第47卷 第4期

2024年12月

华	北他	质
NORTH	CHINA	GEOLOGY

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2024.04.04

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

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[J]. North China Geology, 47(4):37-46.

辽西金羊盆地髫髻山组火山岩锆石 U−Pb 年龄、 Hf 同位素组成及岩石地球化学特征

吴炳伟1,孙守亮2*,张 健2,周铁锁1,张海华2,崔晓磊1,张子璟1,孙 转1

(1.中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁盘锦124010;2.中国地质调查局沈阳地质调查中心,沈阳110000)

摘 要:[研究目的]辽西地区侏罗系髫髻山组火山岩不仅代表了燕山期大规模火山喷发的开始,也与华北克拉通破 坏减薄的时限、范围及机制研究密切相关。近年来,针对髫髻山组火山岩的成因研究取得了很多新认识,但其构造 背景、岩浆源区尚存在争议。[研究方法]本文选取羊D1井连续钻井岩心样品为研究对象,开展锆石U-Pb测年、Hf 同位素组成及岩石地球化学特征分析。[研究结果]锆石U-Pb测年结果表明,髫髻山组下部粗面岩锆石U-Pb年龄为 162.8±1.7 Ma,结合羊D1井土城子组底部凝灰岩153.8±1.7 Ma的U-Pb年龄,认为髫髻山组火山岩形成于晚侏罗世。 另外,髫髻山组下部粗面岩Eu负异常不明显,具有轻稀土富集、重稀土亏损以及低Sr、Yb型岩浆岩等特征,表明髫 髻山组粗面岩是由壳源岩浆在较高的压力下,经历部分熔融作用产生,并伴随有不显著的结晶分异作用;其锆石的 ɛHf(t)值为-22.1~-15.4,二阶段模式年龄(TDMC)为2.182~2.604 Ga,表明髫髻山组火山岩的岩浆源区主要来源于 晚太古代,揭示其是在太平洋板块向欧亚大陆俯冲背景下,由晚太古代下地壳基性岩石的部分熔融所形成,为后期 岩石圈地幔拆离即华北克拉通减薄准备了条件。[结论]该研究成果,明确了髫髻山组火山岩的形成时代及岩浆源 区,对探讨燕山造山带中生代岩浆演化和区域构造演化研究提供了科学依据。

关键 词:髫髻山组;锆石U-Pb测年;Hf同位素;金羊盆地;华北克拉通

创新点:本文首次选取可靠的连续钻井岩心样品,并应用锆石U-Pb年代学及Lu-Hf同位素分析方法,为明确髫髻山组的时代归属及岩浆源区提供了新的证据;所取得的研究成果,对探讨燕山造山带中生代岩浆演化和区域构造演化研究提供了科学依据。

中图分类号:P588.1;P597.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0188(2024)04-0037-10

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

WU Bingwei¹, SUN Shouliang^{2*}, ZHANG Jian², ZHOU Tiesuo¹, ZHANG Haihua², CUI Xiaolei¹, ZHANG Zijing¹, SUN Zhuan¹

收稿日期:2024-07-19

基金项目:中国地质调查局项目:"辽西地区中新元古界油气资源调查评价"(DD20242686);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项:"辽河探区可持续规模增储勘探关键技术研究"(2017E-1601);辽河油田公司科技项目:"辽河坳陷区域构造演化与主要构造层分布"(2023QZJC-02)联合资助

*通讯作者:孙守亮(1982—),男,高级工程师,主要从事事件地层学及油气资源调查与研究工作,E-mail:sunsolar@qq.com。

作者简介:吴炳伟(1967一),男,高级工程师,主要从事基础石油地质研究工作,E-mail:wubw673@163.com。

(1.Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin Liaoning 124010, China; 2.Shenyang Center of Geological Survey, China Geological Survey, Shenyang 110000, China)

Abstract: This paper is the result of geochemical research.

[Objective] The volcanic rocks of the Tiaojishan Formation in Western Liaoning not only represent the beginning of the Yanshanian large-scale volcanic eruption, but also are closely related to the time, scope and mechanism of the Craton weakening in North China. In recent years, a lot of new understanding has been obtained on the petrogenesis of the Tiaojishan Formation volcanic rocks, but its tectonic background, magmatic source area are still controversial. [Methods]Zircon U-Pb dating, Hf isotope composition and geochemical characteristics were analyzed in the core samples from the continuous drilling of borehole Yang D1. [Results]The results of zircon U-Pb dating show that the zircon U-Pb age of trachyte in the lower part of Tiaojishan Formation is 162.8±1.7 Ma, and the U-Pb age of tuff at the bottom of Tuchengzi Formation is 153.8 ± 1.7 Ma. We believe that the volcanic rocks of Tiaojishan Formation formed in the Late Jurassic. In addition, the trachyte of Tiaojishan Formation is characterized by light rare earth enrichment, heavy rare earth deficit, and low Sr and Yb-type magmatic rocks, which indicates that the trachyte of Tiaojishan Formation is produced by partial melting of crustal magma under high pressure and accompanied by insignificant crystallization differentiation. The ϵ Hf (t) values of the zircons range from -22.1 to -15.4, and the two-stage model ages (TDMC) range from 2.182 ~ 2.604 Ga, indicating that the Tiaojishan Formation is mainly derived from the late Archean magma source, which indicates that the Tiaojishan formation was formed by the partial melting of the basic rocks in the lower crust under the background of the Pacific plate subduction to Eurasia continent. [Conclusions]The research results define the formation age and magma source area of the Tiaojishan Formation volcanic rocks, and provide a scientific basis for exploring the Mesozoic magmatic and regional tectonic evolution of the Yanshan orogenic belt.

Key words: Tiaojishan Formation; zircon U-Pb dating; Hf isotope; Jinyang Basin; North China craton

Highlights: This article selects reliable continuous drilling core samples for the first time and applies zircon U-Pb geochronology and Lu Hf isotope analysis methods to provide new evidence for clarifying the age attribution and magma source area of the Tiaojishan Formation. The research results obtained provide a scientific basis for exploring the Mesozoic magmatic evolution and regional tectonic evolution of the Yanshan orogenic belt.

About the first author: Wu Bingwei, male, born in 1967, Senior Engineer, Engaged in petroleum geological research; E-mail: wubw673@163.com.

About the correspongding author: SUN Shouliang, male, born in 1982, Senior Engineer, Engaged in stratigraphy and petroleum geological exploration and research; E-mail:sunsolar@qq.com.

Fund support:Supported by China Geological Survey program(No.DD20242686), Major Science and Technology Projects of China National Petroleum Corporation Limited(No.2017E-1601), Technology projects in Liaohe Oilfield(No.2023QZJC-02).

近年来,华北克拉通破坏减薄的时限、范围及机制已成为国内外研究的热点(嵇少丞等,2008;朱日祥等,2009;刘明启等,2018;Geng et al.,2019;蒋俊毅等,2020)。辽西地区位于华北克拉通北缘的东段,是研究华北克拉通岩石圈破坏减薄的理想地区。该地区中生代以来发生了多次火山活动,其中髫髻山组火山岩喷发规模最大、分布广泛,在北票盆地、金羊盆地、凌源一宁城盆地等多个地区均有发育,代表了燕山期大规模火山喷发的开始(赵越等,2004)。

近年来,多位学者针对华北克拉通北缘的髫髻 山组火山岩开展了地质学、岩石学及岩石地球化学 研究工作,取得了很多新成果。由于髫髻山组火山 岩的形成涉及多个复杂的地质过程和因素,加之研 究者对这些过程的不同理解,导致了髫髻山组火山 岩成因、构造背景、岩浆源区存在争议。白春东等 (2024)认为髫髻山组火山岩岩浆形成于加厚地壳背 景,由碱性玄武岩与高分异新太古代地壳物质混合 物部分熔融形成;袁洪林等(2005)则认为是拆沉作 用导致软流圈地幔上涌,造成的下地壳物质的部分 熔融;杨济远等(2024)认为其火山岩形成于挤压大 陆边缘火山弧构造背景,源于大陆地壳的物质熔融; 王蕊等(2007)和马强等(2009)的研究则表明其来源

于壳幔岩浆混合的结果。

然而,以往研究多集中于华北克拉通北缘的中 段,并主要利用露头样品开展测试研究工作。由于 地表露头未见顶底,难以有效确定样品位置,导致测 年数据差异较大,不利于火山岩成因及岩浆源区等 方面研究。本文选取辽西金羊盆地羊D1井的髫髻 山组岩心样品为研究对象,开展锆石U-Pb年代学、Hf 同位素组成及岩石地球化学特征分析,厘定了髫髻 山组的形成年龄,结合年代学样品附近地层的岩石 地球化学特征分析,以期为明确髫髻山组火山岩成 因、构造背景、岩浆源区提供新的地质证据,对探讨 燕山造山带中生代岩浆演化和区域构造演化具有特 别的指示作用。

1 地质背景与样品来源

1.1 地质背景

辽西地区大地构造上位于华北北缘中生代燕山

造山带东延部分(图1a)。自燕山造山运动以来,区 域上经历了多旋回、多期次火山喷发。根据火山岩 地层层序、喷发韵律、岩石组合等,该时期的火山岩 自下而上可划分为早侏罗世兴隆沟期、中一晚侏罗 世髫髻山期、早白垩世义县期(图1c)。其中髫髻山 组主要分布于金羊盆地的东侧(图1b),底部整合压 盖于海房沟组复成分砾岩之上,顶部被土城子组一 段安山质砾岩平行不整合覆盖。

羊D1井位于金羊盆地北部章吉营子凹陷,钻遇 地层自上而下依次为:0~1207m晚侏罗一早白垩统 土城子组,为一套干化湖、冲积扇至风积成因的粗碎 屑沉积;1207~2019.22m为中一晚侏罗统髫髻山 组,岩性主要为灰绿色一灰紫色辉石安山岩、安山岩 质角砾集块熔岩及流纹斑岩、粗面岩等,偶夹凝灰质 粉砂岩、角砾凝灰岩(图1d)。

羊D1井髫髻山组中见七个火山熔岩一火山碎 屑岩一火山碎屑沉积岩喷发旋回。总体而言,火山





40

岩类占绝对优势,沉积岩类仅在各旋回顶部出现,表 现为"下绿上紫"的旋回特征。土城子组与髫髻山组 之间的过渡关系,单从羊D1井的钻井岩心来看,两 者之间并无明显沉积间断。髫髻山组顶部,火山喷 发作用减弱,沉积岩或火山碎屑沉积岩大段出现,且 碎屑成分中火山物质逐渐减少。该过渡关系代表了 盆地从整体挤压向断陷发展的转折。

1.2 样品描述

本文所采集样品为髫髻山组底部(1992.5 m)灰 紫色粗面岩(图2a),开展锆石LA-ICP-MS U-Pb同位 素测年及锆石原位Lu-Hf同位素测定。另外,对髫髻 山组(1992.5 m)灰紫色粗面岩上下地层中采集了5 件火山岩岩心样品,开展岩石地球化学分析,具体采 样位置见图1d。

粗面岩(YD1-1992.5)见气孔及多孔熔渣构造, 斑状结构。斑晶主要为条纹长石、斜长石,表面模糊 泥化,含量约占7%左右;暗色矿物为黑云母及角闪 石,约占3%左右,已全部暗化呈假象;基质成分为 正长石,半自形长柱状,发育卡氏双晶,近平行消光 (图2b)。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年代学分析方法

锆石分选、制靶及照相在河北省廊坊区域地质 调查院矿物分选实验室完成。首先样品破碎至粒 级,经过清洗、烘干和筛选,并采用磁选和重液分离 技术分选出不同粒级的锆石晶体,然后通过双目镜 挑选颗粒相对完整的锆石晶体开展锆石制靶。最后 通过阴极发光照相技术观察其内部结构。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析在中国科 学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实 验室完成,所用仪器为 AnlyitikJena PQMS Elite ICP-MS及ESI NWR193 nm 准分子激光剥蚀系统。 激光剥蚀以He为载气,斑束直径为25 um,频率为 10 Hz,能量密度约为2.31 J/cm²。LA-ICP-MS 激光 剥蚀采样采用单点剥蚀的方式。为使仪器达到最优 状态,在测试前通过锆石标样GJ-1对仪器进行调试 (Liu et al., 2010a)。锆石 U-Pb 定年以标样 GJ-1 为外 标,微量元素含量采用以SRM 610做为外标,以Si做 内标的方法进行定量计算(Liu et al., 2010b)。数据 处理采用 ICPMSDataCal 程序,本次测量绝大多数样 品分析点206Pb/204Pb值均大于1000,未进行普通铅校 正。另外,考虑到204Pb含量异常可能受包裹体等普 通Pb的影响,因此对204Pb含量异常高的分析点在计 算时进行了剔除。锆石年龄U-Pb谐和图、年龄分布 频率图的绘制,年龄权重平均的计算均采用Isoplot3.0计算机程序完成(Ludwig, 2003)。

2.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析方法

在LA-ICP-MS U-Pb年龄测定的基础上,选取了 全部测点进行了锆石原位Lu-Hf同位素测试。本次研 究所做的测试工作是在中国科学院地质与地球物理 研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。测试流程、 仪器运行条件见参考文献(Xu et al., 2004)。样 品¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值采用¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu=0.026



图2 取样岩芯及其岩性的照片和显微照片 Fig.2 Photos and micrographs of sampled rock cores and their lithology a一粗面岩(样品 YD1-1992.5);b一透射光

69(Biévre et al., 1993)和¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb=0.588 6(Chu et al., 2006)进行的同量异位干扰校正。样品测试过程 中获得的锆石标样 GJ-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf= 0.282 007 ± 0.000 036(2SD, n= 11)。计算过程中采用¹⁷⁶Lu衰变 常数 λ =1.867×10⁻¹¹year⁻¹(Söderlund et al., 2004),球粒 陨石现今的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282 772及¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.332 (Blichert-Toft et al., 1997),现今亏损地幔¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf= 0.283 25和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.038 4(Griffin et al., 2000), 平均大陆壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.015(Griffin et al., 2002)。

3 分析结果

3.1 髫髻山组火山岩锆石 U-Pb 测年

根据粗面岩(YD1-1992.5)CL图像显示(图3), 锆石多为自形到半自形,发育清晰的岩浆震荡环带; 少量锆石核部结构模糊,多呈短柱状,粒径主要集中 在60~90μm之间,长宽比介于1/1到1/2之间;部分 锆石有不同程度的溶蚀、破碎、磨圆,主体显示为岩 浆成因锆石。另外,粗面岩(YD1-1992.5)25颗锆石 Th含量介于93×10⁶~1292×10⁶之间,U含量介于 68×10⁶~386×10⁶之间,所有分析点的Th/U比值在 1.26~3.55之间,平均为1.99,均大于0.4,具有典型的 岩浆锆石成因特点。

粗面岩(YD1-1992.5)25颗锆石U-Pb测试的同 位素及年龄数据见表1。其25个有效锆石分析点 的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄在156.5~170.5 Ma之间,在锆石U- Pb年龄谐和曲线图中,数据均落在谐和线上或附近(图4a),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为162.8±1.7 Ma(MSWD=1.5,图4b),代表了髫髻山组下部粗面岩的结晶年龄。

3.2 髫髻山组火山岩地球化学特征

 髫髻山组粗面岩样品 SiO₂含量变化范围较大,
 从 64.74% 致 73.80% 均有分布,平均 69.07%; Al₂O₃含
 量 介于 12.87%~17.33%,平均 15.00%; ω(Na₂O)/ω
 (K₂O)比值为1.23~1.71,平均1.40;K₂O+Na₂O含量较
 高,为8.84%~11.15%,CaO含量介于0.71%~1.42%,
平均 1.02%; TiO₂含量介于0.31%~0.43%; MgO含量
 介于0.25%~0.50%。另外,在SiO₂一碱总量图解中
 (图 5a),粗面岩主要落在粗面岩区和流纹岩区。在
 SiO₂-K₂O图解中(图 5b),髫髻山组火山岩属于高钾
 钙碱性系列,表明髫髻山组火山岩整体富钾。另外,
 A/CNK 值[Al₂O₃/(CaO+K₂O+Na₂O)的摩尔比]介于
 0.93~0.95之间,在A/CNK-A/NK 图解中(图 5c),髫 髻山组火山岩属于准铝质—弱过铝质岩石。

从哈克图解(图7)中可以看出, 髫髻山组火山岩 随着 SiO₂含量的升高, TFeO、MgO、CaO、Al₂O₃、TiO₂ 和P₂O₅含量均有降低趋势, K₂O含量为升高趋势, 而 Na₂O含量没有明显的变化。从髫髻山组火山岩的球 粒陨石标准化稀土元素配分图(图 6a)中可以看出, 该期火山岩富集轻稀土元素(LREEs)、亏损重稀土元 素(HREEs), (La/Yb)N比值介于16.66~20.47之间,



图3 辉石安山岩及粗面岩中典型锆石的阴极发光图像 Fig.3 Cathodoluminescence images of typical zircons in pyroxene andesite and trachyte a一辉石安山岩(YD1-1272.1);b一粗面岩(YD1-1992.5) 圆圈表示激光烧蚀电感耦合等离子体质谱Hf分析的位置,圆圈中的数字表示 *e*Hf(t)值,斜体数字表示点编号















Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams(b) (chondrite and primitive mantle normalization factors are from Sun and Mcdonough., 1989)

2024年

同时存在微弱的 Eu 异常, Eu/Eu*[2*EuN/(SmN+GdN)]介于 0.73~0.97之间。原始地幔标准化微量 元素蛛网图(图 6b)显示该期侵入岩相对富集大离子 亲石元素(LILEs, 如 Ba、Rb、K等), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(HFSEs)。

3.3 髫髻山组火山岩的Hf同位素组成

 髫髻山组粗面岩样品的锆石Hf同位素分析可见, 粗 面 岩 (YD1 - 1992.5) 25 颗 锆 石 中 除 6 颗 锆 石 的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值大于0.002外(0.002 056~0.003 347, 平均为0.002 432),其余锆石均小于0.002(0.001 225 ~0.001 974,平均为0.001 690),样品总的平均值 0.001 868。另外,所有锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值分布于 0.282 049~0.282 247,按照对应的锆石 U-Pb表面年 龄计算, ϵ Hf(t)值为-22.1~-15.4,平均为-19.6;亏损地 幔模式年龄(T_{DM})变化范围为1.468~1.726 Ga,平均 地壳模式年龄(T_{DM}^C)为2.184~2.612 Ga,平均年龄为 2.45 Ga。计算公式据吴福元等(2007)。

4 讨论

4.1 髫髻山组火山岩的形成时代

然而,前人研究多是利用露头样品开展分析,难 以有效地约束地层层序,横向对比较为困难,本次研 究应用全井段取心的钻井岩心样品,加之对地层接 触关系的认识,可以更好约束髫髻山组形成时代。 本文通过对来自于羊 D1 井 1992.5 m 处的粗面岩 (YD1-1992.5)应用LA-ICP-MS 锆石 U-Pb测年方法, 获得辽西地区髫髻山组中下部粗面岩成岩年龄为 162.8±1.7 Ma。另外,结合羊 D1 井 878 m处土城子组 底部凝灰岩夹层 U-Pb 年龄 153.8±1.7 Ma,可作为金 羊盆地髫髻山组火山岩上限年龄的约束(Sun et al., 2022)。因此,本文认为辽西金羊盆地髫髻山组火山 岩的形成时限介于153~162 Ma之间,属晚侏罗世。

4.2 髫髻山组火山岩的岩石成因及源区特征

有关粗面岩的成因目前的认识主要有以下三种: (1)由地幔源的镁铁质岩浆结晶分异作用产生(Lucassen et al., 2013),该种情况下中酸性端元与基性端元 的火山岩具有共同的母岩浆源区,同时具有类似的同 位素和微量元素分布形式;(2)加厚的下地壳在高压 背景下部分熔融作用而产生(Deng JF et al., 1998); (3)幔源镁铁质岩浆与壳源花岗质岩浆通过混合作 用产生(Chen et al., 2012)。一般认为粗面质岩浆很 难通过地壳岩石部分熔融作用而产生(Litvinovsky et al., 2000),而来自实验岩石学的证据表明,粗面质 岩浆可以通过高压条件下的下地壳部分熔融而产生 (Montel et al., 1997),但此种情况要求为增厚下地壳 的构造环境(Wyllie et al., 1977)。

羊D1井髫髻山组粗面岩具有不明显的Eu负异常,轻稀土富集, Σ LREE/ Σ HREE的值介于14.49~15.43,指示轻重稀土分馏较为明显,配分曲线具有右倾的特征(图 6a)。另外,5件粗面岩样品Sr质量分数为205×10⁻⁶~464×10⁻⁶,平均为286×10⁻⁶,小于400×10⁻⁶;Yb的质量分数为1.24×10⁻⁶~1.82×10⁻⁶,平均为1.46×10⁻⁶,小于2×10⁻⁶,岩浆岩的这一特征属于低Sr、低Yb型岩浆岩特征,指示岩石是在中等或者较高的压力下形成的,表明其可能形成于相对加厚的地壳背景,推测羊D1井粗面岩岩浆是在加厚地壳的重熔形成。

羊D1井粗面岩的Nb/U比值介于11.68~19.34之 间,平均为16.07。原始地幔的Nb/U值为34,洋岛玄 武岩值为46。羊D1井粗面岩的Nb/U值与原始地 幔、洋岛玄武岩的值相差很大,而与大陆地壳的Nb/ U比值9.7更为接近(Rudnick and Fountain, 1995), 说明该粗面岩岩浆主要为地壳组分。岩石具有较高 的Al₂O₃、SiO₂及全碱(Na₂O + K₂O)含量,较低的 MgO含量,指示该粗面岩岩浆可能来自于壳源。同 时,5件样品均具有富集大离子亲石元素和轻稀土元 素,高场强元素亏损等特征,而这些特征也表明其可 能来自壳源的岩浆源区。

羊D1井粗面岩含有丰度较高的Rb、Ba,Zr等陆 壳中的不相容元素,而Th、U含量较低等,这与明显 44

质

亏损U、Th的华北克拉通下地壳的特征相吻合(Gao et al., 1998),表明该粗面质岩浆的形成与下地壳具有密切的关系(汪洋等,2010)。另外,Nb、Ti、Ta等微量元素在蛛网图中为波谷,为亏损的特征,这也表明粗面岩浆为陆壳源(李伍平等,2000)。

从哈克图解可以看出(图7),在岩浆演化过程中,一些元素的演化趋势呈现出斜率较为一致的特征,如P₂O₅,Na₂O,Al₂O₃以及TiO₂等,伴随SiO₂含量的升高,这些元素显示出明显的负相关性。有些元素随着SiO₂含量升高其分布趋势较为凌乱,不具备明显的相关性特征,如MgO和K₂O。以上特征指示岩浆在演化过程中具有一定程度的结晶分异,但其结晶分异作用较为微弱或者不太显著,仅部分元素的含量值发生了变化。另外,负Sr和负Eu异常指示斜长石在岩浆演化过程中经历了结晶分异,P的负异

常则表明了磷灰石经历了结晶分异。综上表明,羊 D1井髫髻山组粗面岩是由壳源岩浆在较高的压力 下,经历部分熔融作用产生,并伴随有不显著的结晶 分异作用。

对羊D1井髫髻山组底部(1992.5 m)灰紫色粗面 岩锆石进行了Hf同位素分析,其锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值 都小于0.002,这表明锆石在形成后期,通过放射性成 因累积的Hf非常有限。样品中25颗锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf的 比值介于0.282 049~0.282 247间,比值分布均一。 通过计算,其 $\epsilon_{\rm Hf}$ (t)分布在-15.4~-22.1之间,对应的 T_{DM}^c为2.182~2.604 Ga。以往研究认为,大陆地壳 相对于亏损地幔而言,具有更低的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值和 $\epsilon_{\rm Hf}$ (t)值(Patchett et al., 1982)。在锆石 Hf 同位素特征 图中(图8),样品均位于地壳附近,反应其岩浆源区 为古老的地壳物质。火山岩具有负 $\epsilon_{\rm Hf}$ (t)通常代表古









老的地壳成因,一般是地壳物质部分熔融的产物(吴 福元等,2007),火山岩的二阶段模式年龄(T_{DM}^c)介于 2.182~2.604 Ga间,基本与华北克拉通北段太古宙 花岗片麻岩和钾质花岗岩中提取的锆石的Hf平均地 壳模式年龄相同(杨进辉等,2006)。另外也与洪大 卫等(2003)、Wu et al(2005)报道的华北克拉通花岗 岩全岩 Nd模式年龄相当。可见髫髻山组下部粗面 岩来自于晚太古代形成地壳物质的部分熔融。

已有研究表明,自早侏罗世开始,古太平洋板块 向欧亚大陆斜向俯冲,中国东部进入太平洋构造体 系(唐杰等,2018)。中一晚侏罗世时期,随着大洋板 块持续俯冲致使华北克拉通岩石圈加厚,进而导致 幔源岩浆底侵熔融(吴福元,2003)。因此我们认为, 髫髻山组火山岩的岩浆源区主要来源于晚太古代, 揭示其是在太平洋板块向欧亚大陆俯冲背景下,由 晚太古代下地壳基性岩石的部分熔融所形成的。

5 结论

(1) 羊 D1 井髫髻山组下部粗面岩锆石 U-Pb 年龄 为 162.8±1.7 Ma,结合羊 D1 井土城子组底部凝灰岩 夹层 U-Pb 年龄 153.8±1.7 Ma,认为髫髻山组火山岩 形成时限介于 153~162 Ma之间,属晚侏罗世。

(2) 髫髻山组下部粗面岩 Eu 负异常不明显,具有 轻稀土富集、重稀土亏损以及低 Sr、Yb 型岩浆岩等特 征,表明髫髻山组粗面岩是由壳源岩浆在较高的压 力下,经历部分熔融作用产生,并伴随有不显著的结 晶分异作用。

(3) 髫髻山组粗面岩样品中锆石 εHf(t)介于-15.4 ~-22.1之间, 二阶段模式年龄(T_{DM}^c)为2.182~2.604 Ga, 表明其火山岩的岩浆源区主要来源于晚太古代, 揭示其是在太平洋板块向欧亚大陆俯冲背景下, 由 晚太古代下地壳基性岩石的部分熔融所形成。

中文参考文献

- 白春东,许凡,李泽阳,等.2024.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[J].矿物岩石地球化学通报, 43(3):636-653.
- 洪大卫,王涛,童英,等.2003.华北地台和秦岭一大别一苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程[J].地学前缘,10(03): 231-256.
- 嵇少丞,王茜,许志琴.2008.华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J].地质 学报,82(2):174-193.
- 蒋俊毅,苏尚国,崔晓亮,等.2020.早白垩世华北克拉通东部岩石圈 减薄过程和机制:来自河北西石门杂岩体的证据[J].岩石学报,36 (02):356-390.
- 李斌,陈井胜,刘淼,等.2019. 辽西髫髻山组的形成时代及地球化学 特征[J]. 地质论评,(s1):63-64.
- 李伍平,路凤香.2000.北京西山东岭台组(J₃d)火山岩的成因及其 构造环境探讨[J].岩石学报,16(3):345-352.
- 刘明启,李忠海.2018. 克拉通岩石圈减薄与破坏机制的动力学数值 模拟[J].中国科学:地球科学,48:844-877.
- 马强,郑建平.2009. 辽西北票蓝旗组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同 位素组成.岩石学报,25(12):3287-3297.
- 唐杰,许文良,王枫,等.2018.古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历 史:东北亚陆缘中生代一古近纪岩浆记录[J].中国科学:地球科 学,48(5):549-583.
- 汪洋,程素华.2010.张家口地区张家口组火山岩元素地球化学特征 及成因[J].矿物岩石,1:75-82.
- 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[J].高校地质学报,13(03):603-612.
- 吴福元,葛文春,孙德有,等.2003.中国东部岩石圈减薄研究中的几 个问题[J].地学前缘,10(03):51-60.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等.2007.Lu-Hf同位素体系及其岩石学应 用[J].岩石学报,23(2):185-220.
- 杨济远,胡新茁,周敬,等.2024. 冀西北宣化盆地髫髻山组粗面岩年 代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 物探与化探,48(1):1-14.
- 杨进辉,吴福元,邵济安,等.2006.冀北张一宣地区后城组、张家口 组火山岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素.地球科学,31(1):71-80.
- 于海飞,张志诚,帅歌伟,等.2016.北京十三陵一西山髫髻山组火山 岩年龄及其地质意义[J].地质论评,62(4):807-826.
- 袁洪林,柳小明,刘勇胜,等.2005.北京西山晚中生代火山岩U-Pb

46

锆石年代学及地球化学研究[J].中国科学(地球科学),35(9): 821-836.

- 张宏,袁洪林,胡兆初,等.2005. 冀北滦平地区中生代火山岩地层锆 石U-Pb测年及启示[J].地球科学:中国地质大学学报,30(6):707-720.
- 赵越,张拴宏,徐刚,等.2004.燕山板内变形带侏罗纪主要构造事 件[J].地质通报,23(9-10):854-863.
- 朱日祥,郑天愉.2009.华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体 系[J].科学通报,54:1950-1961.

References

- Biévre P D, Taylor P D P. 1993. Table of the isotopic compositions of the elements[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 123 (2): 149 - 166.
- Blichert-Toft J, Francis Albarède. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 148(1-2):0-258.
- Chen J L, Zhao W X, Xu J F, et al. 2012. Geochemistry of Miocene trachytes in Bugasi, Lhasa block, Tibetan Plateau: Mixing products between mantle and crust-derived melts?[J]. Gondwana Research , 21(1): 112-122.
- Chu M F, Chung S L, Song B, et al. 2006. Zircon U-Pb and Hf siotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. Geology, 34(9):745-748.
- Deng J F, Luo Z H, Zhao H L, et al. 1998. Trachyte and syenite: Petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium[C]. In: Collected Works of International Symposium on Geological Science Held at Peking University. Beijing: Seismological Press: 745-757.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62(11): 1959-1975.
- Geng Xianlei, Stephen F. Foley, Liu Yongsheng, et al. 2019. Thermalchemical conditions of the North China Mesozoic lithospheric mantle and implication for the lithospheric thinning of cratons[J]. Earth and Planetary Science Letters: A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System, 516:1-11.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jet al. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1):133-147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, et al. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, se china: in-situ analysis of hf isotopes, tonglu and pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 61(3-4), 237-269.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, Mitchell S F. 2007. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram[J]. Journal of Petrology, 48(12): 2341 – 2357.

- Litvinovsky B A, Steele I M, Wickham S M. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: Melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. Journal of Petrology, 41(5): 717 – 737.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. 2010b. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin,55(15):1535-1546.
- Lucassen F, Pudlo D, Franz G, et al. 2013. Cenozoic intra-plate magmatism in the Darfur volcanic province: Mantle source, phonolitetrachyte genesis and relation to other volcanic provinces in NE Africa[J]. International Journal of Earth Sciences, 102(1):183 – 205.
- Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley CA: Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2003.
- Montel J M, Vielzeuf D P. 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Composition of minerals and melts[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 128: 176-196.
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. 1982. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 78(3):279-297.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. Reviews of Geophysics, 33(3): 267.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. 2004. The ~(176)Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 219(3-4):311-324.
- Sun S L, Chen S W, Yang Z J, et al.2022. Age of the Tuchengzi Formation in Western Liaoning Province and the Jurassic – Cretaceous Boundary from the Continuous Core Records of Well YD1, Jinyang Basin[J]. Minerals, 12(8): 953.
- Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. Geological Society of London Special Publications, 42:313-345.
- Wu F Y, Zhao G C, Wild S A, et al. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North Chian Craton[J]. Joural of Aian Earth Sciences, 24(5):523-545.
- Wyllie P J. 1977. Crustal anatexis: An experimental review[J]. Tectonophysics, 43(1-2): 41-71.
- Xu P, Wu F Y, Xie L W, et al. 2004. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons for U-Pb Dating[J]. Chinese Science Bulletin,49 (15): 1642-1648.