北京十三陵一西山髫髻山组火山岩年龄 及其地质意义

于海飞,张志诚,帅歌伟,陈彦,汤文豪

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京大学地球与空间科学学院,北京,100871

内容提要:北京西北部地区分布着大量的火山岩,对北京西山大台和十三陵地区的髫髻山组火山岩分别进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 和 LA-ICP-MS 定年,并对十三陵地区的髫髻山组火山岩进行了地球化学研究。结果表明,十三陵 地区的髫髻山组火山岩地球化学特征和北京西山髫髻山组火山岩具有相似性。火山岩地球化学特征表现为高 Al₂O₃、CaO、Na₂O,低 TiO₂和 MgO,在 TAS 图中落入粗安岩和英安岩区域,REE 分馏明显,LREE 富集,HREE 亏损,Eu 异常不明显,富集大离子亲石元素 K、Sr、Ba,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti,高的 Sr/Y 比值,同时 Yb 和 Y 的含量较低。 在大台地区,分别获得了髫髻山组火山岩底部角砾岩和中部安山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 152.1±1.9Ma、149 ±2Ma,侵入到髫髻山组下覆九龙山组地层中一闪长岩岩床年龄为 149±3.2Ma;在十三陵地区,分别获得了髫髻山 组底部凝灰岩、中部火山角砾岩和上部安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 157.2±1.2Ma、155.2±1.7Ma、 153.1±2.2Ma。结合前人研究,十三陵地区髫髻山组火山时代为 157~153Ma,大台地区髫髻山组火山活动时间为 152~137Ma,十三陵地区的火山活动时间要稍早于北京西山大台地区。大台地区和十三陵地区地球化学、地质年代 学及区域地质特征表明,北京西山和十三陵地区喷发时间的差异是由于燕山运动所形成不整合面的穿时性导致的, 位于髫髻山组之下的不整合是一个主不整合面。

关键词:北京西山;十三陵;髫髻山组;燕山运动;不整合面;穿时性

华北克拉通于古元古代末形成,在侏罗纪一白 垩纪时东部转变为挤压造山带。为此,中国地质学 的先驱者之一一翁文灏最早提出了燕山运动,指的 是发生在华北燕山地区中晚侏罗世时期的重大构造 事件(Wong, 1927, 1929)。并将其划分为"绪动/A 幕",中间幕和侏罗纪末期的 B 幕。关于燕山运动 的性质,大多数学者认同燕山运动是中国东部近东 西向的特提斯构造域向北北东向的滨太平洋构造域 的转换,是从大陆碰撞构造体制转为以西太平洋陆 缘俯冲构造体制为主导的陆内变形和陆内造山(赵 越等, 1994, 2004; 董树文等, 2007; 张岳桥等, 2007)。燕山造山带地处华北克拉通的东北部(图 1a),属于板内造山带(葛肖虹, 1989, 宋鸿林, 1999)。晚三叠世,华北板块与华南板块碰撞后形 秦岭—大别—苏鲁超高压变质带(Ernst et al., 2007)。此时,蒙古-鄂霍茨克海仍存于华北板块 北部的蒙古一大兴安岭褶皱带与西伯利亚板块之 间,晚侏罗世蒙古—鄂霍茨克海闭合碰撞后,才形成 了统一的欧亚大陆。从中侏罗世开始,古太平洋板 块向欧亚大陆斜向俯冲,中国东部由原来的特提斯 构造域进入了太平洋构造体系(赵越等,1994, 2004)。

位于中朝板块北缘燕山台褶带西段的北京地区 (图1b),元古代到中侏罗以来的十多亿年时间里一 直保持相对稳定,燕山运动的发生使其进入了"地 台活化"阶段,岩浆活动强烈。火山岩和侵入岩是 特定类型构造变形的产物,在区内具有明显的规律 性,是研究该区域不同阶段构造运动性质和演化的 重要依据(鲍亦冈等,1983;王承辉等,1987)。北 京西北地区大量分布的髫髻山组火山岩就是其在北 京地区的出露。燕山运动 A 幕通常以髫髻山组之 下的角度不整合为标志。在北京西山地区,李伍平 等(2001)通过测定北京西山雁翅髫髻山组底部粗 安岩斜长石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄获得了全坪年龄和等时线

注:本文为部属高校国家大学生校外实践教育基地资助项目,国家重点基础研究发展计划(2013CB429801)项目的成果。

收稿日期:2015-06-17;改回日期:2016-05-27;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.04.003

作者简介:于海飞,男,1987年生。硕士,构造地质学专业。Email: yuhaifei@pku.edu.cn。通讯作者:张志诚,男,1963年生。博士,副教 授。主要从事构造地质学研究。Email: zczhang@pku.edu.cn。



图 1 华北克拉通北缘燕山带地质背景(a)和燕山带中部地质简图(b) (据刘健等, 2014; 张拴宏等, 2007; Davis et al., 2001)

Fig. 1 The geological setting of the Yanshan Fold and Thrust Belt (YFTB) in the northern part of the North China Craton (a)

and sketch geological map of central Yanshan fold—thrust $\operatorname{belt}(b)$

(modified after Liu Jian et al. , 2014&; Zhang Shuanhong et al. , 2007&; Davis et al. , 2001)

年龄,分别为148.91 ± 2.98 Ma 和146.60 ± 2.93 Ma,因而将其时代划为晚侏罗世,汪洋等(2003)认为斜长石对 Ar 的封闭温度低,该年龄能否代表髫髻山组底部年龄存疑,并且髫髻山组火山岩可能经历了较强的变质作用,导致这一年龄数据不太准确;赵 越等(2004)在北京西山马兰村髫髻山组火山岩底 部安山岩中获得锆石 U-Pb 年龄为157Ma ± 3Ma,但 是该样品并非采自于髫髻山组标准剖面;袁洪林等 (2005)得到了髫髻山组上部英安岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为137.1 ± 4.5 Ma,目前不同作者对该年 龄有不同解释,刘健等(2006)认为袁洪林所采样品 为髫髻山组上部复成分砾岩层中所夹的英安岩,而 髫髻山组上部表现为一套经历了搬运,以火山岩成 分为主的砾岩,在沉积特征上与冀北、辽西的后城 组、土城子组相似,因而该年龄可能更接近于后城组 上部砾岩沉积年龄,而对髫髻山组火山岩而讲偏年 轻;但是根据大台幅地质图,髫髻山组顶部是火山熔 岩,因此袁洪林等所采样品应该仍属于髫髻山组。 汪洋等(2001,2003)得出髫髻山组火山岩 Sm-Nd 等时线年龄为188 ± 19 Ma,但是其采样少,等时线 的相关性也不高,加之 Sm-Nd 等时线误差比较大, 因而该年龄的意义并不明确(袁洪林等,2005);在 十三陵地区的髻髻山组上部安山岩中获得了⁴⁰Ar-³⁹ Ar 年龄为161 ± 2 Ma(Davis et al.,2001)。髫髻 山组属于晚侏罗世已经得到了共识,但由于数据质 量参差不齐,加之年龄数据相差较大,使得北京地区 髫髻山组年龄的限定较为混乱,不易于相互间的对 比。本文通过对北京西山大台地区和十三陵地区的



图 2 北京西山大台地区地质简图(据1: 5 万大台幅地质图简化) Fig. 2 Sketch geological map of the Western Hills, Beijing

髫髻山组剖面处进行典型火山岩的系统采样,获得 其高精度高分辨的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,对燕山运动的"绪动/A 幕" 时限进行约束,同时对两地髫髻山组年龄进行对比, 探讨其差异性的原因并结合已有的数据及前人的研 究成果探讨北京地区燕山运动"绪动/A 幕"不整合 面的时空分布特征,为该区域的构造演化提供依据。

1 区域地质背景和样品特征

北京西山位于华北板块燕山台褶带的西部(图 1b),在北部、西部和南部分别与内蒙地轴、山西隆 起和华北断坳相邻。髫髻山组在北京地区分布面积 约为1100 km²,为北京地区分布面积最广,堆积厚 度最大的火山岩系。髫髻山火山岩在北京西山髫髻 山和百花山一带向斜核部中火山岩最为发育(图 2),厚度达1000~3400 m,是该组命名的地方。在 该地区中生界地层依次出露为上三叠统杏石口组, 主要由页岩、砂岩和砾岩组成,厚度变化大,在北京 西山由东至西逐渐减薄;南大岭组以基性的玄武岩 为主,局部地区出露中性火山碎屑岩夹安山岩;之上 为窑坡组、龙门组和九龙山组砂砾岩、粉砂岩、泥岩、 页岩,其中窑坡组为京西重要的含煤地层,分布广 泛,沉积韵律发育,厚度变化不大;髫髻山组不整合 覆盖在它们之上,其主要由中性粗安质熔岩、角砾凝 灰岩、安山岩组成,夹有凝灰质砂岩、凝灰质砾岩等。 东岭台组不整合覆盖在髫髻山组之上,主要由流纹



图 3 北京十三陵地区地质简图(据雷世和等, 1986) Fig. 3 Sketch geological map of the Ming Tombs area, Beijing (modified after Lei Shihe et al., 1986&)

岩、安山岩及其相应的火山碎屑岩组成。根据火山 活动特点和岩性特征,该区髫髻山组岩性分为三段: 一段为复成分凝灰质砾岩、火山角砾岩为主,砾石直 径2~20cm,成分复杂,分选差,与下伏中侏罗统九 龙山组砂岩为区域性角度不整合(李伍平等, 2001);二段以复成分砾岩、安山岩、安山质角砾岩 和集块岩为主,整合在一段之上;三段分布较广,厚 度较大,是髫髻山组的主体,主要由中基性的熔岩和 火山角砾岩熔岩、火山角砾岩夹凝灰质砂岩、砂砾岩 等组成。本次研究在北京西山大台樱桃沟髫髻山组 剖面采取了3件样品,用于SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 的样品 BJ10-01 采自于侵入到九龙山组砂岩中的一 个闪长岩岩床(GPS: N39°58′45.2″, E115°56′36. 4"),样品 BJ10-02 采自于髫髻山组一段的火山角砾 岩的火山角砾(GPS: N39°58′47.8″, E115°56′33. 1"),样品 BJ10-03 采自于髫髻山组二段的安山岩 (GPS: N39°58′53.2″, E115°56′28.9″) 。

北京十三陵地区作为燕山运动研究的经典地区 之一历来备受关注,其位于燕山台褶带的军都山隆 起与北京凹陷的八达岭复式背斜的南翼,该区主要 发育新太古界密云群,中元古界长城系、蓟县系, 新元古界青白口系及古生界寒武系和中生界侏罗系 上统火山岩系,推覆构造异常发育,很多元古宙甚至 寒武纪地层以推覆岩片的形式存在。值得提出的是 髫髻山组直接角度不整合在寒武系之上(图3和图 4),关于该不整合,作者通过野外实测发现,起始部 分底部凝灰岩和火山集块岩分段不整合覆盖在当时 地势较低的寒武系灰岩层之上,再往上复成分砾岩 才开始大规模覆盖在灰岩层之上,如图4中大比例 尺局部剖面图 CD 段所示。十三陵地区的髫髻山组 岩性分为四段:

(1)一段主要由角砾凝灰岩、复成分砾岩为主, 无层理,分选磨圆差,反映冲洪积特征,砾石成分复 杂且以火山岩为主,可见到底部层位中含有元古界



图 4 北京十三陵水库西侧(A)至(B)实测地质剖面图 Fig. 4 Geological section of on West bank of the Ming Tombs Reservoir, Beijing, (A) to (B)

景儿峪组灰岩砾石(图6b)。

(2) 二段总体上以复成分砾岩和火山碎屑岩为 主(图 6c)。

(3) 三段以玄武安山岩、辉石(角闪)安山岩、 粗安岩及相应的火山碎屑岩为主的岩石组合。

(4)四段在北京西山表现缺失,而在十三陵地 区岩性以安山岩、粗安质熔结凝灰岩为主夹角砾凝 灰岩(鲍亦冈等,1997)。

区内褶皱较强,断裂更为发育,主要有五组,他 们相互交切,构成了断块构造,侏罗系髫髻山组地层 就出露在以水库为中心,呈北东向展布的断陷盆地 中(图3)。本次研究对十三陵水库西侧公路边髫髻 山组进行了剖面实测,挑选了10件髫髻山组火山岩 样品(图4),并沿剖面系统采集了下部一段的凝灰 岩(BJ12-01)(GPS:N40°15'3.4",E116°15'11.9")、 中部二段火山角砾岩的火山角砾(BJ12-03)(GPS: N40°14'54.29",E116°15'36.13")及上部三段安山 岩样品(BJ12-08)(GPS:N40°14'47.12",E116°15' 51.48")(图4),进行了LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定 年,其中样品 BJ12-01、BJ12-02 所在的凝灰岩不整 合在寒武系灰岩层之上,而复成分砾岩层位于凝灰 岩层之上(图4)。

 为斜长石、辉石和角闪石组成;安山质角砾岩(BJ12-03),火山角砾成分主要为安山岩,灰绿色,火山角 砾结构,其分选性差,圆度低,块状构造,镜下具斑状 结构,块状构造。斜长石斑晶约为 30% 左右,基质 主要由大量的隐晶质斜长石和角闪石组成,角闪石 多数被绢云母化,斜长石多数被高岭石化;安山岩 (样品 BJ12-04 和 BJ12-08),野外呈灰色(图 6d),具 有交织结构特征,长条状斜长石微晶呈定向或半定 向排列,其间分布少量角闪石和磁铁矿(图 5)

2.1 锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年

样品的锆石分选在廊坊诚信地质技术服务公司 进行。按常规方法分选,将原岩样品破碎至100μm 左右,先用磁法和重液分选后,再在双目镜下手工挑 纯;然后将锆石与数粒标准锆石(TEMORA)置于环 氧树脂中,研磨至一半,暴露其新鲜面后制靶(宋彪 等,2002),进行抛光、超声波处理和镀金;测试前反 射光和阴极发光(CL)照相的工作在北京大学造山 带与地壳演化重点实验室和环境扫描电子显微镜实 验室完成。参照文献(Corfu et al.,2008;吴元保 等,2004;李长民等,2009)的描述分析锆石的成 因,进而确定合适的分析点位。

北京十三陵地区的样品(BJ12-01,BJ12-03, BJ12-08)测试是在北京大学地球与空间科学学院造 山带与地壳演化教育部重点实验室进行。激光剥蚀 使用的是德国相干公司(Coherent)准分子激光器 COMPex Pro102,激光条件为:激光束斑 32 μm,激光



图 5 北京十三陵地区髫髻山组代表性火山岩显微照片 Fig. 5 Representative photomicrographs of analyzed samples in the Ming Tombs area (corssed nicols) Qtz—石英; Pl—斜长石; Hbl—角闪石 Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende

能量密度 20 J/cm²,频率 5 Hz,使用纯度为 99.999%的He气作为载气将激光剥蚀出来的物质 带入等离子体质谱。质谱分析采用美国安捷伦科技 有限公司电感耦合等离子体质谱仪Agilent ICP-MS 7500ce,功率1500 W,冷却气15 L/min,辅助气1 L/ min,载气0.96 L/min,积分时间⁴⁹Ti、²⁰⁷Pb为50ms, ²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U为20ms,其余同位素为 10ms。信号采集时间共75s,采集信号前先用激光 剥蚀3s以去除样品表面可能存在的污染,在进行 15s的空白信号采集后开始触发激光采集样品信 号。每4个未知样测试1个TEMORA 锆石标样,每 8 个未知样测试1个NIST 610 玻璃标样。数据处理 先应用西澳大学的 Glitter 软件获得微量元素含量及 U-Pb 同位素比值,微量元素的含量以 Si 元素为内标,以 NIST 610 为外标;U-Pb 同位素比值的确定采用 TEMORA 锆石标样(417Ma)进行元素间的分馏校正。单个点的同位素比值误差和年龄误差均分别为 1σ 相对误差和 1σ 绝对误差,加权平均值误差为2σ。U-Pb 谐和年龄是根据同位素比值应用 Isoplot 程序得到的,置信度为95%。

北京西山大台地区的样品(BJ10-01,BJ10-02, BJ10-03)的锆石 U-Pb 同位素分析和定年在北京离 子探针中心网络虚拟实验室通过位于澳大利亚 Curtin 理工大学 SHRIMP II 仪器的 SHRIMP 远程共 享控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)获得。使用标准样品 M257(Nasdala et al.,



图 6 北京十三陵髫髻山组火山岩野外照片 (a)凝灰岩;(b)含粉红色泥晶灰岩砾石的复成分砾岩;(c)火山集块岩;(d)安山岩 Fig. 6 Field photos of the volcanic rocks in the Tiaojishan Formation in the Ming Tombs area, Beijing (a) tuff;(b) polymictic conglomerate;(c) volcanic agglomerate;(d) and esite

2008)标定标样 TEMORA1(417Ma)和待测锆石的 U、Th、Pb含量,锆石 U—Th—Pb 同位素比值用 TEMORA1标定。样品分析流程参见 Compston 的文 章,使用 ISOPLOT 程序进行实验数据处理和谐和图 绘制,置信度为95%。

2.2 地球化学分析方法

主量元素测定在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室利用 X 光荧光光谱(XRF)分析完成,相对误差在1%以内。微量、稀土元素测定在核工业北京地质研究院利用电感耦合等离子质谱仪(ICPMS)测定完成,Nb、Ta 测试精度稍低,相对误差在9%以内,其余都在5%以内。

3 错石特征及定年结果

本文共获取了6个年龄数据,其中3个为十三 陵髫髻山组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,另外三个 为门头沟大台剖面髫髻山组 SHRIMP U-Pb 年龄(测试结果见附表 1、2,纸质版略,请到 www. geojournals. cn/georev 查阅电子文件)。锆石年龄谐 和图中大部分都分布在谐和曲线附近,没有明显的 铅丢失,少部分偏离谐和线,但不影响整体规律性。

3.1 十三陵髫髻山组锆石特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

十三陵地区髫髻山组一段凝灰岩样品(BJ12-01)中挑选出来的锆石颗粒呈椭圆粒状或长柱状(图7),粒度在0.1~0.2mm之间,长宽比为1.5:1~3:1,呈半自形一自形结构,晶面整洁光滑。在阴极发光照片上,部分锆石具有明显的核幔结构,大多数锆石都具有清晰的较宽的结晶环带,30颗锆石的测试结果见附录1。其中12、13、14、15、22、26、30号测点具有明显偏大的年龄(1859~2821Ma),它们可能为岩浆上侵过程中从围岩或者从源区中捕获的继承性锆石;11、19、28号测点偏离样品的平均值被剔除,27号测点偏离了协和线,其余19颗锆石的



图 7 北京十三陵一西山地区代表性锆石阴极发光照片

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from Ming Tombs-Western Hills area, Beijing

U、Th 含量变化范围分别为 18.02×10⁻⁶~414.08×10⁻⁶和 33.29×10⁻⁶~609.27×10⁻⁶, Th/U 比值 在 0.67~4.38 之间,都大于 0.5, 属岩浆成因锆石。 这 19 颗锆石分析结果都落在谐和线及其附近, 锆石 颗粒的²⁰⁶ Pb/²³⁸U 年龄集中分布在 157 Ma 左右, 其加 权平均年龄为 157.2±1.2 Ma (MSWD = 0.92), 代 表火山岩的喷发年龄(图 8)。

样品(BJ12-03)的锆石颗粒呈长柱状或短柱状 (图7),粒度在0.05~0.2mm之间,长宽比为1:1 到2:1,其晶棱、晶锥发育较完整,内部环带结构普 遍发育,表明它们是岩浆结晶形成的,30颗锆石的 测试结果见附录1。其中3、12、15、16、27号测点具 有异常偏大的年龄(1633~2539Ma),它们可能为岩 浆上侵过程中从围岩或者从源区中捕获的继承性锆 石;7、23 号测点偏离样品的平均值而被剔除,9、22、 28、29、30 号测点偏离了协和线。其余 18 颗锆石的 U、Th 含量为 81. 29×10⁻⁶~691. 48×10⁻⁶和 78. 89×10⁻⁶~552. 98×10⁻⁶, Th/U 值在 0. 68~1. 89 之 间,均大于 0. 5,属岩浆成因锆石。这 18 颗锆石定 年数据点几乎都落在谐和线及其附近,锆石的²⁰⁶ Pb/²³⁸U 年龄集中分布在 155Ma 附近,其加权平均 年龄为 155. 2±1.7 Ma(MSWD=0. 64),代表火山 岩的形成年龄(图 8)。

样品(BJ12-08)的锆石颗粒呈长柱状或短柱状 (图7),粒度在0.05~0.2mm之间,长宽比为1:1 到2:1,其晶棱、晶锥发育较完整,在阴极发光照片 上,大多数的锆石都显示出较清晰的环带结构,同样 表明它们是岩浆结晶形成的,30颗锆石的测试结果



图 8 北京十三陵一西山大台髫髻山组火山岩 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 和谐和图 Fig. 8 LA-ICP-MS and SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram of the Ming Tombs —Western Hills area, Beijing

见附录1。其中2至8号测点、10至15号测点和 19、21、22、23、28等测点的年龄异常偏大(1971~ 2616Ma),为岩浆上侵过程中从围岩或者从源区中 捕获的继承性锆石,其余12颗锆石U、Th含量为 37.12×10⁻⁶ ~ 303.05×10⁻⁶和 21.81×10⁻⁶ ~ 906.29×10⁻⁶,Th/U比值在 0.26~3.12 之间,绝大部分大于 0.5,属岩浆成因锆石。样品的 12 颗锆石分析数据点几乎都落在谐和线及其附近,锆石颗粒

的²⁰⁶ Pb/²³⁸U 年龄集中分布在153 Ma 左右,其加权平均年龄为153.1 ± 2.2 Ma (MSWD = 0.88),代表火山岩的喷发年龄(图 8)。

3.2 门头沟区大台剖面髻山组锆石特征及 SHRIMP U-Pb 定年结果

北京西山大台附近一侵入到九龙山组砂岩地层 中的闪长岩岩床样品(BJ10-01)的锆石呈长柱状 (图7),粒度为0.1~0.2mm,长宽比为1.5:1~2 :1,晶型为自形和半自形,晶面光滑整洁,在阴极发 光照片上,大多数锆石发育较清晰的震荡环带结构, 显示岩浆锆石的特点。15颗锆石的离子探针测试 结果见附录2。锆石U、Th含量为57×10⁻⁶~186× 10⁻⁶和44×10⁻⁶~171×10⁻⁶,Th/U比值在0.76~ 1.43之间,所有数值均大于0.5,属岩浆成因锆石。 其中9、10、12号测点偏离协和线而被剔除,其余12 个分析数据点几乎都落在谐和线及其附近,锆石颗 粒的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄集中分布在149M附近,其加权 平均年龄为149.0±3.2Ma(MSWD=1.5),代表 闪长岩岩床侵位年龄(图8)。

样品(BJ10-02)挑选出的锆石呈长柱状或椭圆 状(图7),粒度为0.05~0.2mm,长宽比为1.5~2, 晶形为半自形、自形(约各占一半),晶面整洁光滑。 在阴极发光照片上,大多数锆石发育较清晰的韵律 环带结构,显示岩浆锆石的特点。13颗锆石的离子 探针测试结果见附录2。锆石U、Th含量为81× $10^{-6} \sim 306 \times 10^{-6} \pi 65 \times 10^{-6} \sim 325 \times 10^{-6}$,Th/U比 值在0.73~1.49之间,所有数值均大于0.5,属岩 浆成因锆石。在U-Pb谐和图上,除2号测点偏离 谐和线外,其余数据投影点基本上落在谐和线上及 附近,锆石颗粒的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值较稳定,集中分 布于152Ma附近,加权平均值为152.1±1.9 Ma (MSWD = 0.69),解释为火山岩的喷发年龄(图 8)。

样品(BJ10-03)挑选出的锆石大部分呈长柱状 (图7),粒度为0.1~0.2mm,长宽比变化比较大,多 数为2:1~3:1,有的接近4:1,晶型为半自形— 自形,晶面整洁光滑。在阴极发光照片上,未见有残 留核部发育,大多数锆石都具有清晰的较宽的结晶 环带,表明它们是岩浆结晶形成的。12颗锆石的离 子探针测试结果见附录2。锆石U、Th含量为85× 10⁻⁶~317×10⁻⁶和110×10⁻⁶~311×10⁻⁶,Th/U 比值在0.69~1.51之间,所有数值均大于0.5,属 岩浆成因锆石。在U-Pb谐和图上,12个分析数据 投影点基本上落在谐和线上及附近,锆石颗粒的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值较稳定,集中分布于 149 Ma 附近,加权平均值为 149 ± 2 Ma (MSWD = 0.71),解释为火山岩的喷发年龄(图 8)。

4 岩石地球化学分析结果

从十三陵水库北侧髫髻山组实测剖面位置处采 取的岩石样品中挑选了8件新鲜的有代表性的样品 进行了主量、稀土、微量元素地球化学分析,分析结 果见表1。

4.1 主量元素

本区岩石样品的 SiO₂含量变化范围不大,从 54.87%~64.43%,根据邓晋福等(2015a,b)关于 TAS 图解的相关建议进行投图,在 TAS 图解中大多 数投影在粗安岩区,有2件样品落入到了英安岩区, 整体上属中性到中酸性火山岩,所有样品均落于碱 性和亚碱性系列过渡区域(图 9a),在 K₂O—SiO₂图 解中,岩石样品具有高钾钙碱性岩石系列特征(图 9b)。

十三陵地区粗安岩样品的 SiO₂含量在 54.87% ~60.28, Al₂O₃含量在 15.75% ~17.75%, 所有样品 的 A /NK 均大于 1, 大部分样品的 A/CNK 小于 1 (样品 BJ12-08、BJ12-09 除外, 其值分别为 1.34、 1.49)以准铝质岩石为主; K₂O含量 2.44% ~ 3.45%, Na₂O含量 4.02% ~4.87%, Na₂O/K₂O 均大 于 1,显示相对富钠特征; CaO含量较高为 0.97% ~ 6.39%, TiO₂含量较低为 0.885% ~1.023%, Fe₂O₃ 含量较高为 6.23% ~8.13%, MgO含量较低为 2.17% ~3.37%, Mg[#]为 37.3 ~49.69, K₂O + Na₂O 含量较高为 6.57% ~7.47%, P₂O₅为 0.442% ~ 0.555%。

中酸性英安岩样品的 SiO₂含量在 64% 左右 (63.79% 和 64.43%), Al₂O₃含量相较于粗安岩较 低(14% 和 14.19%),所有样品的 A /NK 均大于 1, 且 A/CNK 均小于 1,为准铝质岩石; Na₂O/K₂O 为 0.538 和 0.769,表现为富钾; CaO 为 3.38% 和 3.62%, TiO₂含量较低为 0.664% 和 0.679%, Fe₂O₃ 为 4.28% 和 4.68%, MgO 为 3.14% 和 3.58%, Mg[#] 较高为 59.42 和 60.43, K₂O + Na₂O 含量较高为 6.58% 和 6.83%, P₂O₅为 0.191%~0.229%。

4.2 微量元素和稀土元素

区内髫髻山组粗安岩和中酸性英安岩稀土元素 总含量中等,ΣREE 介于 108.1~436μg/g之间,平 均为 204.8 μg/g。在稀土元素球粒陨石标准化配 分模式图中可以看出,轻重稀土元素分馏明显,

表 1 北京十三陵髫髻山组火山岩主量元素(%)、微量元素(μg/g)和稀土元素(μg/g)含量分析结果 Table 1 Contents of major elements(%), trace elements(μg/g) and Rear earth elements(μg/g) in the volcanic rocks of the Tiaojishan Formation in the Ming Tombs area, Beijing

样品号	BJ12-003	BJ12-004	BJ12-005	BJ12-006	BJ12-007	BJ12-008	BJ12-009	BJ12-010
岩性	英安岩	英安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩
SiO ₂	63.79	64.43	55.16	54.87	54.9	60.28	59.85	55.86
TiO_2	0.68	0.66	1.02	0.90	0.93	0.95	0.98	0.89
Al_2O_3	14	14.19	17.64	16.58	17.53	17.47	17.75	15.75
Fe_2O_3	4.68	4.28	8.13	7.29	7.65	6.68	6.81	6.23
MnO	0.08	0.08	0.09	0.10	0.13	0.07	0.07	0.08
MgO	3.58	3.14	3.15	2.17	3.08	3.05	3.37	2.44
CaO	3.62	3.38	4.15	6.39	5.88	1.34	0.97	4.53
Na ₂ O	2.39	2.86	4.16	4.02	4.16	4.84	4.40	4.87
K20	4.44	3.72	2.65	3.45	2.41	2.46	2.70	2.44
P_2O_5	0.23	0.19	0.56	0.49	0.50	0.45	0.45	0.44
LOI	2.37	2.67	3.00	3.44	2.52	2.20	2.44	2.42
Total	99.85	99.61	99.71	99.71	99.68	99.78	99.78	95.97
A/NK	1.60	1.62	1.81	1.6	1.85	1.64	1.75	1.48
A/CNK	0.91	0.95	1.02	0.75	0.87	1.34	1.49	0.83
$Na_2O + K_2O$	6.83	6.58	6.81	7.47	6.57	7.3	7.1	7.31
$Na_2 O/K_2 O$	0.54	0.77	1.57	1.17	1.73	1.97	1.63	2
Mg [#]	60.43	59.42	43.61	37.27	44.56	47.68	49.69	43.88
Li	14.9	19.1	9.53	8.13	14.5	13.1	13.1	7.35
Be	1.59	1.99	1.42	1.12	1.06	1.23	1.14	1.19
Sc	5.48	13.7	13.3	11.4	10.6	15.3	9.38	8.86
V	73.9	152	215	177	175	91.7	74.6	103
Cr	30.8	59.5	13.1	12.4	12.6	39.8	44.1	40.9
Co	6.58	17.7	17.1	14.5	14.4	17.2	16.0	14.5
Ni	9.89	30.2	7.47	6.5	6.75	16.4	18.2	17
Cu	10.4	26.7	7.87	2.05	9.95	1.96	1.58	13.3
Zn	60.9	111	89.9	74.6	72.0	81.7	93.4	87.4
Ga	14.9	20.7	20.7	18.9	20.2	21.9	19.1	19.9
Rb	63	38.4	43.5	57.3	28.5	41.2	47.9	36.5
Sr	281	1128	965	1052	1874	639	687	856
Y	10.5	21.9	17.3	15.7	15.4	11.4	10.3	9.81
Nb	11	21.6	9.69	8.43	8.22	9.08	8.02	7.34
Та	0.75	0.83	0.44	0.4	0.42	0.37	0.36	0.32
Мо	0.71	0.69	0.84	1	0.6	0.37	0.45	0.45
Cd	0.05	0.19	0.06	0.15	0.10	0.07	0.09	0.1
In	0.03	0.05	0.07	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03
\mathbf{Sb}	0.12	0.04	0.12	0.04	0.04	0.22	0.21	0.03
Cs	2.72	1.73	1.98	1.75	0.59	1.81	2.37	0.96
Ba	794	1114	1347	2313	2412	1127	1256	1735
La	24.6	85.3	44.1	39.80	41.5	40.3	40.2	34.9
Ce	44.8	236	85.3	75.3	78.8	76.9	78.8	66.5
Pr	5.63	17.70	10.90	9.79	10.40	10.1	10.2	8.57
Nd	20.6	63.9	42.8	39.3	41.6	39.8	40.3	35
Sm	3.37	9.61	7.33	6.47	6.84	6.54	6.62	5.81
Eu	0.78	2.41	2.31	2.29	2.22	1.99	1.94	1.94
Gd	2.97	8.55	5.78	5.31	5.68	5.11	5.27	4.59
Tb	0.48	1.3	0.94	0.85	0.91	0.78	0.8	0.69
Dy	2	4.76	3.79	3.45	3.65	2.74	2.87	2.43
Ho	0.35	0.79	0.64	0.6	0.63	0.43	0.46	0.39
Er	1.17	2.76	2.14	1.94	2.13	1.47	1.58	1.37
Tm	0.16	0.34	0.29	0.27	0.28	0.17	0.18	0.15

2016	年
2016	年

								绥 表Ⅰ
样品号	BJ12-003	BJ12-004	BJ12-005	BJ12-006	BJ12-007	BJ12-008	BJ12-009	BJ12-010
岩性	英安岩	英安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩	粗安岩
Yb	1.05	2.26	1.89	1.76	1.91	1.12	1.16	1.02
Lu	0.15	0.32	0.28	0.26	0.28	0.16	0.16	0.14
Tl	0.32	0.18	0.15	0.17	0.14	0.13	0.13	0.08
Pb	11.7	15.8	8.29	6.94	9.29	7.26	7.64	8.09
Th	6.7	5.43	2.78	2.67	2.54	1.96	1.8	1.71
U	1.54	1.07	0.88	0.7	0.47	0.49	0.46	0.39
Zr	179	936	281	255	247	233	210	195
Hf	4.35	9.73	5.48	5.09	5.46	4.92	5.03	4.42
Eu/Eu *	0.74	0.8	1.05	1.16	1.06	1.01	0.97	1.11
$\sum \text{REE}$	108.12	436.01	208.49	187.38	196.82	187.6	190.54	163.51
\sum LREE	99.78	414.92	192.74	172.95	181.36	175.63	178.06	152.72
Σ HREE	8.33	21.09	15.75	14.43	15.46	11.97	12.48	10.79
LREE/HREE	11.98	19.68	12.24	11.98	11.73	14.67	14.27	14.16
La/Yb	23.43	37.74	23.33	22.61	21.73	35.98	34.66	34.22
Sr/Y	26.76	51.51	55.78	67.01	121.69	56.05	66.7	87.26
Rb/Sr	0.22	0.03	0.05	0.05	0.02	0.06	0.07	0.04

注: $Mg^{\#} = 100 * n(Mg^{2+}) / [n(Mg^{2+}) + n(Fe^{2+})]$

(La/Yb)_N值为16.22~27.07,稀土元素配分模式呈现LREE 富集、HREE 亏损的右倾型(图10a),其中 髫髻山组粗安岩样品δEu 变化范围0.97~1.16, 未出现明显的铕异常现象或具有轻微Eu的正异 常;而中酸性的英安岩的δEu为0.74和0.80,具有 较弱的铕负异常,造成δEu基本无异常的原因可能 与岩浆中斜长石结晶分异较弱有关。在经原始地幔 标准化的微量元素蛛网图上(图 10b), 髫髻山组火 山岩表现为富集 Ba、K、Sr 等大离子亲石元素(LILE), Rb 相对于 Ba 略有亏损, 高场强元素 Nb、Ta、 P、Ti、Th 则相对亏损, Zr 相对富集; Sr/Y 较高 (26.76~121.68, 平均为 67.68), 而 Yb(0.969~ 1.91µg/g), Y(9.81~21.9µg/g), 及 Rb/Sr(0.015 ~0.224)均比较低。



图 9 十三陵地区髫髻山组火山岩 TAS 分类图解和 KO₂—SiO₂ 图解

Fig. 9 TAS diagram and K₂O versus SiO₂ diagram form volcanic rocks of Tiaojishan Formations, Ming Tombs area
(a) 蓝色区域代表髫髻山组火山岩岩浆,数据来源(李思田等, 1990; 鲍亦冈等, 1995; 邱家骧等, 1998; 李伍平等, 2001; 王蕊等, 2007); (b) 前人数据来源(李伍平等, 2001; 鲍亦冈等, 1995; 汪洋等, 2003)

Blue color area represents magmas of Tiaojishan Formation (Li Sitian et al., 1990&; Bao Yigang et al., 1995&; Qiu Jiaxiang et al., 1998&; Li Wuping et al., 2001&; Wang Rui, 2007&) Data in the diagrams come from volcanic rocks of the Tiaojishan Formation (Li W P et al., 2001&; Bao Y G et al., 1995&; Wang Y et al., 2003&)



图 10 十三陵地区髫髻山组火山岩稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)(标准化值据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for volcanic rocks from Tiaojishan Formations, Ming Tombs area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

5 讨论

5.1 火山岩的成因

在北京十三陵地区所采的样品中,所有样品的 烧失量均集中在 2.2% ~ 2.67%,仅有一个样品为 3.44%,蚀变程度较低(烧失量 < 3%),另外通过薄 片研究发现岩石样品也较新鲜,并且在原始地幔标 准化的微量元素蛛网图上所测样品的 Rb、Ba 和 K 含量波动较小,同样反映出后期蚀变对岩石影响较 弱,本次火山岩地球化学元素信息可用来表征原始 岩浆的特征。

近年来围绕燕山造山带髫髻山期火山岩地球化 学研究积累了大量的成果,归结起来起地球化学特 征表现较为一致:较高的 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、CaO 和 Na₂O+K₂O 含量,岩石以准铝质为主,Mg[#]表现为正 常或低的数值,但也有 Mg[#]高的报道(51~58)。同 时,这些火山岩都具有 LREE 富集、HREE 明显亏 损、Eu 异常不明显等特征。在微量元素上富集 Ba、 K、Sr 等大离子亲石元素(LILE),Rb 相对于 Ba 略 有亏损,亏损 Nb、Ta、P、Ti、Th 等高场强元素,高的 Sr、Ba 含量和 Sr/Y、La/Y 值,同时 Yb 和 Y 的含量 较低。

北京十三陵地区的中性和中酸性火山岩主量元 素表现为高 Al_2O_3 、CaO、 Na_2O ,低 TiO_2 和 MgO, $Mg^{\#}$ 除去一个样品为 37.27 外,其他所有样品为 43.61 ~60.43,总体上 $Mg^{\#}$ 比较高,在 K_2O — SiO_2 图解中, 样品落入高钾钙碱性岩石系列区域,大部分样品的 A/CNK <1,为准铝质岩石;高 Sr(除一个样品为 281μg/g,其他样品的 Sr 含量为 639~1878μg/g); 低 Yb(0.969~1.91μg/g),Y(9.81~21.9μg/g), Sr/Y 较高(26.76~121.68,平均为 67.68)。在稀土 元素球粒陨石标准化图上(图 11a),轻重稀土分异 明显,轻稀土富集,而强烈亏损重稀土,Eu 异常不明 显;在原始地幔标准化蛛网图上(图 11b)富集大离 子亲石元素 K、Sr、Ba,而 Rb、Th、U 表现为负异常, 亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti。经过对比后发现,本 次采取的北京十三陵地区粗安岩和英安岩样品与北 京西山髫髻山组火山岩乃至燕山造山带髫髻山组火 山岩具有相似的地球化学特征。

十三陵地区的粗安岩和英安岩样品(La/Yb)_N 比值高(16.22~27.07),轻重稀土分馏明显,稀土 元素配分模式呈现 LREE 富集、HREE 亏损的右倾 型,这可能同源区残留石榴子石有关;δEu 不明显和 Sr 的正异常表明斜长石的分离结晶比较弱,或者没 有发生斜长石的残留。关于高场强元素的异常通常 有以下几种原因:角闪石的分离结晶导致了 Nb 的 亏损(Pearce and Norry, 1979);同俯冲板片中难容 的 Ti 矿物相关(Martin, 1999);大陆上地壳的混染 也可能导致高场强元素的亏损。一般认为,榍石、锆 石、褐帘石,磷灰石、金红石等常富集高场强元素,当 它们发生源区残留或分离结晶时会导致 HFSE 的负 异常。Rb、Th 和 U 负异常及低的 Rb/ Sr 值取决于



图 11 北京西山髫髻山组、九龙山组和龙门组同十三陵髫髻山组火山岩分布及时空对比图(据李海龙等修改, 2014) Fig. 11 Temporal and spatial characteristics of the Tiaojishan Formation, the Jiulongshan and Longmen

Formation between the Western Hills area and Ming Tombs area, Beijing

数据来源:东岭台底界年龄130Ma、髫髻山顶界年龄137Ma(袁洪林等,2005),髫髻山组三段底界年龄为147Ma(李伍平等,2001),北京西山九龙山顶界年龄为147Ma(Yang Jinhui et al.,2006),北京西山九龙山底界年龄为154Ma(Yang Jinhui et al.,2006;李海龙等,2014), 髫髻山组一段底界年龄在158Ma(赵越等,2004,未见原始数据)

we used these data as follows: The bottom boundary age of the Donglingtai Formation is about 130Ma(Yuan Honglin et al. , 2005#); the top boundary age of the Tiaojishan Formation is about 137Ma(Yuan Honglin et al. , 2005#); the bottom boundary age of the third section of the Tiaojishan Formation is about 147Ma(Li Wuping et al. , 2001&); the top boundary age of the Jiulongshan Formation is about 147Ma(Yang Jinhuiet al. , 2006); the bottom boundary age of the Jiulongshan Formation is about 154Ma(Yang Jinhui et al. , 2006); and 154Ma(Li Hailong et al. , 2014&); the bottom boundary age of the Tiaojishan Formation is about 158Ma(Zhao Yue et al. , 2004&)

源区岩石的变质程度,一些麻粒岩中存在这种现象(Weaver et al., 1981)。

因此通过对比北京十三陵地区和西山大台地区 的髫髻山组火山岩地球化学特征可以知道,十三陵 地区的髫髻山组火山岩同西山大台附近的髫髻山组 火山岩在地球化学组成上是一致的,成因上也是相 似的。

5.2 北京西山大台地区髫髻山组火山岩和十三陵 地区髫髻山组火山岩形成时代探讨

陆相地层通常具有同时异相性和不整合的穿时 性,北京十三陵和西山大台地区的髫髻山组火山岩 正是产生于陆相盆地中,近年来围绕北京地区的髫 髻山组火山岩获得了一些年龄,但是不同剖面上样 品的年龄相差很大,横向对比比较困难,也使得北京 西山地区中生代地层时限的厘定变得较为混乱,有 必要通过高精度同位素年龄进行进一步梳理。

本文通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法,获得北 京西山地区大台剖面髫髻山组底部一段火山角砾岩 形成时代为 152.1 ± 1.9 Ma,按照国际地层委员会 (ICS)中侏罗世和晚侏罗世界限(161.22 ± 4 Ma), 应属晚侏罗世,髫髻山组二段层位的样品其形成年 龄为 149 ± 2 Ma,同时,髫髻山组下覆九龙山组中 闪长岩岩床,其侵位形成年龄为 149 ± 3.2 Ma,可 见该岩床就位的年龄与髫髻山组二段火山岩年龄一 致,表明两者是同期岩浆作用的。Yang Jinhui 等 (2006)在该岩床上取样(05FW009),但所分析的23 颗锆石年龄并不谐和,利用不谐和线和谐和线相交 得到一个截距年龄为147 ± 2 Ma,这与本文中所得 数据 149 ± 3.2Ma 在误差范围内一致。此外,李海 龙等(2014)在北京西山九龙山组底部凝灰岩中获 得了两期年龄,分别为154Ma和161Ma,前者被认 为限定了九龙山组下限年龄,后者可能代表了"绪 动/A幕"发生的最早火山响应,并将 Yang Jinhui 等 (2006)得到的侵入到九龙山组地层中的闪长岩岩 床年龄 147 ± 2 Ma 作为京西九龙山组顶界年龄的 上限,九龙山组约束在154~147Ma。结合本文数 据,该岩床侵位的年龄是同髫髻山组二段火山岩年 龄相一致的,并不能准确限定九龙山组顶界年龄,九 龙山组顶界年龄应该以该区域髫髻山组底界年龄为 限。前人曾获得过髫髻山组底部粗安岩斜长石 Ar-Ar 坪年龄和等时线年龄在 148 Ma 左右(李伍平等, 2001),与本文所获得的髫髻山组二段年龄149 ± 3.2 Ma 相吻合,可见将李伍平所获得148Ma 左右的 年龄作为京西髫髻山组底部年龄也是不准确的,这 可能是由于 Ar-Ar 封闭温度低或者后期经历了蚀 变。李海龙得出的 154 Ma 的九龙山组底界年龄和 本文所得的髫髻山组底界年龄 152.1 ± 1.9 Ma 共 同约束九龙山组沉积时限应为154~152Ma,京西 九龙山组可能在一个较短时期内形成的,同髫髻山 组一样属于晚侏罗世。此前,《北京市区域地质》和 《北京市岩石地层》根据植物化石 Coniopieris hymeni phylloides、C. cf. margareias 等将九龙山组划为中侏 罗世。京西九龙山组可与冀北九龙山组进行对比, 在承德盆地北缘的姚家营附近可看到九龙山组的紫 红色砂岩角度不整合覆盖厓门子花岗岩岩体之上, 该岩体的侵位年龄为161 ± 3 Ma,从而将冀北承德 的九龙山组时代约束为161 ~158 Ma,同样属于晚 侏罗世(刘健等, 2006)。

北京西山大台附近髫髻山组火山岩微角度不整 合覆盖在九龙山组之上,本文获取的髫髻山组一段 年龄为152.1 ± 1.9 Ma,代表了北京西山髫髻山组 底部的年龄,与赵越等(2004)在北京西山马兰村髫 髻山组火山岩底部安山岩 U-Pb 年龄157 ± 3 Ma 在 误差范围内近于相同,但是后者未见原始数据。如 果髫髻山组上部英安岩样品 U-Pb 年龄137.1 ± 4.5 Ma 成立的话,那北京西山大台附近髫髻山组年 龄应该在152~137 Ma 之间。

北京十三陵地区髫髻山组火山岩底部角度不整 合在寒武系灰岩上,在底部一段可见复成分砾岩,李 书庆(1986)曾对该地区复成分砾岩的砾石成分做 过统计,认为主要砾石成分为安山岩和凝灰岩,灰岩 砾石的含量在7%~13%左右。作者通过该地区的 实测剖面观察到该地区砾石以火山岩为主,局部可 见景儿峪组灰岩砾石(图6b),这些新元古代砾石的 出现说明当时新元古界地层已抬升到地表,其岩层 风化剥蚀后的碎屑物沉积保存在了髫髻山组复成分 砾岩中,代表了前髫髻山期发生了重大的地壳变动, 也就是说十三陵地区髫髻山组之下的不整合面代表 了翁文灏认为的燕山运动的"绪动/A幕"。本文在 十三陵水库西侧剖面进行了系统采样,并获得髫髻 山组底部一段凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 为157.2 ± 1.2 Ma,在髫髻山组二段获得的火山角 砾 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 155.2 ± 1.7 Ma, 在髫髻山组三段获得安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为153.1 ± 2.2 Ma。其中,取自髫髻山组底部 凝灰岩的年龄 157.2 ± 1.2 Ma 与 Davis 等取自髫 髻山组下部安山岩角闪石40 Ar-39 Ar 年龄 161 ± 2Ma 相比要稍年轻。关于该年龄的差别,有两种解释:一 种是由于数据精度同测试流程、样品本身性质及仪 器的精度都有关系,可以认为两者总体上趋于一致。 另一种可能是 161Ma 左右可能代表了一次小规模 火山事件,该期火山活动也有其它年代学的证据,李 海龙等(2014)通过在北京西山雁翅镇田村、淤白村 附近钻孔和探槽,揭露出北京西山九龙山组底部的 一套厚约 12m 火山凝灰岩,凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试揭示了 154Ma 和 161Ma 两期年龄。161Ma 的火山事件代表了"绪动/A 幕"的最早火山响应,而髫髻山组火山岩的大规模喷发则始于 158Ma 左右,作者倾向于第二种观点。本文结合髫髻山组系统采样的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,将十三陵地区髫髻山组主体年龄约束在 157 和 153Ma 之间。

通过对比北京西山大台地区髫髻山组和十三陵 地区髫髻山组所得年龄可以发现,北京西山盆地中 的髫髻山组火山岩年龄(152~149Ma)较十三陵地 区的火山岩年龄(157~153Ma)年轻,说明十三陵地 区火山喷发时,西山地区还没有火山活动,尚处于沉 积阶段,十三陵地区和西山大台附近的火山活动存 在先后顺序,具有穿时性的特点。

张宏等(2006)对冀北滦平地区髫髻山组顶部 安山岩应用 LA-ICP-MS 锆石定年后得出髫髻山组 顶界年龄为162.8±3.2Ma;牛宝贵等(2003)获得的 河北承德盆地髫髻山组顶部火山岩的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄(163±6 Ma);冀北出现了顶部年龄比 本文数据显示的北京地区髫髻山组最老年龄 157.2Ma±1.2Ma还要古老的特点。

在辽西,杨蔚等(2007)锆石 SHRIMP U-Pb 数 据显示髫髻山组火山岩年龄变化范围在 166~ 153Ma之间。在义县盆地西缘的王家屯,季强等 (2004)在该地区髫髻山组的下部层位中,获得石英 粗面岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别 为162.8 ±0.2 Ma 和 167.4 ± 2.5 Ma。张宏等 (2008)对典型的中生代盆地(即冀北的滦平盆地、 承德盆地,辽西的凌源三十家子盆地、金岭寺一羊 山盆地)中髫髻山组火山岩进行系统采样,应用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年并统计辽西一冀北地区髫髻 山组火山岩年龄后认为髫髻山组火山岩上限年龄为 156~153 Ma,下限年龄在165Ma附近;辽西凌源牛 营子盆地的髫髻山组火山岩底部的安山质火山角砾 岩和凝灰岩具有相同的锆石年龄158 ± 1 Ma(赵越 等,2004)。可见,辽西地区髫髻山组底界年龄相对 北京地区也普遍偏大。

冀北和辽西髫髻山组年龄数据说明,髫髻山组 火山岩年龄在燕山褶皱带存在明显的区域性变化, 这种差异性总体表现为北京地区髫髻山组火山岩年 龄相较于冀北一辽西髫髻山组火山岩而言总体偏年 轻,而京西髫髻山组火山岩又较十三陵髫髻山组火 山岩年轻。

5.3 地质意义

北京西山是中国地质学的摇篮,中国地质学的 先驱者之一----翁文灏,根据在北京西山所做的工 作,提出了著名的燕山运动。翁文灏将燕山运动分 为三个阶段:"绪动/A幕",中间幕即火山幕,B幕。 "绪动/A 幕"的特征是以垂直升降的脆性断裂为 主,褶皱变形不发育;中间幕即火山幕以髫髻山组和 兰旗组火山岩大规模喷发为标志;B幕则以强烈的 褶曲和逆掩推覆构造为特征。李海龙等(2014)通 过分析燕山运动的原始含义后认为:以地层单元为 划分依据,燕山运动"绪动/A幕"指的是从地壳响 应,即砾岩沉积到火山岩开始喷发为止的短暂的地 质历史时期;中间幕则是火山岩大规模持续喷发的 关键时期;而A幕形成的不整合面代表了燕山运动 的初始不整合面,同时也是绪动的不整合面。关于 不整合的时限,根据髫髻山组砾岩覆盖在不同时代 的地层之上,翁文灏曾确定燕山运动年代限于北京 西山的九龙山系与髫髻山系之间;然而,通过其在辽 西的考察后得出不整合面在上煤系与上火山岩系之 间(翁文灏, 1928),其中上煤系地层为辽西的北票 组,上火山岩系则包括了蓝旗组的火山岩及其之下 的海房沟组砾岩,海房沟组砾岩在北京西山对应龙 门一九龙山组砾岩。这样,翁文灏对不整合面的划 分就出现了两种不同的方案,这导致后人在讨论燕 山运动的过程中也产生了诸多分歧。张宏仁等 (2013)通过系统考证后认为燕山运动年代应限于 北京西山的窑坡组与龙门组之间;李海龙等(2014) 则重新梳理了有关燕山运动的原始定义和含义,认 为北京西山髫髻山组火山岩、九龙山一龙门组砾岩 具有同时异相性,并且髫髻山组、九龙山组和龙门组 之下的三个不整合面在空间上最终收敛于髫髻山组 之下不整合。

本文采取了北京西山和十三陵地区髫髻山组剖 面底部一段的典型火山岩岩样,通过 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得年龄分别为 152.1 ± 1.9 Ma 和 157.2 ± 1.2 Ma。其中北京西山大台 地区髫髻山组在野外角度不整合覆盖下覆九龙山组 之上;在十三陵地区地区,我们对髫髻山组进行了野 外实测剖面,发现髫髻山组不整合覆盖在寒武纪地 层上,并且在底部的复成分砾岩层中可见属于新元 古代的灰岩砾石,这说明代表"绪动/A 幕"的不整 合面在十三陵地区应该位于晚侏罗世的髫髻山组之 下。北京西山大台地区和十三陵地区髫髻山组底部 年龄的获得对于限定燕山运动的"绪动/A 幕"意义 重大,说明在北京西山大台附近处,对应于燕山运动 "绪动/A幕"的火山响应发生在 152.1 ± 1.9 Ma 前;在十三陵地区,对应于燕山运动"绪动/A幕"的 火山响应发生在 157.2 ± 1.2 Ma 前;根据前文分 析,本文将北京西山大台附近髫髻山组下覆九龙山 组的沉积时限约束在154~152 Ma。如果龙门组沉 积时代介于158~161Ma之间的认识成立的话(李 海龙等, 2014),通过对比在十三陵地区获得的髫髻 山组火山岩一段、二段和三段的年龄可以发现:伴随 燕山运动的发生、发展,十三陵地区在157 Ma 左右 发生了大规模火山活动,此时北京西山地区尚处于 接受沉积的阶段,形成了西山的龙门一九龙山组沉 积,而后152 Ma 左右时大规模火山活动出现在了西 山大台附近地区,这一过程几乎在同一个较短时间 内进行,本文从年龄上证明了北京地区髫髻山组火 山岩、九龙山一龙门组砾岩确实具有同时异相性。 李海龙等(2014)首先指出了燕山运动的不整合面 是一个穿时面,并且从龙门一九龙山组开始沉积到 髫髻山组喷发结束为止,本文十三陵的年龄数据 157.2 ± 1.2 Ma, 同赵越等(2004, 未见原始数据) 在北京西山马兰村髫髻山组火山岩底部安山岩 U-Pb 年龄 157 ± 3 Ma 在误差范围内近于相同,也佐 证了燕山运动的不整合面是一个穿时面,并且髫髻 山组、九龙山组和龙门组之下的三个不整合面在空 间上最终收敛于髫髻山组之下不整合,出露在北京 十三陵地区的髫髻山组火山岩同北京西山地区的髫 髻山组火山岩是同一期火山岩的产物,之所以前人 获得的髫髻山组火山岩年龄存在较大差异,乃是因 为陆相地层不整合面穿时性造成的。本文通过北京 十三陵和西山大台地区的髫髻山组火山岩年龄对 比,并结合前人年龄数据,可以将目前已知的北京地 区获得髫髻山组火山岩年龄统一起来,认为北京地 区出露的髫髻山组火山岩底部较合适的下限年龄为 160~157Ma(图11)。

6 结论

基于对北京西山大台一十三陵地区的岩石学、 年代学及其地球化学的研究,并与冀北一辽西的年 龄对比,我们得出以下结论:

北京地区髫髻山组火山岩:

(1)十三陵地区髫髻山组火山岩地球化学特征 和北京西山髫髻山组火山岩地球化学特征和成因上 具有相似性,是同一套火山岩。

(2)将北京西山大台附近髫髻山组火山活动时

间约束于152~137Ma,将十三陵地区髫髻山组火山 活动时间约束为157~153Ma,应为晚侏罗世产物, 十三陵地区的髫髻山组形成时间要稍早于北京西山 大台附近地区的髫髻山组,这是由于不整合面的穿 时性造成的。

(3)翁文灏(1927,1928)命名的燕山运动的"绪 动A幕"是以髫髻山组火山岩下的不整合为标志 的,绪动造成了区域性的不整合,随后引起了髫髻山 组火山岩的喷发,北京地区的龙门组、九龙山组、髫 髻山组具有同时异相性。"绪动/A幕"的不整合面 是一个穿时面,时间上包括了龙门组、九龙山组一直 到髫髻山组火山岩的爆发,而位于髫髻山组之下的 不整合是一个主不整合面,北京地区出露的髫髻山 组火山岩底部较合适的下限年龄为160~157Ma。

致谢:特此感谢汪洋教授和另一位匿名专家审 查文稿,并提出宝贵修改建议,感谢编辑们负责、细 致和辛苦的工作,感谢北京大学造山带与地壳演化 教育部重点实验室马芳老师提供实验的场所和给予 的帮助。

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)

- 鲍亦冈,谢德源,陈正帮,穆炳涛.1983.论北京地区燕山运动.地质学报,(2):195~204.
- 鲍亦冈,白志民,葛世炜.1995.北京燕山期火山地质及火山岩.北京: 地质出版社:1~14.
- 鲍亦冈,刘振峰,王世发.1997.全国地层多重划分对比研究11:北京 市岩石地层.武汉:中国地质大学出版社:93~134.
- 北京市地矿局,1991.北京市区域地质志.北京:地质出版社:1~598.
- 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,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴 蒙.2015.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地质 论评,61(4):717~734.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,杨振宇,季强,王涛,胡建民,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.
- 葛肖虹. 1989. 华北板内造山带的形成史. 地质论评, 35(3): 254 ~ 261.
- 季强等著.2004.中国辽西中生代热河生物群.北京:地质出版社:1~ 375.
- 河北省地质矿产局.1989.河北省北京市天津市区域地质志.北京:地 质出版社:1~741.
- 雷世和,吴新国.1986.北京十三陵地区的地质构造及其演变特征.河 北地质学院学报,9(2):147~159.
- 李长民.2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研 究,33(3):161~174.
- 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.

- 李思田,杨士恭,吴冲龙,程守田.1990.中国东部及邻区中新生代裂 陷作用的大地构造背景.见:王鸿祯,等.主编.中国及邻区构造 古地理和生物古地理.武汉:中国地质大学出版社:109~124.
- 李伍平,路凤香,李献华,周瑶琪,孙善平,李家振.2001.北京西山髫 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.
- 李伍平,李献华.2004.燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的 成因及其意义.岩石学报,20(3):501~510.
- 李伍平,赵越,李献华,路凤香,梁细荣,涂湘林.2007. 燕山造山带 中一晚侏罗髫髻山期(蓝旗期)火山岩的成因及其动力学意义. 岩石学报,23(3):557~564.
- 李晓勇,郭锋,范蔚茗,王岳军,李超文.2004.北京西山东岭台组粗面 质火山岩地球化学:下地壳熔融成因.大地构造与成矿学,28 (2):155~164.
- 廖群安,邱家骧.1993.北京地区中生代钾玄岩系列一高钾钙碱性系 列的识别和成因分析.岩石学报,9(z1):14~23.
- 刘健. 2006. 燕山褶断带东段承德盆地及邻区燕山期构造演化. 导师: 赵越. 北京:中国地质科学院博士学位论文:1~78.
- 刘健,赵越,柳小明.2007. 冀北承德盆地髫髻山组火山岩的时代. 岩 石学报,22(11):2617~2630.
- 路凤香,郑建平,张瑞生,陈美华.2005.华北克拉通东部显生宙地幔 演化.地学前缘,12(1):61~67.
- 牛宝贵,和政军,宋彪,任纪舜.2003.张家口组火山岩 SHRIMP 定年 及其重大意义.地质通报,22(02):140~141.
- 钱青,钟孙霖,李通艺,温大任.2002. 八达岭基性岩和高 Ba—Sr 花岗 岩地球化学特征及成因探讨:华北和大别—苏鲁造山带中生代 岩浆岩的对比. 岩石学报,18(3):275~292.
- 邱家骧,廖群安.1998.北京地区中元古代与中生代火山岩的酸度、系列、构造环境及岩浆成因.岩石矿物学杂志,17(2):104~117.
- 宋彪,张玉海,万渝生,简平.2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测 定及有关现象讨论.地质评论,48(增刊):26~30.
- 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):309~316.
- 孙善平,李东旭,汪洋.1995.北京怀柔盆地中生代火山岩特征及时代 归属.见:李东旭,等著.北京西山地质构造系统分析.北京:地质 出版社:125~129.
- 王承辉,张开明,汤质华.1987. 燕山地区燕山运动的特征和活动规律. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊,(12):17~29.
- 王蕊,陈斌,柳小明.2007.北京西山地区髫髻山组和东岭台组火山岩的地球化学特征与岩浆起源.高校地质学报,13(3):603~612.
- 汪洋,李家振,孙善平,邓晋福.2001.北京西山髫髻山组火山岩 Sm-Nd 等时线年龄初步研究.北京地质,13(3):18~20.
- 汪洋, 姬广义. 2003. 北京西山东岭台组和髫髻山组火山岩同位素年 龄探讨. 北京地质, 15(4):6~12.
- 翁文灏.1927.中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动.中国地 质学会会志,6(1):9~36.
- 吴元保,郑永飞.2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的 制约. 科学通报,49(16):1589~1604.
- 杨蔚.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:1~121.
- 袁洪林,柳小明,刘勇胜,高山,凌文黎.2005.北京西山晚中生代火山 岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究.中国科学(D辑:地球科学),35(9);821~836.
- 张宏,袁洪林,胡兆初,柳小明,第五春荣.2006. 冀北滦平地区中生代 火山岩地层错 U-Pb 测年及启示.地球科学:中国地质大学学报,

 $30(6):707 \sim 720.$

- 张宏,王明新,柳小明.2008.LA-ICP-MS测年对辽西一冀北地区髫髻 山组火山岩上限年龄的限定.科学通报,53(15):1815~1824.
- 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.
- 张旗,王元龙,王焰.2001.燕山期中国东部高原下地壳组成初探:埃达克质岩 Sr—Nd 同位素制约.岩石学报,17(4):505~513.
- 张岳桥,董树文,赵越,张田.2007.华北侏罗纪大地构造:综评与新认 识.地质学报,81(11):1462~1480.
- 赵越,杨振宇,马醒华.1994. 东亚大陆构造发展的重要转折. 地质科 学,29(2):105~119.
- 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,张拴宏,徐刚,杨振宇,胡建民.2004.燕山板内变形带侏罗纪主 要构造事件.地质通报,23(9~10):854~863.
- Bao Yigang, Xie Deyuan, Chen Zhengbang, Mu Bingtao. 1983&. On the Yanshan movement in Beijing area. Acta Geologica Sinica, (2): 195 ~ 204.
- Bao Yigang, Bai Zhimin, Ge Shiwei. 1995 #. Volcanic Geology and Volcanic Rocks in Yanshanian, Beijing. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 14.
- Bao Yigang, Liu Zhengfeng, Wang Shifa. 1997#. Lithostratigraphy of Beijing Municipality. Wuhan: China University of Geosciences Press: 93~134.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1989&. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 741.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Beijing Municipality. 1991&. Regional Geology of Beijing Municipality. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 598.
- Claesson V S, Vetrin T, Bayanova H D. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archean to the Palaeozoic. Lithos, 51: 95 ~ 108
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zichao Z, Guogan M A. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. Journal of Geological Society of London, 149: 171 ~ 184.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in mineralogy and geochemistry, 53(1): 469 ~ 500.
- Davis G A, Zheng Yadong, Wang Cong, Zhang Changhou, Geherls G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northerm China. Memoirs——Geological Society of America, 194: 171 ~ 197.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu 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, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015 &. On the Correct Application in the Common Igneous Petrological Diagrams: Discussion and Suggestion. Geological Review, 61(4): 717 ~734.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxiang, Yang Zhenyu, 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.

- Ernst, W G, Tsujimori T, Zhang R, Liou J G. 2007. Permo—Triassic collision, subduction-zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 35: 73 ~ 110.
- Ge Xiaohong. 1989&. The history of formation of intraplate orogenic belts in the north China paleoplate. Geological Review, 35(3): 254 ~261.
- Ji Qiang et al. 2004 &. Mesozoic Jehol Biota of Western Liaoning, China. Beijing; Geological Publishing House; 1 ~ 375.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and a Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommision on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell Publishing: 1 ~ 193,
- Lei Shihe, Wu Xinguo. 1986&. The characteristics of the geological structure and its evolution in the Ming Tomb region, Changping County, Bejing. Journal of Hebei College of Geology,9(2): 147 ~ 159.
- Li Changmin. 2009 &. A review on the minerageny and situmicroanalytical dating techniques of zircons. Geological Survey and research, 33(3): 161 ~ 174.
- Li Hailong, Zhang Hongren, Qu Hongjie, 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 Sitian, Yang Shigong, Wu Chonglong, Cheng Shoutian. 1990&. Tectonic background of the Cenozoic rift in the eastern China and its adjacent areas. In: Wang Hongzheng, Yang Sennan, Liu Benpei, et al. eds. Tectonopalaeogeography and palaeobiogeography of China and adjacent region. Wuhan: China University of Geosciences Press: 109 ~ 124.
- Li Wuping, Lu Fengxiang, Li Xianhua, Zhou Yaoqi, Sun Shanping, Li Jiazhen, Zhang Dagang. 2001 &. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(2): 123 ~133.
- Li Wuping, Li Xianhua. 2004 &. Petrogenesis and its implication for the Middle—Late Jurassic intermediate—acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 501 ~ 510.
- Li Wuping, Zhao Yue, Li Xianhua, Lu Fengxiang, Liang Xirong, Tu Xianglin. 2007&. Genesis of the Middle—Late Jurassic volcanic rocks of Taojishan (Lanqi) period and its geodynamic implication, Yanshan Orogen, east China. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 557 ~564.
- Li Xiaoyong, Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Li Chaowen. 2004&. Early Cretaceous trachytes of Donglingtai Formation from the Xishan area in the northern north China block: Constraints on melting of lower mafic crust. Geotectonica et Metallogenia, 28(2): 155 ~ 164.
- Liao Qunan, Qiu Jiaxiang. 1993&. Identification and genetic analysis of Mesozoic shoshonite series—high potassium calcium alkaline series in Beijing region. Acta Petrologica Sinica, 9(z1): 14~23.
- Liu Jian. 2006 &. Yanshanian tectonic evolution of the Chende basin and the adjacent area in the eastern segment of the Yanshan fold-andtrust belt. Supervisor: Zhao Yue. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 1 ~ 78.
- Liu Jian, Zhao Yue, Liu Xiaoming. 2007 &. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chengde basin, northern Hebei province.

Acta Petrologica Sinica, 22(11): 2617~2630.

- Liu Jian, Zhao Yue, Liu A, Ye H. 2015. Late Jurassic to Early Cretaceous sedimentary—tectonic development in the Chengde Basin, Yanshan fold—thrust belt, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 611 ~ 622.
- Ludwig R H. 2003. Isoplot 3. 0——A Geochronological Toolkit for Mi crosoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1 ~70.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Zhang Ruisheng, Chen Meihua. 2005&. Phanerozoic mantle secular evolution beneath the eastern North China craton. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 61~67.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 46(3): 411 ~ 429.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson J M, Corfu F, Dörr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Dirk F, Kosler J, Wan Y S, Götze J, Häger T, Kröner A, Valley J W. 2008. Zircon M257: a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. Geostandards and Geoanalytical Research, 32: 247 ~ 265.
- Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, Ren Jishun. 2003#. SHRIMP U-Pb dating of volcanic rocks in Zhangjiakou formation and its significance. Geological Bulletin of China, 22(02): 140 ~ 141.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to mineralogy and petrology, 69(1): 33 ~ 47.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to mineralogy and petrology, 58(1): 63 ~81.
- Qian Qing, Chung Sunlin, Lee Tongyi, Wen Daren. 2002&. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba—Sr granitoids: a comparison of igneous rocks from North China and the Dabie—Sulu Orogen. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 275 ~292.
- Qiu Jiaxing Liao Qunan. 1998 &. The acidity, series, tectonic settings and magmatic origin of middle Proterozoic and Mesozoic volcanic rocks from Beijing area. Acta Petrologica et Mineralogica, 17(2): 104 ~ 117
- Song Honglin. 1999&. Characteristics of Yanshan type intraplate orogenic belts and a discussion on its dynamics. Earth Science Frontiers, 6(4): 309 ~ 316.
- Sun Sanping, Li Dongxu, Wang Yang. 1995 #. Characteristics and geological age of Mesozoic volcanic rocks in Huairou basin, Beijing. In: Li Dongxu et al. eds. Analysis of the geological structure system in Western Hills (Xishan), Beijing. Beijing: Geological Publishing House: 125 ~ 129.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.
- Wang Chenghui, Zhang Kaiming, Tang Zhihua. 1987&. On the characteristics of expression and the regularities of activity of the Yanshanian movement in the Yanshan area. Bull. Yichang Inst. Geol. Mineral Resources, CAGS, (12): 17~29.
- Wang Rui, Chen Bin, Liu Xiaoming. 2007 &. Geochemical characteristics and origin of the Tiaojishan and Donglingtai Formations from Western Hills, Beijing. Geological Journal of China Universities, 13(3): 603 ~ 612.
- Wang Yang, Li Jiazhen, Sun Shanping, Deng Jinfu. 2001 &. A

preliminary result on the Sm-Nd isochron age of volcanic rocks of Tiaojishan Formation in Xishan (Western Hills), Beijing. Beijing Geology, $13(3): 18 \sim 20$.

- Wang Yang, Ji Guangyi. 2003&. The discussion on isotopic ages of volcanic rocks of Donglingtai and Tiaojishan Formation in Xishan (Western Hills), Beijing. Beijing Geology, 15(4): 6~12.
- Weaver B L, Tarney J. 1981. Lewisian gneiss geochemistry and Archaean crustal development models. Earth and Planetary Science Letters, 55(1): 171 ~ 180.
- Wong WH. 1927. Crustal movements and igneous activities in eastern China since Mesozoic time. Bulletin of the Geological Society of China, $6(1): 9 \sim 36$.
- Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China. Bulletin of the Geological Society of China, 8(1): 33 ~44.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004&. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1589 ~ 1604.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, Wlide S A, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. Earth and Planetary Science Letters, 246(3): 336 ~ 352.
- Yang Wei. 2007 &. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic vocanic rocks in Western Liaoning: constraints on mechanism for the lithospheric thinning in the North China Craton. Supervisor: Li Shuguang. Hefei: Doctoral Dissertation of University of Science and Technology of China: 1 ~ 121.
- Yuan Honglin, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Gao Shan, Li Wenling. 2005#. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the late Mesozoic vocanic rocks in Western Hill, Beijing. Science in China Ser. D Earth Sciences, 35(9): 821 ~836.
- Zhang Hong, Yuan Honglin, Hu Zhaochu, Liu Xiaoming, Diwu Chunrong. 2006&. 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 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. Chinese Science Bulletin, 53(22): 3574 ~ 3584.
- 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 Qi, Wang Yuanlong, Wang Yan. 2001&. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshan Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. Acta Petrologica Sinica, 17(4): 505~513.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, Zhang Tian. 2007&. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1462 ~ 1480.
- Zhao Yue, Yang Zhenyu, Ma Xinghua. 1994 &. Geotectonic transition from paleoasian system and paleoththyan system to paleopacifi active continental margin in eastern Asia. Scientia Geologica Sinica, 29 (2): 105 ~ 118.
- Zhao Yue, Xu Gang, Zhang Shuanhong, Yang Zhenyu, Zhang Yueqiao, Hu Jianmin. 2004 &. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. Earth Science Frontiers, 11(3): 319 ~328.

Zhao Yue, Zhang Shuanhong, Xu Gang, Yang Zhenyu, Hu Jianmin. 2004&. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt. Geological Bulletin of China, $23(9 \sim 10)$; $854 \sim 863$.

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

YU Haifei, ZHANG Zhicheng, SHUAI Gewei, CHEN Yan, TANG Wenhao

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871

Objective: The Western Hills and Ming Tombs (Shisanling) area in Beijing is characterized by extensivelydistributed Mesozoic volcanic rocks of the Tiaojishan Formation. In recent years, numbers of isotopic ages of volcanic rocks in Tiaojishan Formation have been obtained, however, they have a significant difference. The Western Hills can be divided into three sections, Ming Tombs area can be divided into four sections, systematic sampling were carried out in a typical cross-section of the Tiaojishan Formation and were measured by LA-ICP-MS and SHRIMP zircon U-Pb dating, respectively.

Methods: The SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb dating and whole rock geochemical analysis are employed to reveal the formation age and temporal as well as spatial characteristics of the Tiaojishan Formation.

Results: By the geochemical analysis, the volcanic rocks in the Tiaojishan Formation in Ming Tombs area has a high Al_2O_3 , CaO, Na_2O , low TiO₂ and MgO, fall into trachyandesite and dacite field in TAS diagram with enrichment of LREE and LILE (K,Sr,Ba) and depletion of HREE and HFSE (Nb,Ta,Ti), moreover, these intermediate—acidic rock has a high Sr/Y ratio, while the levels of Yb and Y is low. Combined with previous research results, the geochemical characteristics of the volcanic in Ming Tombs area is similar to the volcanic rocks in Westen Hills. By systematical sampling, the writers obtained the following isotopic ages: the age range of the Tiaojishan Formation in Western Hills is 152 ~ 137 Ma, and the age range of the Tiaojishan Formation in Ming Tombs area is earlier than that in the Western Hills.

Conclusions: the diachronism of unconformity gives rise to the differences in the age of Tiaojishan Formation between Ming Tombs and Western Hills. Meanwhile, the unconformity under the Tiaojishan Formation is a primary unconformity in Beijing.

Keywords: Western Hills; Ming Tombs (Shisanling); Tiaojishan Formation; Yanshanian movement; unconformity; diachronism

Acknowledgements: The study was financially supported by the National College Students' Off-Campus Practical Educational Base Project and National Key Basic Research Project (No. 2013CB429804). We would like to express our thanks to Prof. Wang Yang and another expert for their critical comments and suggestions on this paper. We thank anonymous reviewers and chief editor for their constructive remarks.

First author: YU Haifei, male, born in 1987, is a master degree candidate in Peking University, major in tectonics. Email: yuhaifei@pku.edu.cn. Address: No. 5, Yiheyuan Road, Haidian District, Beijing, 100871. Corresponding author: ZHANG Zhicheng, male, born in 1963, associate professor, Mainly engaged in tectonics. Email: zczhang@pku.edu.cn. Address: No. 5, Yiheyuan Road, Haidian District, Beijing, 100871.

Manuscript received on: 2015-06-17; Accepted on: 2016-05-27; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi:10.16509/j.georeview.2016.04.003

附录 1:北京十三陵髫髻山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据

Appendix 1: The LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the volcanic rocks in the Tiaojishan Formation in the Ming Tombs area, Beijing

	元素	【含量(×10	-6)				同位詞	素比值			年龄(Ma)							
测点号	DI	232	228	$\frac{232}{238}$ Th	n(²⁰⁷ Pb),	/n(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb)	/n(²³⁸ U)	n(²⁰⁷ Pb).	/n(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb)	/n(²³⁸ U)	谐和度	
	Pb息	252 Th	2.58 U		测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	(%)	
		1	1		髫髻山组	下部一段凑	疑灰岩(BJ:	12-01); GI	PS: N40°15	'3.4", E1	16°15′11. 9	"			•			
1 BJ01 -01	2.55	60	90	0.67	0.0499	0.0081	0.1671	0.0271	0.0243	0.0005	191	340	155	3	157	24	98.5	
BJ01-02	9.24	376	267	1.41	0.0490	0.0029	0.1674	0.0097	0.0248	0.0004	148	133	158	2	157	8	100.4	
BJ01-03	3.50	278	63	4.38	0.0494	0.0050	0.1679	0.0168	0.0247	0.0005	166	220	157	3	158	15	99.7	
BJ01-04	2.72	90	84	1.06	0.0491	0.0072	0.1720	0.0251	0.0254	0.0006	150	312	162	4	161	22	100.5	
BJ01-05	2.70	131	73	1.79	0.0487	0.0056	0.1662	0.0189	0.0247	0.0006	135	250	158	3	156	16	100.9	
BJ01-06	0.68	34	18	1.9	0.0491	0.0374	0.1622	0.1230	0.0240	0.0016	153	1196	153	10	153	108	100.1	
BJ01-07	5.13	230	142	1.62	0.0488	0.0032	0.1676	0.0109	0.0249	0.0004	139	148	159	3	157	9	100.8	
BJ01-08	1.26	33	40	0.82	0.0488	0.0196	0.1650	0.0660	0.0245	0.0008	138	742	156	5	155	58	100.7	
BJ01-09	1.29	36	41	0.89	0.0498	0.0112	0.1713	0.0383	0.0250	0.0007	185	454	159	4	161	33	99.0	
BJ01-10	4.06	132	128	1.03	0.0497	0.0043	0.1702	0.0146	0.0248	0.0005	183	191	158	3	160	13	99.0	
BJ01-11	1.63	48	48	1.01	0.0487	0.0093	0.1844	0.0348	0.0275	0.0008	135	395	175	5	172	30	101.6	
BJ01-12	150.30	67	393	0.17	0.1137	0.0013	5.4912	0.0688	0.3504	0.0040	1859	21	1937	19	1899	11	97.9	
BJ01-13	91.70	58	245	0.24	0.1160	0.0014	5.4273	0.0696	0.3393	0.0039	1896	21	1883	19	1889	11	100.3	
BJ01-14	32.96	22	51	0.42	0.1812	0.0024	13.2959	0.1831	0.5322	0.0064	2664	21	2751	27	2701	13	98.6	
BJ01-15	100.19	108	142	0.76	0.1676	0.0020	12.6891	0.1612	0.5491	0.0064	2534	20	2822	26	2657	12	95.4	
BJ01-16	7.26	609	179	3.4	0.0510	0.0057	0.1821	0.0199	0.0259	0.0007	240	238	165	4	170	17	97.1	
BJ01-17	4.66	313	99	3.16	0.0492	0.0061	0.1669	0.0204	0.0246	0.0006	158	266	157	4	157	18	100.0	
BJ01-18	5.32	195	160	1.22	0.0489	0.0039	0.1687	0.0133	0.0251	0.0005	141	178	160	3	158	12	100.8	
BJ01-19	11.61	240	190	1.26	0.0523	0.0014	0.3298	0.0086	0.0457	0.0006	298	59	288	4	289	7	99.6	
BJ01-20	13.23	528	414	1.28	0.0488	0.0024	0.1621	0.0078	0.0241	0.0004	137	112	154	2	153	7	100.7	
BJ01-21	4.63	297	108	2.76	0.0497	0.0056	0.1672	0.0187	0.0244	0.0004	181	242	155	3	157	16	99.0	
BJ01-22	61.09	43	163	0.26	0.1162	0.0015	5.3567	0.0716	0.3343	0.0039	1899	22	1859	19	1878	11	101.1	
BJ01-23	2.02	68	57	1.19	0.0492	0.0063	0.1679	0.0210	0.0248	0.0007	157	273	158	4	158	18	100.1	
BJ01-24	2.32	83	67	1.25	0.0519	0.0159	0.1730	0.0529	0.0242	0.0007	279	583	154	4	162	46	95.1	
BJ01-25	1.39	50	42	1.18	0.0488	0.0189	0.1678	0.0649	0.0249	0.0007	140	721	159	4	158	56	100.8	
BJ01-26	699.31	550	1641	0.34	0.1502	0.0017	7.7547	0.0950	0.3745	0.0043	2349	19	2050	20	2203	11	106.6	
BJ01-27	2.23	59	50	1.18	0.0963	0.0206	0.4024	0.0856	0.0303	0.0009	1553	356	193	5	343	62	56.1	
BJ01-28	9.77	112	137	0.81	0.0600	0.0016	0.4778	0.0123	0.0578	0.0008	604	55	362	5	397	8	91.3	
BJ01-29	4.60	198	128	1.54	0.0487	0.0057	0.1663	0.0193	0.0248	0.0005	133	254	158	3	156	17	101.0	
BJ01-30	203.71	257	326	0.79	0.1622	0.0019	10.8098	0.1338	0.4834	0.0055	2479	19	2542	24	2507	12	98.9	

Pho Pho<		元素	素含量(×10) ⁻⁶)				同位素				年龄(Ma)							
Image Image <t< td=""><td>测点号</td><td>DI</td><td>232</td><td>238</td><td>$\frac{232}{238} \frac{\text{Th}}{\text{U}}$</td><td>n(²⁰⁷ Pb)/</td><td>'n(²⁰⁶Pb)</td><td>n(²⁰⁷Pb).</td><td>$/n(^{235}U)$</td><td>n(²⁰⁶Pb)</td><td>$/n(^{238}U)$</td><td>n(²⁰⁷Pb)/</td><td>/n(²⁰⁶Pb)</td><td>n(²⁰⁷ Pb)</td><td>/n(²³⁵U)</td><td>n(²⁰⁶Pb).</td><td>$/n(^{238}U)$</td><td>谐和度</td></t<>	测点号	DI	232	238	$\frac{232}{238} \frac{\text{Th}}{\text{U}}$	n(²⁰⁷ Pb)/	'n(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb).	$/n(^{235}U)$	n(²⁰⁶ Pb)	$/n(^{238}U)$	n(²⁰⁷ Pb)/	/n(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb).	$/n(^{238}U)$	谐和度	
密部小组 中部 一段大山 角砾 ど 御人 小 角砾 ど 御人 小 角砾 ど 御 (1 - 43). GP3: M 0 ⁻¹⁴ 54. 29 ⁺ , E116 ⁻¹⁵ 36. 13 ⁺ BU3-01 3. 23 82 104 0.78 0.0493 0.0493 0.0493 0.007 0.161 0.008 0.024 0.0004 164 191 15 5 13 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15		PD息	2.52 Th	2.00		测值	±s	测值	±s	测值	±s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	(%)	
B03-01 3.23 82 104 0.78 0.0493 0.0167 0.0146 0.0021 0.0040 164 191 195 3 153 92. B03-03 36.94 87 49 1.76 0.1657 0.0021 0.163 0.026 0.633 0.025 539 25 225 14 99.5 B03-04 4.14 165 113 1.46 0.051 0.0021 0.633 0.0247 0.005 255 390 157 31 157 255 10.1 B03-06 11.10 256 379 0.88 0.495 0.029 0.1635 0.024 0.0005 10.61 131 133 2 154 48 99.5 B03-00 1.13 253 691 0.049 0.024 0.0005 10.04 10.01 153 49 151 B03-01 0.99 333 293 1.34 0.027 0.0015 0.024 0.0023 1.0					髫髻山组	[中部二段]	火山角砾岩	的火山角	砾(BJ12-03), GPS: N	40°14′54.	29", E116°	°15′36. 13″						
B03-02 14.56 446 487 0.9 0.6489 0.0201 0.1616 0.0005 0.0303 143 96 133 2 152 152 152 153 24 2539 25 152 255 261 255 261 255 261 255 360 158 3 164 29.0 B030-64 1.10 256 379 0.88 0.68 0.089 0.175 0.036 0.029 100 156 359 157 3 157 23.5 100 B03-607 4.17 124 811 1.53 0.056 0.029 0.033 0.006 120 100 131 153 2 158 4 91 B03-60 0.99 323 1.34 0.0767 0.0710 0.0730 0.0230 0.0030 163 0.004 178 33 2 158 4 154 49.1 B03-50 1.22 89 <t< td=""><td>BJ03-01</td><td>3.23</td><td>82</td><td>104</td><td>0.78</td><td>0.0493</td><td>0.0043</td><td>0.1697</td><td>0.0146</td><td>0.0250</td><td>0.0004</td><td>164</td><td>191</td><td>159</td><td>3</td><td>159</td><td>13</td><td>99.9</td></t<>	BJ03-01	3.23	82	104	0.78	0.0493	0.0043	0.1697	0.0146	0.0250	0.0004	164	191	159	3	159	13	99.9	
B00-03 36.94 87 49 1.76 0.0157 0.0024 11.023 0.487 0.0059 215 24 259 25 14 99.6 B03-04 4.14 165 113 1.46 0.051 0.0098 0.1757 0.036 0.0005 155 390 158 3 164 29 96.2 B03-06 11.10 256 379 0.83 0.0029 0.163 0.0024 0.0005 1000 131 153 2 158 4 99.3 B03-06 21.44 553 691 0.38 0.0027 0.0168 0.044 0.024 0.0003 181 60 157 25 153 4 153 169 69.3 B03-04 1.03 3.9 1.34 0.072 0.071 0.028 0.003 163 180 60 153 4 153 4 153 4 153 4 153 4 153	BJ03-02	14.56	436	487	0.9	0.0489	0.0021	0.1616	0.0068	0.0240	0.0003	143	96	153	2	152	6	100.5	
B03-04 4.14 165 113 1.46 0.051 0.0095 0.175 0.005 255 390 158 3 164 29 96.2 B03-06 11.10 226 370 0.492 0.0085 0.162 0.0024 0.0003 170 131 153 2 154 8 99.3 B03-06 1.13 553 691 0.88 0.0497 0.013 0.1686 0.0044 0.0005 1024 0.0005 1041 153 2 158 4 99.1 B03-08 1.39 233 233 1.34 0.007 0.013 0.046 0.0031 1004 1037 256 153 4 154 17 99.1 B03-10 2.62 89 84 1.06 0.049 0.015 0.0049 0.236 0.0003 155 133 4 154 154 14 154 154 154 154 154 154 154<	BJ03-03	36.94	87	49	1.76	0.1657	0.0024	11.0250	0.1633	0.4827	0.0059	2515	24	2539	25	2525	14	99.6	
B03:06 2.55 79 81 0.79 0.6492 0.0085 0.127 0.0005 156 159 157 3 157 25 100.1 B03:06 11.10 256 379 0.68 0.0495 0.029 0.1635 0.0095 0.0240 0.0006 221 11 153 2 154 8 99.3 B03:07 1.71 1.24 81 1.53 0.056 0.0024 0.2016 0.0046 0.0224 0.0006 121 181 60 157 2 158 4 99.1 B03:09 10.90 393 293 1.34 0.0727 0.001 0.151 0.0023 0.0005 1044 187 153 3 154	BJ03-04	4.14	165	113	1.46	0.0513	0.0098	0.1757	0.0336	0.0249	0.0005	255	390	158	3	164	29	96.2	
B03-66 11.10 256 379 0.68 0.0495 0.029 0.635 0.0095 0.020 170 131 153 2 154 8 99.3 B03-07 4.17 124 81 1.53 0.0506 0.0024 0.2400 0.0003 181 153 2 154 4 99.9 B03-09 10.90 393 293 1.34 0.072 0.001 0.238 0.0240 0.0005 1004 187 153 3 218 19 69.9 B103-10 2.62 89 84 1.06 0.499 0.015 0.019 0.0236 0.0005 175 256 153 4 154 17 99.2 B103-12 122.19 78 300 0.26 0.152 0.0019 1.633 0.0236 0.0003 155 132 158 12 158 9 100.2 B103-13 11.62 280 333 0.71	BJ03-05	2.55	79	81	0.97	0.0492	0.0085	0.1672	0.0286	0.0247	0.0005	156	359	157	3	157	25	100.1	
H00-07 4.17 124 81 1.53 0.056 0.042 0.240 0.0144 0.0044 0.0040 181 60 171 2 185 4 99.1 B03.049 1.34 0.53 691 0.077 0.0013 0.168 0.021 0.024 0.005 104 181 61 153 3 218 4 99.1 B03.040 2.62 89 84 1.06 0.077 0.019 0.023 0.006 175 256 153 4 154 17 99.2 B03.12 13.60 418 449 0.93 0.0498 0.015 0.1617 0.0486 0.0042 0.0403 155 132 158 2 152 4 99. B03.13 11.62 280 333 0.73 0.492 0.0403 0.052 458 21 154 4 158 26 95. B03.14 6.4.20 188 0.041<	BJ03-06	11.10	256	379	0.68	0.0495	0.0029	0.1635	0.0095	0.0240	0.0003	170	131	153	2	154	8	99.3	
B03.08 21.34 553 691 0.8 0.0497 0.0013 0.1686 0.0044 0.0230 1003 181 60 157 2 158 4 99.1 B03.09 10.90 393 293 1.34 0.077 0.2071 0.2398 0.023 0.005 1004 187 153 3 218 4 99.1 B03.10 2.62 88 84 1.06 0.0498 0.0059 0.1615 0.0140 0.023 0.0003 186 68 150 2 152 4 99.2 B03.12 122.1 78 300 0.26 0.122 0.019 0.1635 0.023 0.0236 0.0007 21 158 2 152 4 158 26 95.5 B03.14 64.40 108 0.73 0.0492 0.1685 0.043 0.0251 0.0005 156 133 14 116.8 158 12 101.0 103.35	BJ03-07	4.17	124	81	1.53	0.0506	0.0042	0.2400	0.0197	0.0344	0.0006	222	181	218	4	218	16	99.9	
B03-09 10.90 393 293 1.34 0.072 0.0071 0.238 0.0240 0.0005 104 187 153 3 218 19 69.9 B103-10 2.62 89 84 1.06 0.0496 0.0059 0.1635 0.1019 0.0268 0.0006 175 256 153 44 154 177 99.2 B103-12 122.19 78 300 0.26 0.152 0.0019 7.4068 0.099 0.0249 0.0033 155 132 158 2 158 9 100.2 B103-14 6.73 359 174 2.06 0.0515 0.0094 0.1679 0.033 0.032 2438 121 2463 128 101.0 B103-16 44.40 108 109 0.98 0.121 0.0012 0.1865 0.0132 0.0251 0.0005 136 191 160 3 158 12 101.0 B103-11	BJ03-08	21.34	553	691	0.8	0.0497	0.0013	0.1686	0.0044	0.0246	0.0003	181	60	157	2	158	4	99.1	
B03-10 2.62 89 84 1.06 0.0496 0.0059 0.163 0.0191 0.0239 0.0006 175 256 153 4 154 17 99.2 B103-11 13.60 418 449 0.93 0.0498 0.015 0.1617 0.0003 126 150 2 152 4 98.6 B103-13 11.62 280 333 0.73 0.492 0.009 0.165 0.0097 0.033 155 132 158 2 158 9 100.2 B103-15 124.25 124 215 0.58 0.1611 0.001 4.149 0.0730 0.288 0.0052 248 21 2434 23 2463 12 10.10 B103-16 4.440 108 109 0.88 0.0021 0.005 136 191 160 3 158 12 10.10 B103-16 4.440 108 0.049 0.0023 0.167<	BJ03-09	10.90	393	293	1.34	0.0727	0.0071	0.2398	0.0231	0.0240	0.0005	1004	187	153	3	218	19	69.9	
B\03-11 13.60 418 449 0.93 0.0498 0.015 0.1617 0.0048 0.023 186 68 150 2 152 4 98.6 B103-12 122.19 78 300 0.26 0.1522 0.0019 7.468 0.0976 0.3322 0.0003 155 132 158 2 158 9 100.2 B103-14 6.73 359 174 2.06 0.0515 0.094 0.137 0.4586 0.0007 265 372 151 4 158 26 95.6 B103-15 124.25 124 215 0.58 0.1611 0.0021 1.367 0.488 0.0052 2488 21 2434 23 2463 12 101.0 B103-16 44.40 108 109 0.98 0.024 0.1683 0.0077 0.247 0.0003 171 104 157 22 158 7 99.5 B103-19 3	BJ03-10	2.62	89	84	1.06	0.0496	0.0059	0.1635	0.0191	0.0239	0.0006	175	256	153	4	154	17	99.2	
B)03-12 122. 19 78 300 0.26 0.1522 0.019 7.4068 0.0976 0.3322 0.040 2370 21 1950 19 2162 12 109.6 B)03-13 11.62 280 383 0.73 0.0492 0.029 0.059 0.0099 0.0007 155 132 158 2 158 9 100.2 B)03-15 124. 25 124 215 0.58 0.1631 0.0021 0.0333 0.035 1974 28 1633 17 1788 14 110.4 B)03-16 44.40 108 109 0.98 0.1212 0.019 4.8149 0.073 0.0251 0.0005 136 191 160 3 158 12 101.0 B)03-17 3.15 09 102 0.88 0.0495 0.023 0.1631 0.0247 0.0005 175 403 156 3 157 28 9 1<1 100.5 </td <td>BJ03-11</td> <td>13.60</td> <td>418</td> <td>449</td> <td>0.93</td> <td>0.0498</td> <td>0.0015</td> <td>0.1617</td> <td>0.0048</td> <td>0.0236</td> <td>0.0003</td> <td>186</td> <td>68</td> <td>150</td> <td>2</td> <td>152</td> <td>4</td> <td>98.6</td>	BJ03-11	13.60	418	449	0.93	0.0498	0.0015	0.1617	0.0048	0.0236	0.0003	186	68	150	2	152	4	98.6	
B ₁ 03-13 11.62 280 383 0.73 0.0492 0.0029 0.1685 0.0099 0.0249 0.0033 155 132 158 2 158 9 100.2 BJ03-14 6.73 359 174 2.06 0.0515 0.0094 0.1679 0.0303 0.0226 0.0007 265 372 151 4 158 26 95.6 BJ03-15 124.25 124 215 0.58 0.1631 0.0021 10.306 0.1377 0.4586 0.0052 2488 21 2434 23 2463 12 101.0 BJ03-16 44.40 108 109 0.98 0.1212 0.0194 0.188 0.0035 136 191 160 3 158 12 101.0 BJ03-18 11.26 387 336 1.15 0.0495 0.0023 0.168 0.024 0.0005 175 403 156 3 157 28 99.94 BJ03-19 3.15 90 102 0.88 0.0499 0.0032 0.1681	BJ03-12	122.19	78	300	0.26	0.1522	0.0019	7.4068	0.0976	0.3532	0.0040	2370	21	1950	19	2162	12	109.6	
BJ03-14 6.73 359 174 2.06 0.0515 0.0094 0.1679 0.0303 0.0236 0.0007 265 372 151 4 158 26 95.6 BJ03-15 124.25 124 215 0.58 0.1631 0.0021 10.3067 0.1377 0.4586 0.0052 2488 21 2434 23 2463 12 101.0 BJ03-16 44.40 108 109 0.98 0.1212 0.019 4.8149 0.0783 0.2883 0.005 1974 28 1633 177 1788 14 110.4 BJ03-16 44.40 108 109 0.98 0.120 0.183 0.0077 0.0247 0.003 171 104 157 2 158 7 9.55 BJ03-19 3.15 90 102 0.88 0.0496 0.097 0.1671 0.0327 0.0245 0.0005 175 403 156 3 151 11 10.5 39 151 11 102 3 151 11 103 <td>BJ03-13</td> <td>11.62</td> <td>280</td> <td>383</td> <td>0.73</td> <td>0.0492</td> <td>0.0029</td> <td>0.1685</td> <td>0.0099</td> <td>0.0249</td> <td>0.0003</td> <td>155</td> <td>132</td> <td>158</td> <td>2</td> <td>158</td> <td>9</td> <td>100.2</td>	BJ03-13	11.62	280	383	0.73	0.0492	0.0029	0.1685	0.0099	0.0249	0.0003	155	132	158	2	158	9	100.2	
Bj03-15 124. 25 124 215 0.58 0.1631 0.0021 10.3067 0.1377 0.4586 0.0052 2488 21 2434 23 2463 12 101.0 Bj03-16 44.40 108 109 0.98 0.1212 0.0019 4.8149 0.0783 0.2883 0.0035 1974 28 1633 17 1788 14 110.4 Bj03-16 41.126 387 336 1.15 0.0495 0.0023 0.1683 0.0077 0.0247 0.0005 136 191 160 3 158 9 95 Bj03-19 3.15 90 102 0.88 0.0496 0.0097 0.1611 0.0245 0.0005 137 403 156 3 151 11 100.5 89.3 Bj03-20 4.87 244 131 1.85 0.0499 0.029 0.1681 0.0269 0.0005 141 171 152 3 151 11 100.5 Bj03-20 18.03 93 1.43 0.1945 0.0491<	BJ03-14	6.73	359	174	2.06	0.0515	0.0094	0.1679	0.0303	0.0236	0.0007	265	372	151	4	158	26	95.6	
BJ03-1644.401081090.980.12120.00194.81490.07830.28830.0035197428163317178814110.4BJ03-173.35118961.230.04880.00220.16850.01430.02510.0005136191160315812101.0BJ03-1811.263873361.150.04950.00230.16830.0770.02470.00031711041572158799.5BJ03-193.15901020.880.04960.00970.16710.02370.02450.0005175403156315112899.4BJ03-204.872441311.850.04990.00290.16880.02100.02390.0005141171152315111100.5BJ03-2110.052653260.810.04910.01290.16880.02490.000315113215821589100.4BJ03-2218.435633931.430.1950.00470.71960.01600.2690.0042781391713551931.0BJ03-247.972252620.860.04930.0300.16410.04990.02420.00041611361542154999.5BJ03-254.792411271.890	BJ03-15	124.25	124	215	0.58	0.1631	0.0021	10.3067	0.1377	0.4586	0.0052	2488	21	2434	23	2463	12	101.0	
BJ03-173.35118961.230.04880.0420.16850.0130.02510.0005136191160315812101.0BJ03-1811.263873361.150.04950.00230.16830.00770.02470.00031711041572158799.5BJ03-193.15901020.880.04960.00970.16710.03270.02450.000517540315631572899.4BJ03-204.872441311.850.04990.00380.16080.02110.02390.00051411711523315111100.5BJ03-2110.052653260.810.04910.04920.16810.00980.02690.0042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.05590.00170.49410.01470.6410.00844865401540810098.3BJ03-247.972252620.860.04930.0300.16410.02920.004416113615421551099.5BJ03-254.792411271.890.04940.0340.16480.01440.02420.004416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.0625 <td>BJ03-16</td> <td>44.40</td> <td>108</td> <td>109</td> <td>0.98</td> <td>0.1212</td> <td>0.0019</td> <td>4.8149</td> <td>0.0783</td> <td>0.2883</td> <td>0.0035</td> <td>1974</td> <td>28</td> <td>1633</td> <td>17</td> <td>1788</td> <td>14</td> <td>110.4</td>	BJ03-16	44.40	108	109	0.98	0.1212	0.0019	4.8149	0.0783	0.2883	0.0035	1974	28	1633	17	1788	14	110.4	
BJ03-1811.263873361.150.04950.00230.16830.00770.02470.00031711041572158799.5BJ03-193.15901020.880.04960.00970.16710.03270.02450.000517540315631572899.4BJ03-204.872441311.850.04890.00380.16080.01210.02390.0005141171152315111100.5BJ03-2110.052653260.810.04910.00290.16810.00980.02490.000315113215821589100.4BJ03-2218.435633931.430.19450.00470.71960.01600.02690.00042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.05590.0170.49410.01470.06410.00084486540154081098.3BJ03-247.972252620.860.04930.03040.16410.0990.02420.000416113615421551099.1BJ03-254.792411270.90.04960.0250.16560.00140.02420.0004168155142156799.1BJ03-251.792.312570.9<	BJ03-17	3.35	118	96	1.23	0.0488	0.0042	0.1685	0.0143	0.0251	0.0005	136	191	160	3	158	12	101.0	
BJ03-193.15901020.880.04960.00970.16710.03270.02450.000517540315631572899.4BJ03-204.872441311.850.04890.00380.16080.01210.02390.0005141171152315111100.5BJ03-2110.052653260.810.04910.00290.16810.00980.02490.003315113215821589100.4BJ03-2218.435633931.430.19450.00470.71960.01600.02690.00042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.05590.00170.49410.01470.06410.00884486540154081098.3BJ03-247.972252620.860.04930.00340.16410.00990.02420.00041611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.0320.1660.0810.02420.0004168155154215510099.5BJ03-254.792411271.890.04960.00250.16560.0810.02420.000417811215421567<99.1BJ03-2716.8143351.2<	BJ03-18	11.26	387	336	1.15	0.0495	0.0023	0.1683	0.0077	0.0247	0.0003	171	104	157	2	158	7	99.5	
BJ03-204.872441311.850.04890.00380.16080.01210.02390.0005141171152315111100.5BJ03-2110.052653260.810.04910.00290.16810.0980.02490.00315113215821589100.4BJ03-2218.435633931.430.19450.00470.71960.01600.02690.0042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.0590.00170.49410.01470.06410.00844865401540810098.3BJ03-247.972252620.860.04930.00300.16410.00990.02420.00441611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.0340.16480.01470.02420.00441611361542154999.8BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.0044191239191321191219100.0BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.7600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671	BJ03-19	3.15	90	102	0.88	0.0496	0.0097	0.1671	0.0327	0.0245	0.0005	175	403	156	3	157	28	99.4	
BJ03-2110.052653260.810.04910.00290.16810.00980.02490.00315113215821589100.4BJ03-2218.435633931.430.19450.00470.71960.01600.02690.00042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.05590.00170.49410.01470.06410.00084486540154081098.3BJ03-247.972252620.860.04930.00300.16410.00990.02420.00041611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.0340.16480.01140.02420.000416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00041744401812356651.0BJ03-3014.773433470	BJ03-20	4.87	244	131	1.85	0.0489	0.0038	0.1608	0.0121	0.0239	0.0005	141	171	152	3	151	11	100.5	
BJ03-2218.435633931.430.19450.00470.71960.01600.02690.00042781391713551931.0BJ03-2316.86982330.420.05590.00170.49410.01470.06410.00084486540154081098.3BJ03-247.972252620.860.04930.00300.16410.00990.02420.00041611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.00340.16480.01140.02420.000416815515421551099.5BJ03-254.792411271.890.04960.00250.16560.00810.02420.000416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0034685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00041744401812356651.0BJ03-3014.773433470.99 </td <td>BJ03-21</td> <td>10.05</td> <td>265</td> <td>326</td> <td>0.81</td> <td>0.0491</td> <td>0.0029</td> <td>0.1681</td> <td>0.0098</td> <td>0.0249</td> <td>0.0003</td> <td>151</td> <td>132</td> <td>158</td> <td>2</td> <td>158</td> <td>9</td> <td>100.4</td>	BJ03-21	10.05	265	326	0.81	0.0491	0.0029	0.1681	0.0098	0.0249	0.0003	151	132	158	2	158	9	100.4	
BJ03-2316.86982330.420.05590.00170.49410.01470.006410.00084486540154081098.3BJ03-247.972252620.860.04930.00300.16410.00990.02420.00041611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.00340.16480.01140.02420.000416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671.280.6230.00270.23040.0990.2680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00041744401812356651.0BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0BJ08-015.661911731.1<	BJ03-22	18.43	563	393	1.43	0.1945	0.0047	0.7196	0.0160	0.0269	0.0004	2781	39	171	3	551	9	31.0	
BJ03-247.972252620.860.04930.00300.16410.00990.02420.00041611361542154999.8BJ03-254.792411271.890.04940.00340.16480.01140.02420.000416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671.280.06230.00270.23040.00990.02680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0基督術组上部三段安山岩(BJ12-08), GPS: N40°14'47.12", E116°15'51.48"BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.0248	BJ03-23	16.86	98	233	0.42	0.0559	0.0017	0.4941	0.0147	0.0641	0.0008	448	65	401	5	408	10	98.3	
BJ03-254.792411271.890.04940.00340.16480.01140.02420.000416815515421551099.5BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671.280.06230.00270.23040.00990.02680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.02480.00414412115821578100.6	BJ03-24	7.97	225	262	0.86	0.0493	0.0030	0.1641	0.0099	0.0242	0.0004	161	136	154	2	154	9	99.8	
BJ03-267.982312570.90.04960.00250.16560.00810.02420.00041781121542156799.1BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671.280.06230.00270.23040.00990.02680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0医警出组上部三段安山岩(BJ12-08), GPS: N40°14'47.12", E116°15'51.48"BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.02480.000414412115821578100.6	BJ03-25	4.79	241	127	1.89	0.0494	0.0034	0.1648	0.0114	0.0242	0.0004	168	155	154	2	155	10	99.5	
BJ03-2716.8143351.20.11710.00265.57600.12180.34560.0044191239191321191219100.0BJ03-2821.537275671.280.06230.00270.23040.00990.02680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0基督出生部三段安山岩(BJ12-W), GPS: N40°14'47. 12", E116°15'51. 48"BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.02480.000414412115821578100.6	BJ03-26	7.98	231	257	0.9	0.0496	0.0025	0.1656	0.0081	0.0242	0.0004	178	112	154	2	156	7	99.1	
BJ03-2821.537275671.280.06230.00270.23040.00990.02680.0003685901712211881.1BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0医醫出生部三段安山岩(BJ12-08), GPS: N40°14'47. 12", E116°15'51. 48"BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.02480.000414412115821578100.6	BJ03-27	16.81	43	35	1.2	0.1171	0.0026	5.5760	0.1218	0.3456	0.0044	1912	39	1913	21	1912	19	100.0	
BJ03-29128.196575711.150.58220.00776.08730.08120.07590.00094464194725198812224.5BJ03-3014.773433470.990.10670.00240.41920.00910.02850.00041744401812356651.0医警告出生活三段安山岩(BJ12-08), GPS: N40°14'47. 12", E116°15'51. 48"BJ08-015.661911731.10.04890.00260.16710.00880.02480.000414412115821578100.6	BJ03-28	21.53	727	567	1.28	0.0623	0.0027	0.2304	0.0099	0.0268	0.0003	685	90	171	2	211	8	81.1	
BJ03-30 14.77 343 347 0.99 0.1067 0.0024 0.4192 0.0091 0.0285 0.0004 1744 40 181 2 356 6 51.0 BJ03-30 14.77 343 347 0.99 0.1067 0.0024 0.4192 0.0091 0.0285 0.0004 1744 40 181 2 356 6 51.0 BJ08-01 5.66 191 173 1.1 0.0489 0.0026 0.1671 0.0088 0.0004 144 121 158 2 157 8 100.6	BJ03-29	128.19	657	571	1.15	0.5822	0.0077	6.0873	0.0812	0.0759	0.0009	4464	19	472	5	1988	12	224.5	
	BJ03-30	14.77	343	347	0.99	0.1067	0.0024	0.4192	0.0091	0.0285	0.0004	1744	40	181	2	356	6	51.0	
BJ08-01 5.66 191 173 1.1 0.0489 0.0026 0.1671 0.0088 0.0248 0.0004 144 121 158 2 157 8 100.6					ļ	髫髻山组上	部三段安	山岩(BJ12-	08), GPS	N40°14′4	7.12", E1	16°15′51.4	8″						
	BJ08-01	5.66	191	173	1.1	0.0489	0.0026	0.1671	0.0088	0.0248	0.0004	144	121	158	2	157	8	100.6	

	元詞	素含量(×10	-6)				同位素	素比值			年龄(Ma)						
测点号	Ph	232 mL	238 11	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	n(²⁰⁷ Pb)	∕n(²⁰⁶ Pb)	<i>n</i> (²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb)	/n(²³⁸ U)	n(²⁰⁷ Pb)	$n(^{206} \text{Pb})$	<i>n</i> (²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	$n(^{206} \text{Pb})/n(^{238} \text{U})$		谐和度
	ID总	In			测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	测值	± s	(%)
BJ08-02	169.77	202	284	0.71	0.1622	0.0019	10.4888	0.1342	0.4692	0.0054	2479	20	2480	24	2479	12	100.0
BJ08-03	56.54	71	100	0.71	0.1622	0.0021	9.9530	0.1360	0.4453	0.0052	2479	22	2374	23	2430	13	102.0
BJ08-04	162.43	254	356	0.71	0.1602	0.0019	7.8943	0.0998	0.3576	0.0041	2457	20	1971	19	2219	11	110.7
BJ08-05	90.31	97	152	0.64	0.1657	0.0023	10.8364	0.1582	0.4745	0.0058	2515	23	2503	25	2509	14	100.2
BJ8-06	15.21	28	24	1.17	0.1479	0.0047	9.5524	0.3142	0.4685	0.0087	2322	54	2477	38	2393	30	97.1
BJ8-07	39.40	140	41	3.4	0.1633	0.0027	11.1636	0.1901	0.4960	0.0066	2490	28	2596	29	2537	16	98.2
BJ8-08	145.40	182	243	0.75	0.1642	0.0020	10.5043	0.1339	0.4642	0.0053	2499	20	2458	23	2480	12	100.8
BJ8-09	3.82	39	150	0.26	0.0493	0.0045	0.1614	0.0145	0.0238	0.0004	162	199	151	2	152	13	99.6
BJ8-10	26.26	20	56	0.36	0.1387	0.0024	7.6304	0.1366	0.3993	0.0050	2210	30	2166	23	2188	16	101.0
BJ08-11	134.81	183	243	0.75	0.1617	0.0023	9.7062	0.1445	0.4356	0.0053	2473	24	2331	24	2407	14	102.7
BJ08-12	143.16	192	258	0.74	0.1648	0.0020	9.8000	0.1252	0.4316	0.0049	2505	20	2313	22	2416	12	103.7
BJ08-13	128.53	211	185	1.14	0.1631	0.0020	11.2457	0.1447	0.5005	0.0057	2488	20	2616	25	2544	12	97.8
BJ08-14	179.37	183	365	0.5	0.1619	0.0019	8.9507	0.1133	0.4011	0.0046	2476	20	2174	21	2333	12	106.1
BJ08-15	14.63	9	27	0.33	0.1600	0.0036	10.2293	0.2360	0.4638	0.0068	2456	38	2456	30	2456	21	100.0
BJ08-16	10.38	507	303	1.67	0.0483	0.0050	0.1540	0.0156	0.0231	0.0004	115	225	147	3	145	14	101.4
BJ08-17	13.09	906	290	3.12	0.0487	0.0020	0.1631	0.0068	0.0243	0.0003	134	96	155	2	153	6	100.8
BJ08-18	6.85	191	220	0.86	0.0498	0.0026	0.1683	0.0088	0.0245	0.0004	185	119	156	2	158	8	98.9
BJ08-19	220.44	386	348	1.11	0.1613	0.0019	10.3198	0.1315	0.4642	0.0053	2469	20	2458	23	2464	12	100.2
BJ08-20	10.81	618	266	2.32	0.0492	0.0040	0.1674	0.0134	0.0247	0.0004	159	178	157	2	157	12	99.9
BJ08-21	145.53	195	255	0.77	0.1649	0.0020	10.0085	0.1288	0.4405	0.0050	2506	20	2353	22	2436	12	102.9
BJ08-22	8.51	7	16	0.42	0.1543	0.0049	9.5571	0.3001	0.4496	0.0069	2394	53	2393	31	2393	29	100.0
BJ08-23	53.90	78	87	0.89	0.1640	0.0050	10.6047	0.3183	0.4692	0.0095	2497	50	2480	41	2489	28	100.3
BJ08-24	6.15	334	167	2	0.0494	0.0042	0.1584	0.0135	0.0233	0.0004	166	189	148	2	149	12	99.3
BJ08-25	3.36	159	94	1.69	0.0493	0.0062	0.1645	0.0206	0.0242	0.0005	164	270	154	3	155	18	99.6
BJ08-26	4.31	278	102	2.72	0.0491	0.0035	0.1588	0.0111	0.0235	0.0004	151	157	150	2	150	10	100.0
BJ08-27	1.02	22	37	0.59	0.0490	0.0139	0.1593	0.0451	0.0236	0.0007	147	558	150	5	150	39	100.1
BJ08-28	7.36	11	13	0.92	0.1537	0.0063	9.4232	0.3804	0.4449	0.0074	2387	68	2373	33	2380	37	100.3
BJ08-29	4.98	288	126	2.3	0.0490	0.0069	0.1617	0.0228	0.0239	0.0004	147	301	153	3	152	20	100.3
BJ08-30	4.25	256	93	2.76	0.0491	0.0140	0.1654	0.0472	0.0245	0.0005	152	560	156	3	155	41	100.2

	Appendix 2: The SHRIMP zircon U-Pb data of the volcanic rocks in Tiaojishan Formation in Western Hills area, Beijing																	
		元素	含量(×10	-6)					同位素比值	直			年龄(Ma)					
测点号	²⁰⁶ Pbc	U	Th	²³² Th	²⁰⁶ Pb *	n(²⁰⁷ Pb)	$/n(^{206}\mathrm{Pb})$	$n(^{207} \text{Pb})$	/n(²³⁵ U)	$n(^{206} Pb)$	/n(²³⁸ U)	误差相	n(²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	$n(^{206}\text{Pb})$	/n(²³⁸ U)	谐和度	
	(%)	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	²³⁸ U	(%)	测值	± %	测值	± %	测值	± %	关系数	测值	±lσ	测值	±lσ	(%)	
				BJ10-0	1:采自侵	人到九龙1	山组砂岩中	的一个闪日	长岩岩床,	GPS: N39°	58'45.2",	E115°56′36	. 4″					
BJ01-1	1.74	164	176	0.96	3.50	0.0580	23	0.1810	24	0.0227	2.6	0.111	143.2	±3.6	144.8	±3.8	98.9	
BJ01-2	-	96	131	0.76	2.57	0.0773	7.3	0.2440	7.7	0.0229	2.3	0.304	140.8	±3.4	145.9	±3.4	96.5	
BJ01-3	6.07	83	79	1.09	1.60	0.0320	66	0.0990	66	0.0222	3.4	0.052	144.6	±4.6	141.6	±4.8	102.1	
BJ01-4	4.10	73	99	0.76	2.07	0.0331	28	0.1070	28	0.0234	2.7	0.095	152.1	±4.0	149.2	±4.0	101.9	
BJ01-5	3.50	73	96	0.79	2.07	0.0472	20	0.1580	20	0.0242	2.7	0.137	154.6	±4.1	154.2	±4.1	100.3	
BJ01-6	6.95	44	57	0.80	1.21	0.0590	30	0.1880	30	0.0232	3.6	0.120	146.2	±5.0	147.9	±5.3	98.9	
BJ01-7	1.61	171	153	1.15	3.14	0.0623	12	0.2020	13	0.0235	2.2	0.178	147.5	±3.4	150.0	±3.3	98.3	
BJ101-8	5.63	117	141	0.86	2.83	0.0280	56	0.0850	56	0.0221	3.2	0.058	144.3	±4.1	140.7	±4.5	102.6	
BJ01-9	-	152	186	0.85	2.65	0.1350	32	0.3100	33	0.0166	8.5	0.257	94.7	±9.8	106.2	±8.9	89.2	
BJ01-10	-	142	153	0.96	2.62	0.0662	13	0.1820	13	0.0200	3.3	0.255	124.6	±4.3	127.4	±4.2	97.8	
BJ01-11	7.00	104	133	0.80	2.95	0.0300	74	0.0990	74	0.0240	3.5	0.047	156.8	±3.8	153.1	±5.3	102.4	
BJ01-12	2.19	116	140	0.85	3.13	0.0620	24	0.2180	24	0.0254	2.5	0.105	159.1	±4.4	161.7	±4.0	98.4	
BJ01-13	5.30	123	139	0.91	2.94	0.0340	47	0.1090	47	0.0233	2.8	0.060	151.1	±3.6	148.4	±4.1	101.8	
BJ01-14	3.39	130	142	0.95	3.13	0.0450	40	0.1540	40	0.0248	3.0	0.076	158.9	±3.5	158.0	±4.7	100.6	
BJ01-15	2.81	156	112	1.43	2.41	0.0457	15	0.1530	15	0.0243	2.4	0.160	155.5	±3.7	154.8	±3.6	100.5	
				BJ10-02	2:采自于	髫髻山组-	一段的火山	角砾岩的,	火山角砾,	GPS: N39°	58'47.8",	E115°56'33	. 1″					
BJ02-1	5.70	89	125	0.73	2.62	0.0190	97	0.0600	97	0.0230	3.0	0.031	152.1	± 3.7	146.6	±4.3	103.8	
BJ02-2	4.25	98	140	0.73	4.43	0.2400	51	1.1500	51	0.0354	2.8	0.054	173.0	± 34	224.4	±6.1	77.1	
BJ02-3	1.04	191	149	1.33	3.16	0.0700	10	0.2360	11	0.0244	2.1	0.199	151.6	± 3.4	155.6	±3.3	97.4	
BJ02-4	2.12	325	226	1.49	4.73	0.0488	16	0.1610	16	0.0239	2.0	0.123	152.1	± 2.8	152.0	±3.0	100.1	
BJ02-5	2.71	186	196	0.98	4.03	0.0341	20	0.1100	20	0.0233	2.0	0.100	151.2	± 2.9	148.4	±3.0	101.9	
BJ02-6	2.16	195	209	0.97	4.40	0.0499	16	0.1650	16	0.0240	1.9	0.122	152.9	± 3.1	153.0	±2.9	99.9	
BJ02-7	1.85	155	114	1.41	2.38	0.0440	24	0.1450	24	0.0239	3.0	0.127	153.0	± 4.8	152.1	±4.5	100.6	
BJ02-8	0.75	240	273	0.91	5.68	0.0506	6.9	0.1680	7.1	0.0240	1.8	0.248	152.8	± 2.7	153.1	±2.7	99.8	
BJ02-9	0.82	282	306	0.95	6.42	0.0447	11	0.1490	12	0.0242	1.8	0.153	155.1	± 2.6	154.2	±2.7	100.6	
BJ02-10	2.68	184	168	1.13	3.62	0.0624	15	0.2100	15	0.0244	2.3	0.146	152.5	± 3.2	155.1	±3.5	98.3	
BJ02-11	4.12	65	89	0.75	1.93	0.0710	26	0.2360	26	0.0242	4.6	0.175	149.8	± 6.6	154.0	±7.0	97.3	
BJ02-12	1.59	78	140	0.81	2.02	0.0640	17	0.2040	17	0.0231	2.7	0.163	144.6	± 3.8	147.3	±4.0	98.2	
BJ02-13	2.76	100	139	1.27	1.69	0.0510	29	0.1650	29	0.0236	2.9	0.098	149.8	± 4.5	150.1	±4.2	99.8	

附录 2:北京西山大台地区髫髻山组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析数据

		元素	含量(×10	-6)					同位素比(直			年龄(Ma)					
测点号	²⁰⁶ Pbc	U	Th	Th ²³² Th		n(²⁰⁷ Pb)/	∕n(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb).	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb).	/n(²³⁸ U)	误差相	n(²⁰⁷ Pb)	/n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb).	/n(²³⁸ U)	谐和度	
	(%)	(×10 ⁻⁶)	$(\times 10^{-6})$	²³⁸ U	(%)	测值	± %	测值	± %	测值	± %	关系数	测值	±1σ	测值	$\pm 1\sigma$	(%)	
BJ10-03:采自于髫髻山组二段的安山岩,GPS:N39°58′53.2″,E115°56′28.9″																		
BJ03-1	3.58	158	237	0.69	4.80	0.0380	27	0.1200	27	0.0227	2.1	0.079	146.7	±2.8	144.8	±3.0	101.3	
BJ03-2	4.52	129	150	0.89	3.12	0.0240	55	0.0770	55	0.0231	3.1	0.057	151.9	±4.2	147.3	±4.6	103.1	
BJ03-3	3.60	115	85	1.41	1.81	0.0660	28	0.2180	28	0.0240	3.3	0.115	149.7	±4.4	152.9	±4.9	97.9	
BJ03-4	3.05	136	194	0.72	4.04	0.0433	16	0.1400	16	0.0235	2.1	0.134	150.5	±3.1	149.5	±3.1	100.7	
BJ03-5	1.08	110	113	1.00	2.29	0.0673	9.8	0.2160	10	0.0233	3.1	0.305	144.8	±4.6	148.2	±4.6	97.7	
BJ03-6	2.64	185	222	0.86	4.67	0.0410	23	0.1350	23	0.0239	2.1	0.093	153.5	±3.0	152.0	±3.2	101.0	
BJ03-7	1.30	279	280	1.03	5.50	0.0515	10	0.1600	11	0.0225	3.2	0.298	143.2	±4.5	143.7	±4.5	99.7	
BJ103-8	4.09	218	149	1.51	2.99	0.0460	34	0.1420	34	0.0223	3.4	0.100	142.8	±4.5	142.3	±4.8	100.4	
BJ03-9	2.92	280	221	1.31	4.62	0.0449	21	0.1470	22	0.0237	2.5	0.116	151.5	±3.7	150.7	±3.7	100.5	
BJ03-10	2.04	311	317	1.01	6.60	0.0546	12	0.1790	13	0.0237	2.2	0.180	150.1	±3.2	151.2	±3.4	99.3	
BJ03-11	1.09	246	306	0.83	6.25	0.0540	9.6	0.1750	9.8	0.0235	1.8	0.179	149.1	±2.6	150.0	±2.6	99.4	
BJ03-12	2.96	232	177	1.35	3.63	0.0451	21	0.1440	22	0.0232	2.2	0.104	148.3	±3.0	147.6	±3.3	100.5	