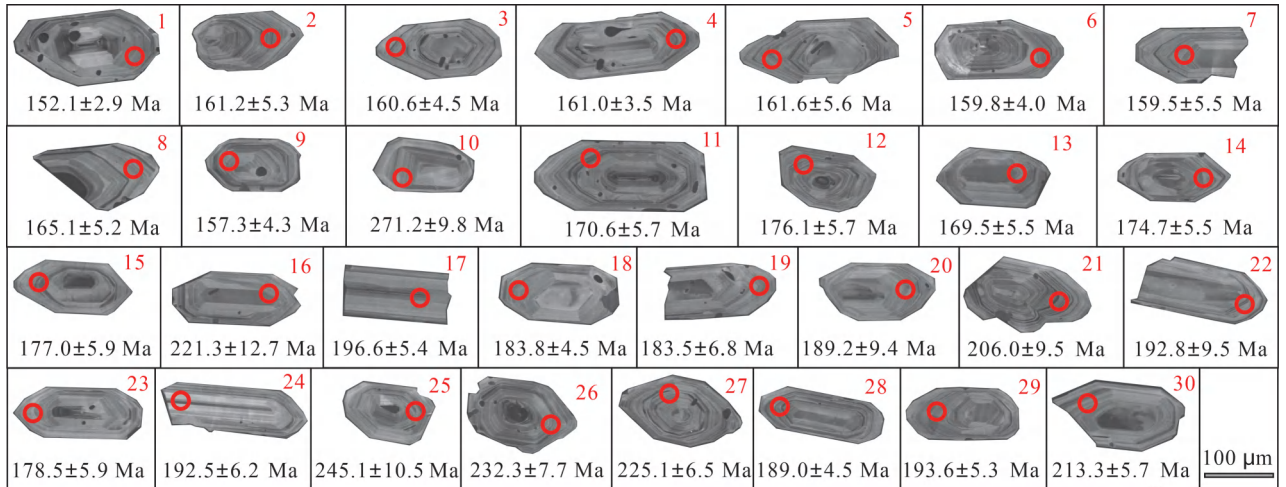


图 6 四海盆地水泉子村上侏罗统髻髻山组下部安山玄武岩角砾 (SQZ05) 中锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of Zircons from the andesite—basaltic breccia (SQZ05) selected from the bottom of the Upper Jurassic Tiaojishan Formation in Shuiquanzi Village, the Sihai Basin

之间,且都在谐和线附近,表明这些锆石在形成后 U-Pb 同位素保持封闭状态。所形成的谐和曲线下交点年龄为 159.8 ± 3.6 Ma, 其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 159.8 ± 3.7 Ma(图 5b)。

4 讨论

4.1 水泉子村髻髻山组岩性组合及其形成环境

前人研究显示四海盆地髻髻山组火山岩以粗安岩—(粗面岩+流纹岩)组合为特征(姬广义和汪洋, 2002)。本次调查在四海盆地中部水泉子村髻髻山组发现玄武岩类岩石组合。该剖面自北向南依次出露安山玄武质沉火山岩、流纹质火山角砾岩、玄武质角砾岩、安山玄武质角砾岩、安山玄武质沉火山岩、流纹质角砾凝灰岩、气孔杏仁玄武岩、安山玄武岩等火山岩、火山碎屑岩。值得注意的是,该剖面未发现北京西山、河北承德和辽西等地区髻髻山组中常见的安山岩类,具有显著的“玄武质+流纹质”双峰式火山岩组合特征。此岩性特征与冀西北宣化地区同期地层具有可比性,但后者以玄武岩—粗面岩组合为主(白春东等, 2024a, 2024b; 杨济远等, 2024)。

双峰式火山岩组合作为重要的构造环境指示标志,通常指示裂谷环境或弧后伸展环境(王焰等, 2000; 邓晋福等, 2015; 白春东等, 2024b)。区域地质化学研究表明,四海地区髻髻山组—后城组火山岩系包含高钾钙碱性系列、富钾质的拉斑系列和过渡型高钾钙碱性系列的三套岩石,形成于燕山早、中期变形事件结束后的造山带环境中(汪洋和姬广义, 2003)。该套地层序列完整记录了从断陷盆地到坳陷盆地的构造转换过程,其火山—沉积演化序列揭示出完整的主动裂谷过程(邵济安等, 2003)。本研究揭示的玄武岩—流纹岩组合,与前人研究成果相一致,均表明四海盆地的形成受控于晚侏罗世早期的裂谷作用或弧后伸展环境。

4.2 水泉子村髻髻山组形成时代

经锆石 U-Pb 年代学分析,本次工作在水泉子村髻髻山组地层剖面下部沉火山岩中的安山玄武岩角砾获得锆石 U-Pb 年龄为 159.8 ± 3.7 Ma; 剖面中部流纹质角砾凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 159.0 ± 1.5 Ma; 顶部气孔、杏仁玄武岩的锆石 U-Pb 年龄较为分散,不过有 10 个测点大致形成谐和年龄 155.3 ± 2.0 Ma(有待进一步验证)。这些年龄值表明延庆四海火山岩盆地中髻髻山组形成时代主要为晚侏罗世早—中期。需要注意的是,在锆石年龄的误差范围($\pm 1.5 \sim 3.7$ Ma)内,水泉子村髻髻山组下部玄武

岩(159.8 Ma)与中部流纹岩(159.0 Ma)的形成时代相近,这暗示裂谷初期壳幔岩浆系统的快速响应。

关于髻髻山组的形成时代,北京地区至今未在该地层找到化石。《北京市岩石地层》认为这套火山岩层的形成时代在晚侏罗世初期,但火山活动的起始阶段可能在中侏罗世末,即卡洛夫期(Cillovian)的晚期就已开始(北京市地质矿产局, 1996)。《中国区域地质志·北京志》结合近几年研究成果,将髻髻山组的时代重新厘定为中—晚侏罗世(北京市地质调查研究所, 2025)。于海飞等(2016)在北京北山南部十三陵地区的髻髻山组地层中获得了 157.2~153.1 Ma 的锆石 U-Pb 年龄。本文的年代学分析结果与前人的同位素年龄结果范围相吻合,且与野外地质关系一致,这表明北山地区的髻髻山组主要形成于晚侏罗世早—中期。同时髻髻山组火山岩的喷发是区域应力由挤压改为拉张的产物(张宏仁, 2016),标志着标志着该地区燕山运动“绪动/A 幕”应发生于 159.8 ± 1.5 Ma 之前。

4.3 地质意义

在北京地区,髻髻山组主要形成于两种盆地:一是继承盆地,其盆地内侏罗纪沉积始于南大岭组等地层,髻髻山组平行不整合于九龙山组之上,如京西髻髻山和昌平十三陵等地即为此类;二是中晚侏罗世新生盆地,盆地中侏罗纪沉积始于髻髻山组地层,髻髻山组火山岩系角度不整合于前中生代地层之上,本研究所处的四海盆地属于此类(北京市地质调查研究院, 2025)。水泉子村髻髻山组双峰式火山岩组合及其与前中生代地层的不整合接触,共同表明其可能形成于新生裂谷环境,与四海盆地构造—沉积环境相吻合。继承盆地如髻髻山等地构造线以近东西向为主,在区域上与蒙古—鄂霍茨克海闭合及之后的陆—陆碰撞事件相协调;新生盆地如四海盆地整体以北东—南西走向构造线为主,区域上与古太平洋板块俯冲事件相一致(赵越等, 2004; Ma and Xu, 2021; Guo Jianfang et al., 2022)。这表四海地区髻髻山组火山岩系主要受太平洋构造域影响。

本研究获得的锆石 U-Pb 年龄(图 7 红色年龄值)为厘定燕山中部髻髻山组的时代框架提供了关键约束。从区域资料来看,辽西地区的髻髻山组(蓝旗组)形成时代分布于 170~153 Ma 之间(杨蔚和李曙光, 2005; 李斌等, 2019);冀北(承德—滦平)—辽西的髻髻山组同位素年龄分布于 165~153 Ma 之间(Davis et al., 2001; 张宏等, 2005; 刘建等, 2006; 张宏等, 2008);北京西山大台、马兰村等地的

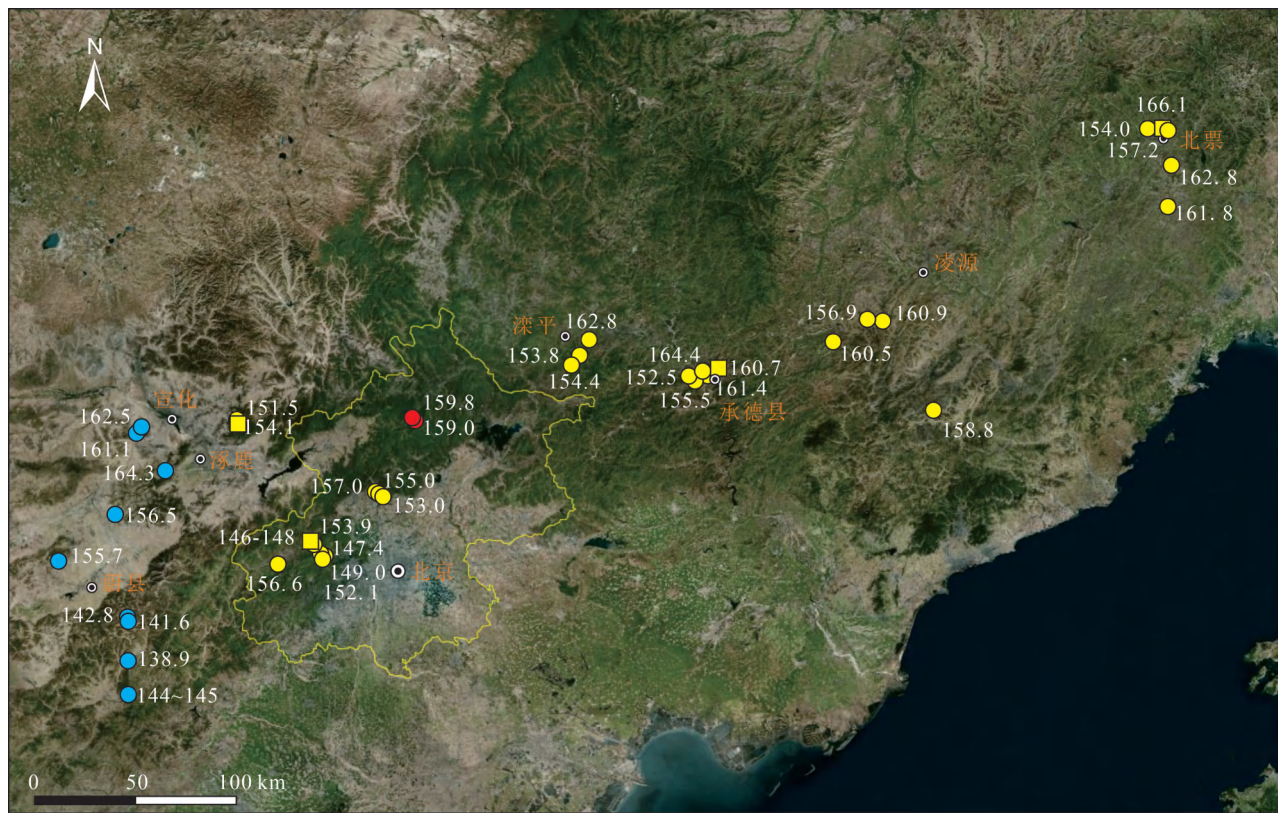


图 7 华北地区髻髻山组年龄值(Ma)及其分布(基于 Bing 卫星影像)

Fig. 7 The ages and distribution of the Tiaojiashan Formation in North China (based on Bing images)

圆圈为锆石 U-Pb 年代学分析成果,方框为 Ar-Ar 年代学分析成果。数据引自: Davis et al., 2001; 李伍平等, 2001; 张宏等, 2005; 刘健等, 2006; 申志超等, 2015; 于海飞等, 2016; 段超等, 2016; 李斌等, 2019; Gao Jianfang et al., 2022; 白春东等, 2024a, 2024b; 杨济远等, 2024; 吴炳伟等, 2024

Circles are the results of U-Pb dating, Squares are the results of Ar-Ar dating. Data from: Davis et al., 2001; Li Wuping et al., 2001& Zhang Hong et al., 2005& Liu Jian et al., 2006& Sheng Zhichao et al., 2015& Yu Haifei et al., 2016& Duan Chao et al., 2016& Li Bin et al., 2019#; Gao Jianfang et al., 2022; Bai Chundong et al., 2024a& 2024b& Yang Jiyuan et al., 2024& Wu Bingwei et al., 2024&

髻髻山组形成时代分布于 157~146 Ma 之间(李伍平等, 2001; 赵越等, 2004; 于海飞等, 2016), 整体上具有由东向西逐渐变年轻的趋势。Guo Jianfang 等(2022)在前人工作基础上, 对辽西、平泉—承德—滦平、京西—宣化和蔚县等地区的髻髻山组进行了锆石 U-Pb 和全岩 Ar-Ar 年代学和锆石 Hf 同位素专题研究, 分别获得了 166~153 Ma、162~153 Ma、158~142 Ma 和 157~142 Ma 的年龄, 同样具有东西向趋势(图 7 黄色), 结合锆石 Hf 同位素模式年龄分析, 认为髻髻山组的形成与古太平洋以类似于北美西部当前正在进行的平板俯冲作用相关, 为自东向西深入大陆内部的弧火山岩。北京北山位于平泉—承德—滦平和京西—涿鹿两个地区之间, 填补了前人研究的空白区域, 区内髻髻山组的锆石 U-Pb 年龄分布于 159.8~153.1 Ma 之间(于海飞等, 2016; 本文), 其下限年龄也位于两个地区髻髻山组下限

年龄之间(图 7)。这些火山岩共同构成自东向西年龄逐渐变年轻的时空格局, 支持了燕山地区髻髻山组地层的形成主要受古太平洋构造域控制的观点。

然而, 近年在冀西北宣化—蔚县地区获得的髻髻山组火山岩年代学分析成果显示, 该地区髻髻山组年龄变年轻的趋势为由北向南, 从 164~161 Ma (白春东等, 2024; 杨济远等, 2024) 逐渐递减为 143~141 Ma (Gao Jianfang et al., 2022), 如图 7 中蓝色年龄所示。并且从北京北山至北京西山至太行山北部的王安镇、木吉村等地也存在年龄逐渐递减的大趋势, 由约 160 Ma 递减至约 139 Ma (于海飞等, 2016; 申志超等, 2015; 段超等, 2016; 本文)。以上分析表明在燕山东部地区髻髻山组地层主要受古太平洋构造域的影响, 但在西部地区可能主要受古亚洲洋构造域控制。此外, 前人曾在四海盆地西北侧千家店地区的土城子组地层中获得 160~156 Ma 的锆

石 U-Pb 年龄 (焦润成等, 2016; Fu Zibo et al., 2018); 在京西九龙山组地层底部的凝灰岩中获得了 161 Ma 和 154 Ma 两个年龄峰值 (李海龙等, 2014), 这些地层与髻髻山组的关系等等问题均需进一步研究梳理。

5 结论

(1) 北京水泉子村髻髻山组发育一套由玄武质—流纹质火山熔岩及火山碎屑岩构成的双峰式火山岩组合。结合区域地质背景, 认为该套地层沉积时期新生的四海裂谷盆地已进入活跃伸展阶段, 标志着燕山构造带由早中生代挤压体制向晚中生代伸展体制的重要转折。

(2) 锆石 U-Pb 测年结果显示: 剖面下部玄武质沉火山岩中安山玄武质角砾岩的结晶年龄为 159.8 ± 3.8 Ma ($MSWD = 1.2$), 中部流纹质凝灰岩角砾岩的喷发年龄为 159.0 ± 1.5 Ma ($MSWD = 0.8$)。精细的年代学框架限定四海地区髻髻山组主体形成于晚侏罗世早期, 对应于古太平洋板块向欧亚大陆北西向俯冲的关键构造活化期。

(3) 构造解析表明: 呈 NE—SW 向展布的四海裂陷盆地与髻髻山组火山岩的时空迁移规律存在成因联系。区域对比揭示, 燕山造山带内部髻髻山组火山活动具有明显的穿时性特征: 自东向西年龄序列呈现由老至新的递变趋势 (东段 170~160 Ma 递减为西段 160~150 Ma)。这种规律性的时空演化格局, 结合同期华北克拉通东缘弧岩浆作用的迁移规律, 共同支持燕山地区晚侏罗世髻髻山组火山岩的形成主要受控于古太平洋板块的平板俯冲机制。该俯冲过程引发的弧后伸展作用可能是导致燕山构造带发生陆内裂陷和双峰式岩浆喷发的重要动力学诱因。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白春东, 许凡, 李泽阳, 孟家葆, 朱本鸿. 2024a. 冀西北地区中侏罗世玄武岩的首次发现及其地质意义. 地质论评, 70 (3): 1127~1138.

白春东, 许凡, 李泽阳, 孟家葆, 杨济远, 朱本鸿, 申伍军. 2024b. 华北克拉通北缘宣化一带中侏罗世双峰式火山岩的发现及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 43(3): 636~653.

北京市地质调查所. 1990. 琉璃庙幅地质图 [地质图/1:50000]. 北京: 地质出版社.

北京市地质调查研究所. 2025. 中国区域地质志·北京志. 北京: 地质出版社.

北京市地质研究所. 1993. 四海幅地质图 [地质图/1:50000]. 北京: 地质出版社.

北京市地质矿产局. 1996. 北京市岩石地层. 北京: 中国地质大学出版社.

邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61 (3): 473~484.

邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评, 46 (1): 41~48.

董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡健民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81 (11): 1449~1461.

段超, 毛景文, 谢桂青, 陈志宽, 马国玺, 王志敏, 陈焘, 李伟. 2016. 太行山北段木吉村髻髻山组安山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其对区域成岩成矿规律的指示. 地质学报, 90 (02): 250~266.

葛肖虹. 1989. 华北板内造山带的形成史. 地质论评, 35 (3): 254~261.

姬广义, 汪洋. 2002. 北京市凤鸵梁四海地区中生代地层基本层序. 北京地质, 14 (1): 1~12.

焦润成, 贺瑾瑞, 王荣荣, 王强强, 回广驥. 2016. 北京北部千家店土城子组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年及启示. 中国地质, 43 (5): 1750~1760.

李斌, 陈井胜, 刘森, 杨帆, 吴振, 杜继宇. 2019. 辽西髻髻山组的形成时代及地球化学特征. 地质论评, 65(增刊1): 63~64.

李海龙, 张宏仁, 渠洪杰, 蔡向民, 王猛. 2014. 燕山运动“绪动/A 幕”的本意及其锆石 U-Pb 年代学制约. 地质论评, 60(5): 1026~1042.

李三忠, 赵国春, 孙敏. 2016. 华北克拉通早元古代拼合与 Columbia 超大陆形成研究进展. 科学通报, 61 (9): 919~925.

李伍平, 陆凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 2001. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. 岩石矿物学杂志, 20 (2): 123~133.

李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. 地质学报, 89 (12): 2400~2418.

刘健, 赵越, 柳小明. 2006. 冀北承德盆地髻髻山组火山岩的时代. 岩石学报, 22 (11): 2617~2630.

邵济安, 孟庆任, 魏海泉, 张履桥, 王佩瑛. 2003. 冀西北晚侏罗世火山—沉积盆地的性质及构造环境. 地质通报, 10 (11): 751~761.

申志超, 侯增谦, 于枫, 陈志宽, 李秋耘, 马国玺, 葛峰, 王志敏. 2015. 太行山北段王安镇杂岩体中酸性岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 31(05): 1409~1420.

宋鸿林. 1999. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨. 地学前缘, 6 (4): 309~317.

王焰, 钱青, 刘良, 张旗. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征. 岩石学报, 16 (02): 169~173.

汪洋, 姬广义. 2003. 北京四海地区髻髻山组—后城组火山岩岩石化学特征. 北京地质, 15 (1): 1~11.

王瑜. 1996. 晚古生代末—中生代内蒙古—燕山地区造山过程中的岩浆热事件与构造演化. 现代地质, 10 (1): 66~75.

吴炳伟, 孙守亮, 张健, 周铁锁, 张海华, 崔晓磊, 张子璟, 孙转. 2024. 辽西金羊盆地髻髻山组火山岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩石地球化学特征. 华北地质, 47(4): 37~46.

杨济远, 胡新茁, 周敬, 齐朋超, 李泽阳, 孟家葆, 许凡, 张会彬, 齐慧云. 2024. 冀西北宣化盆地髻髻山组粗面岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 物探与化探, 48 (1): 1~14.

杨蔚. 2007. 辽西中生代火山岩年代学及地球化学研究: 对华北克拉通岩石圈减薄机制的制约. 导师:李曙光. 合肥: 中国科学技

- 术大学博士学位论文: 1~104.
- 于海飞, 张志诚, 帅歌伟, 陈彦, 汤文豪. 2016. 北京十三陵—西山髻髻山组火山岩年龄及其地质意义. *地质论评*, 62 (4): 807~826.
- 翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化. *地质力学学报*, 25 (5): 722~745.
- 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜. 2011. 燕山—太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 41 (5): 593~617.
- 张宏, 王明新, 柳小明. 2008. LA-ICP-MS 测年对辽西—冀北地区髻髻山组火山岩上限年龄的限定. *科学通报*, 53 (15): 1815~1824.
- 张宏, 袁洪林, 胡兆初, 柳小明, 第五春荣. 2005. 冀北滦平地区中生代火山岩地层锆石 U-Pb 测年及启示. *地球科学*, 30 (6): 707~720.
- 张宏仁. 1998. 燕山事件. *地质学报*, 72 (2): 103~111.
- 张宏仁. 2016. "燕山运动"的分期及几个关键问题. *地质学报*, 90 (9): 2176~2180.
- 张宏仁, 张永康, 蔡向民, 渠洪杰, 李海龙, 王猛. 2013. 燕山运动的"绪动"——燕山事件. *地质学报*, 87 (12): 1779~1790.
- 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. *中国科学 (D 辑)*, 32 (7): 538~550.
- 赵盼, 徐备, 陈岩. 2023. 蒙古—鄂霍茨克洋: 演化过程和最终闭合. *中国科学: 地球科学*, 53 (11): 2541~2559.
- 赵越, 崔盛芹, 郭涛, 徐刚. 2002. 北京西山侏罗纪盆地演化及其构造意义. *地质通报*, 21 (4~5): 211~217.
- 赵越, 徐刚, 张栓宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡建民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. *地学前缘*, 11 (3): 319~328.
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. *地质科学*, 29 (2): 105~119.
- Bai Chungong, Xu Fan, Li Zeyang, Meng Jiabao, Zhu Benhong. 2024a&. The first discovery of Middle Jurassic basalts in Northwestern Hebei Province and its geological significance. *Geological Review*, 70 (3): 1127~1138.
- Bai Chungong, Xu Fan, Li Zeyang, Meng Jiabao, Yang Jiyuan, Zhu Benhong, Shen Wujun. 2024b&. Discovery of Middle Jurassic bimodal volcanic rocks in the Xuanhua district on the northern edge of the North China Craton and their geological significances. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43 (3): 636~653.
- Beijing Geological Survey and Research Institute. 1990#. The 1:50000 Geological Map of the Liulimiao Map-sheet. Beijing: Geological Publishing House.
- Beijing Geological Survey and Research Institute. 2025#. Regional Geology of China; Beijing volume. Beijing: Geological Publishing House.
- Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources. 1996#. Rock strata in Beijing. Beijing: China University of Geosciences Press.
- Beijing Institute of Geology. 1993#. The 1:50000 Geological Map of the Sihai Map-sheet. Beijing: Geological Publishing House.
- Davis G A, Zheng Yadong, Darby B J, Zhang Changhou, Geherls G. 2001. Mesozoic tectonicevolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. *Memoirs—Geological Society of America*, 194: 171~197.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Lu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015&. Magmatic arc and ocean—continent transition: discussion. *Geological Review*, 61 (3): 473~484.
- Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Dai Shengqian, Li Kaiming. 2000&. Yanshanian igneous petroectonic assemblage and orogenic—deep processes in east China. *Geological Review*, 46 (1): 41~48.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxiang, Yang Zheyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007&. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81 (11): 1449~1461.
- Duan Chao, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Zhikuan, Ma Guoxi, Wang Zhimin, Chen Tao, Li Wei. 2016&. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotope study on Tiaojishan Volcanic Formation, Mujicun, North Taihang Mountain and implications for regional metallogeny and magmatism. *Acta Geologica Sinica*. 90 (02): 250~266.
- Fu Zibo, Zhao Yue, Liu Junlai, Zhang Shuanghong, Gao Hailong. 2018. Revisiting of the Yanshanian basins in western and northern Beijing, North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 163: 90~107.
- Ge Xiaohong. 1989&. The history of formation of intraplate orogenic belts in the north China paleoplate. *Geological Review*, 35 (3): 254~261.
- Godefroit P, Cau A, Hu Dongyu, Escuillie F, Wu Wenhao, Dyke G. 2013. A Jurassic avialan dinosaur from China resolves the early phylogenetic history of birds. *Nature*, 498: 359~362.
- Guo Jianfang, Ma qiang, Xu Yigang, Zheng Jianping, Zou Zuyang. 2022. Migration of Middle—Late Jurassic volcanism across the northern North China Craton in response to subduction of Paleopacific Plate. *Tectonophysics*, 833: 1~13.
- Ji Guangyi, Wang Yang. 2002&. The Mesozoic Stratigraphic Sequence in the Fengtuoliang—Sihai Area, Beijing. *Beijing Geology*, 14 (1): 1~12.
- Jiao Runcheng, He Jinrui, Wang Rongrong, Wang Qiangqiang, Hui Guangji. 2016&. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from Tuchengzi Formation in Qianjiadian of North Beijing and its significance. *Geology in China*, 43 (5): 1750~1760.
- Li Bin, Chen Jingsheng, Liu Miao, Yang Fan, Wu Zhen, Du Jiyu. 2019#. Formation age and geochemical characteristics of the Tiaojishan Formation in the Western Liaoning Province. *Geological Review*, 65 (Supp 1): 63~64.
- Li Hailong, Zhang Hongren, Quhongjie, Cai Xiangmin, Wang Meng. 2014&. Initiation, the first stage of the Yanshan (Yenshan) Movement in Western Hills, constraints from zircon U-Pb dating. *Geological Review*, 60 (5): 1026~1042.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Ming. 2016&. Paleoproterozoic amalgamation of the North China Craton and the assembly of the Columbia supercontinent. *Chinese Science Bulletin*, 61: 919~925.
- Li Wuping, Lu Fengxiang, Li Xianhua, Zhou Yaoqi, Sun Shanping, Li Jiazhen, Zhang Dagang. 2001&. Geochemical Features and Origin of Volcanic Rocks of the Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing. *ACTA Petrologica et Mineralogica*, 20 (2): 123~133.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Men En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015&. U-Pb dating study of baddeleyite by LA-ICP-MS: technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 89 (12): 2400~2418.
- Liu Jian, Zhao Yue, and Liu Xiaoming. 2006&. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chengde Basin, northern Hebei province. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (11): 2617~2630.
- Ma Qiang, Xu Yigang. 2021. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia.

- Earth Science Reviews, 13: 103473.
- Shao Ji'an, Meng Qingren, Wei Haiquan, Zhang Luqiao, Wang Peiyong. 2003&. Nature and tectonic environment of Late Jurassic volcanic—sedimentary basins in northwestern Hebei Province. Geological Bulletin of China, 10 (11): 751~761.
- Sheng Zhichao, Hou Zengqian, Yu Feng, Chen Zhikuan, Li Qiuyun, Ma Guoxi, Ge Feng, Wang Zhimin. 2015&. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the intermediate—acidic rocks of Wanganzhen complex in northern part of Taihang Mountains and their geological implications. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1409~1420.
- Song Honglin. 1999&. Characteristics of Yanshan-Type interplate orogenic belts and a discussion on its dynamics. Earth Science Frontiers, 6 (4): 309~317.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Ge Wenchun. 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent; Mesozoic—Paleogene magmatic records in Northeast Asia. Science China Earth Sciences, 61: 527~559.
- Wang Yan, Qianqing, Liu Liang, Zhang Qi. 2000&. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. Acta Petrologica Sinica, 16(02): 169~173.
- Wang Yang, Ji Guangyi. 2003&. A Preliminary Discussion on Petrochemical Characteristics of the Volcanic Rocks of Tiaojishan—Houcheng Formation in Sihai Area, Beijing Municipality. Beijing Geology, 15 (1): 1~11.
- Wang Yu. 1996&. Magmatic Thermal events and Tectonic Evolution of orogenic processes in Inner Mongolia—Yanshan Orogenic belt during end of Late Paleozoic Mesozoic. Geoscience (Journal of Graduate school, China University of Geosciences), 10 (1): 66~75.
- Wong Wenhao. 1927. Crustal Movements and Igneous Activities in Eastern China Since Mesozoic Time. Bulletin of the Geological Society of China, 6 (1): 9~36.
- Wong Wenhao, 1929. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China. Bulletin of the Geological Society of China, 8 (1): 33~44.
- Wu Bingwei, Sun Shouliang, Zhang Jian, Zhou Tiesuo, Zhang Haihua, Cui Xiaolei, Zhang Zijing, Sun Zhuan. 2024&. In-situ U-Pb dating, Hf isotope analyses of zircons, and geochemical characteristics in the volcanic rocks of the Tiaojishan Formation in the Jinyang Basin, western Liaoning Province. North China Geology, 47(4): 37~46.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Xu Yigang, Wilde S A, Walker R J. 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47 (1): 173~195.
- Xu Wenliang, Pei Fuping, Wang Feng, Meng En, Ji Weiqiang, Yang Debin, Wang Wei. 2013. Spatial temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China; constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. Journal of Asian Earth Science, 74: 167~193.
- Yang Jiuyan, Hu Xinzhuo, Zhou Jing, Qi Pengchao, Li Zeyang, Meng Jiabao, Xu Fan, Zhang Huibin, Qi Huiyun. 2024&. Chronology and geochemical characteristics of trachytes in the Tiaojishan Formation, Xuanhua Basin, northwestern Hebei Province, and their geological implications. Geophysical and Geochemical Exploration, 48(1): 1~14.
- Yang Wei. 2007&. Chronological and geochemical studies of Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning: constraints on the thinning mechanism of the lithosphere in the North China Craton. Hefei: PhD thesis from University of Science and Technology of China; 1~104.
- Yu Haifei, Zhang Zhicheng, Shuai Gewei, Chen Yan, Tang Wenhao. 2016&. SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb ages and geological significance of the volcanic rocks in the Tiaojishan Formation in Ming Tombs area—Western Hills, Beijing. Geological Review, 62 (4): 807~826.
- Zhai Mingguo. 2019&. Tectonic evolution of the North China Craton. Journal of Geomechanics, 25 (5): 722~745.
- Zhang Changhou, Li Chengming, Deng Hongling, Liu Yang, Liu Lei, Wei Bo, Li Hanbin, Liuzi. 2011&. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 54: 798~822.
- Zhang Hong, Wang Mingxin, Liu Xiaoming. 2008&. Constraints on the upper boundary age of the Tiaojishan Formation volcanic rocks in West Liaoning—North Hebei by LA-ICP-MS dating. China Science Bulletin, 53: 3574~3584.
- Zhang Hong, Yuan Honglin, Hu Zhaochu, Liu Xiaoming, Diwu Chunrong. 2005&. U-Pb Zircon Dating of the Mesozoic Volcanic Strata in Luanping of North Hebei and Its significance. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 30 (6): 707~720.
- Zhang Hongren. 1998&. Yanshan Event. Acta Geologica Sinica, 72 (2): 103~111.
- Zhang Hongren. 2016&. The phasing of Yanshan Movement and its several important questions. Acta Geologica Sinica, 90 (9): 2176~2180.
- Zhang Hongren, Zhang Yongkang, Cai Xiangmin, Qu Hongjie, Li Hailong, Wang Meng. 2013&. The triggering of Yanshan Movement; Yanshan Event. Acta Geologica Sinica, 87 (12): 1779~1790.
- Zhang Jiheng, Gao Shan, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Wilde S A, Li Ming. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China; implications for subduction-induced delamination. Chemical Geology, 276: 144~165.
- Zhao Guochun, Sun Ming, Wilde S A. 2002#. Characteristics of the basement tectonic units of the North China Craton and its assembly in early Precambrian. Science in China (Series D). 32 (7): 538~550.
- Zhao Pan, Xu Bei, Chen Yan. 2023#. Mongolia Okhotsk Ocean: Evolutionary Process and Final Closure. Science China Earth Sciences, 53 (11): 2541~2559.
- Zhao Yue, Cui Shenqin, Guo Tao, Xu Gang. 2002&. Evolution of a Jurassic basin of the Western Hills, Beijing, North China and its tectonic implications. Geological Bulletin of China, 21 (4~5): 211~217.
- Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, Yang Zhenyu. 2004&. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. Earth Science Frontiers, 11 (3): 319~328.
- Zhao Yue, Yang Zhenyu, Ma Xinghua. 1994&. Geotectonic transition from paleoasian system and paleotethyan System to paleopacific active continental margin in Eastern Asia. Scientia Geologica Sinica, 29 (2): 105~119.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012. Destruction of the North China Craton. Science China—Earth Sciences, 55: 1565~1587.

LA-ICP-MS U-Pb ages and geological significance of Upper Jurassic Tiaojishan Formation in Sihai Basin, central Yanshan Mountains

ZHENG Yilong, HE Jinrui, WU Jiayue, YU Zhaolin, RAN Shuhong,

SUN Lin, AN Liwei, WANG Hongchu

Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing, 100120

Objectives: Volcanic rocks of the Tiaojishan Formation are extensively distributed in the Yanshan Mountains and are crucial for understanding the large-scale tectonic—magmatic activity during Yanshan movement. Although the age of the Tiaojishan Formation has been discussed by previous studies, most have focused on the eastern and western parts of the Yanshan Mountains. Consequently, the timing and petrogenesis of the Tiaojishan Formation in the central Yanshan, particularly the Sihai Basin, remain poorly constrained. A bimodal volcanic rock assemblage has been identified within the Tiaojishan Formation section at Shuiquanzi Village, Sihai Basin, central Yanshan Mountains. To obtain the ages and geological significance of the volcanic rocks of the Tiaojishan Formation, a geological section was measured through the formation, and systematic samples were collected for isotope geochronological analysis.

Methods: Based on detailed field geological survey, Petrological and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological analysis are employed to reveal the formation age and environment of the Tiaojishan Formation.

Results: Vesicular amygdaloidal basalt and andesitic basaltic sed-volcanic rocks were discovered for the first time within the Tiaojishan Formation in the Shuiquanzi Village, Sihai Basin, Central Yanshan Mountains. These mafic rocks, together with previously discovered rhyolite, constitute a bimodal volcanic suite, indicating deposition in a rift basin. Petrological and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological analysis were conducted on andesite—basalt (sampled from the lower part) and rhyolite volcanic breccia (sampled from the middle part). The results indicate that andesite—basalt crystallized at 159.8 ± 3.7 Ma, and rhyolite volcanic breccia at 159.0 ± 1.5 Ma. Combined with previous dating results, these ages demonstrate that the Tiaojishan Formation in the Yanshan Mountains was primarily formed in the early Late Jurassic. These new ages fill a critical gap in the central Yanshan Mountains and align with the westward younging trend of Tiaojishan volcanism, extending from eastern Liaoning (170~153 Ma) to the northwestern Hebei (157~146 Ma).

Conclusions: The Sihai Basin represents a NE—SW-trending rift basin formed during the early to middle Yanshan Movement (pre-160 Ma). The bimodal volcanism and precise geochronology support a tectonic model where Paleo-Pacific slab subduction triggered westward-migrating mantle melting and crustal extension. These findings refine the spatiotemporal framework of Jurassic magmatism and enhance understanding of subduction-related lithospheric thinning in East Asia.

Keywords: North China Craton; Tiaojishan Formation; bimodal volcanic rocks; zircon U-Pb ages; Yanshan Mountains, Yanshanian Movements

Acknowledgements: The study was financially supported by the China Geological Survey's project (Nos. 1212011220044, DD20190074, DD20221771)

First author: ZHENG Yilong, male, born in 1986, Ph. D., engineer, is mainly engaged in structural geology; Email: zhengyl011051@163.com

Corresponding author: HE Jinrui, male, born in 1984, senior engineer, is mainly engaged in geological relics; Email: laurry@qq.com

Manuscript received on: 2025-01-24; Accepted on: 2025-06-11; Published online on: 2025-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.065

Edited by: ZHANG Yuxu