



引文格式: 苏霖, 郭磊, 童英, 等. 南蒙古-中蒙边界地区晚中生代花岗岩伸展穹隆的构造-热演化史: 来自低温热年代学的约束[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 270-290. DOI: 10.12401/j.nwg.2025020

Citation: SU Lin, GUO Lei, TONG Ying, et al. Tectono-Thermal Evolution of Late Mesozoic Extensional Granite Domes in Southern Mongolia and the Sino-Mongolian Border Region: Constraints from Low-Temperature Thermochronology[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 270-290. DOI: 10.12401/j.nwg.2025020

## 南蒙古-中蒙边界地区晚中生代花岗岩伸展穹隆的构造-热演化史: 来自低温热年代学的约束

苏霖<sup>1</sup>, 郭磊<sup>1,\*</sup>, 童英<sup>1</sup>, 张颖慧<sup>1</sup>, 黄河<sup>1</sup>, Tserendash Narantsetseg<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 蒙古科学院地质研究所, 蒙古 乌兰巴托 13120)

**摘要:** 南蒙古-中蒙边界地区是东北亚伸展构造发育的重要区域, 晚中生代花岗岩穹隆的形成和热演化对于理解区域伸展机制和动力学具有重要意义。笔者采用磷灰石裂变径迹和锆石(U-Th)/He等低温热年代学方法, 结合<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar热年代学数据对南蒙古及邻区的罕乌拉、Nartyn和Altanshiree等3个花岗岩穹隆的构造热演化过程进行分析, 结果显示3个穹隆韧性剪切带的磷灰石裂变径迹年龄为(104.9±5.8) Ma、(101.3±5.5) Ma、(110.7±6.2) Ma、(110.1±7.4) Ma, 锆石(U-Th)/He年龄为(123.4±7.4) Ma、(123.7±7.4) Ma, 黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄为(123.9±0.9) Ma、(121.3±1.4) Ma, 钾长石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄为(122.2±1.2) Ma、(122.3±0.8) Ma。热史模拟结果表明, 晚中生代3个穹隆均经历了明显的隆升, 根据隆升速率的差异可分为3个阶段: ①133~125 Ma为中等速度隆升。②125~123 Ma为快速隆升。③123~100 Ma为缓慢隆升。穹隆隆升过程与区域性岩浆作用及伸展构造活动紧密相关: 早期岩浆开始侵入并加热地壳, 导致地壳岩石圈强度降低, 诱导穹隆隆升, 后期区域性拉张背景促使穹隆快速隆升, 此外, 隆升活动与东北亚早白垩世其他典型变质核杂岩伸展事件具有一致性。蒙古鄂霍茨克洋闭合后垮塌引发的岩石圈伸展与古太平洋板块俯冲后回撤可能共同驱动了穹隆的隆升。

**关键词:** 花岗岩穹隆; 低温热年代学; 冷却历史与隆升过程; 南蒙古; 东北亚

中图分类号: P58; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0270-21

### Tectono-Thermal Evolution of Late Mesozoic Extensional Granite Domes in Southern Mongolia and the Sino-Mongolian Border Region: Constraints from Low-Temperature Thermochronology

SU Lin<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>1,\*</sup>, TONG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Yinghui<sup>1</sup>, HUANG He<sup>1</sup>, Tserendash Narantsetseg<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Mongolia Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13120, Mongolia)

收稿日期: 2024-11-10; 修回日期: 2024-12-21; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“东北亚地区早白垩世不对称花岗岩穹隆群的形成机制及其对伸展过程的制约”(41972225), 中国地质调查局项目“中生代松辽盆地周缘复合造山带岩浆演化及成矿效应专题地质调查”(DD20230213)联合资助。

作者简介: 苏霖(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事低温热年代学与成矿要素研究。E-mail: 185979777@qq.com。

\*通讯作者: 郭磊(1981-), 男, 副研究员, 主要从事伸展构造、穹隆和构造年代学研究。E-mail: guolei\_cn@sina.com。

**Abstract:** The South Mongolia–Central Mongolia border region is a significant area for the development of extensional tectonics in Northeast Asia. The formation and thermal evolution of Mesozoic granite domes in this region provide key insights into the mechanisms and dynamics of regional extension. This study combines low-temperature thermochronology techniques, including apatite fission-track dating, zircon (U-Th)/He dating and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating to analyze the tectonothermal evolution of three granite domes (Hannuula, Nartyn, and Altan-shiree) across South Mongolia and adjacent areas. The results indicate that the ages of apatite fission-track dating from the ductile shear zones of these domes are (104.9±5.8)Ma, (101.3±5.5) Ma, (110.7±6.2) Ma, and (110.1±7.4) Ma, The zircon (U-Th)/He ages are (123.4±7.4)Ma and (123.7±7.4) Ma; biotite  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  ages are (123.9±0.9) Ma and (121.3±1.4) Ma; and K-feldspar  $^{40}\text{Ar}$ / $^{39}\text{Ar}$  ages are (122.2±1.2) Ma and (122.3±0.8) Ma. Thermal history modeling reveals that all three domes underwent significant uplift during the Late Mesozoic with three distinct uplift phases: ① moderate uplift between 133 and 125 Ma. ② rapid uplift from 125 to 123 Ma, and ③ slow uplift from 123 to 100 Ma. The uplift of the domes is closely linked to regional magmatism and extensional tectonics. Early magmatic intrusions heated the crust, reducing lithospheric strength and inducing dome uplift, while regional extension during the later stages promoted rapid uplift. Furthermore, the uplift events are consistent with other extensional events associated with metamorphic core complexes in Northeast Asia during the Early Cretaceous. Lithospheric extension triggered by the collapse of the Mongol-Okhotsk Ocean and the rollback of the subducted Pacific Plate likely played a key role in driving the uplift of these granite domes.

**Keywords:** granite dome; low temperature thermochronology; cooling history and uplift process; Southern Mongolia; Northeast Asia

东北亚地区作为典型的构造拼贴区域, 主要由中亚造山带(Sengör, 1993; Sengör et al., 1996)、华北克拉通、秦岭—大别造山带、华南地块和西太平洋边缘部分块体组成(王涛等, 2022 及所引文献)(图1)。西伯利亚克拉通、华北克拉通和华南地块经历新元古代至早古生代构造事件, 之后受到3个显生宙构造域(古亚洲洋, 特提斯洋和西太平洋构造域)的深远影响(Xiao et al., 2003, 2018; Zhang et al., 2009; Li et al., 2011)。古亚洲洋与蒙古—鄂霍茨克洋分别于晚二叠世—早三叠世(Wilde, 2015)、早白垩世前完成闭合, 这也导致西伯利亚克拉通与华北克拉通拼贴(Huang et al., 2018, 2020), 东北亚地区构造格架初步形成。晚中生代, 东北亚在蒙古—鄂霍茨克洋、古太平洋和特提斯洋构造体制的共同影响下, 发生板块回撤、加厚陆壳拆沉等作用并诱发面积超过300万 $\text{km}^2$ 的地壳伸展, 形成世界上最大的地壳伸展域, 且该区域发生的大规模伸展叠加于前中生代挤压事件之上(Davis et al., 1998, 2001; Wang et al., 2011)。

在巨大的伸展体制下, 东北亚地区于晚中生代广泛发育一系列伸展构造, 如拆离断层、科迪勒拉型变质核杂岩和花岗岩穹隆(Zhang et al., 1998; Liu et al., 2005; Lin et al., 2007, 2018; Wu et al., 2007, 2012; Yang et al., 2007; 王涛等, 2007; Wang et al., 2012, 2015;

郭磊等, 2015)。林伟等(2019)提出作为伸展构造的典型样式, 科迪勒拉型变质核杂岩从概念上过于严苛, 而使用定义上更为宽泛的伸展穹隆构造来表示, 仅仅代表了区域伸展背景上的穹隆(或背形)形态构造, 这样就避免变质核杂岩、同减薄岩体及各种不同成因穹隆构造的复杂称谓(Yin, 2004)。

前人对晚中生代伸展构造开展了一系列研究工作, 伸展变形峰期集中于130~120 Ma(Wang et al., 2012; 林伟等, 2013, 2019), 而低温热年代学的工作较少, 这限制了对伸展构造中生代以来完整隆升过程以及隆升机制的认识。锆石(U-Th)/He、AFT以及 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 热年代学体系具有较低的封闭温度, 近年来广泛运用于浅表过程的研究, 在揭示区域隆升剥蚀、造山机制等方面发挥了重要作用。笔者以南蒙古及邻区典型的花岗岩穹隆为研究对象, 运用锆石(U-Th)/He、AFT以及 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 热年代学方法并结合前人研究, 揭示穹隆中生代以来完整隆升过程, 为整个东北亚伸展机制提供新的资料和佐证。

## 1 区域地质背景

南蒙古区域主要由晚古生代岩石地层组成, 其演化可大致概括为5个阶段: 晚志留世至二叠纪早期, 古

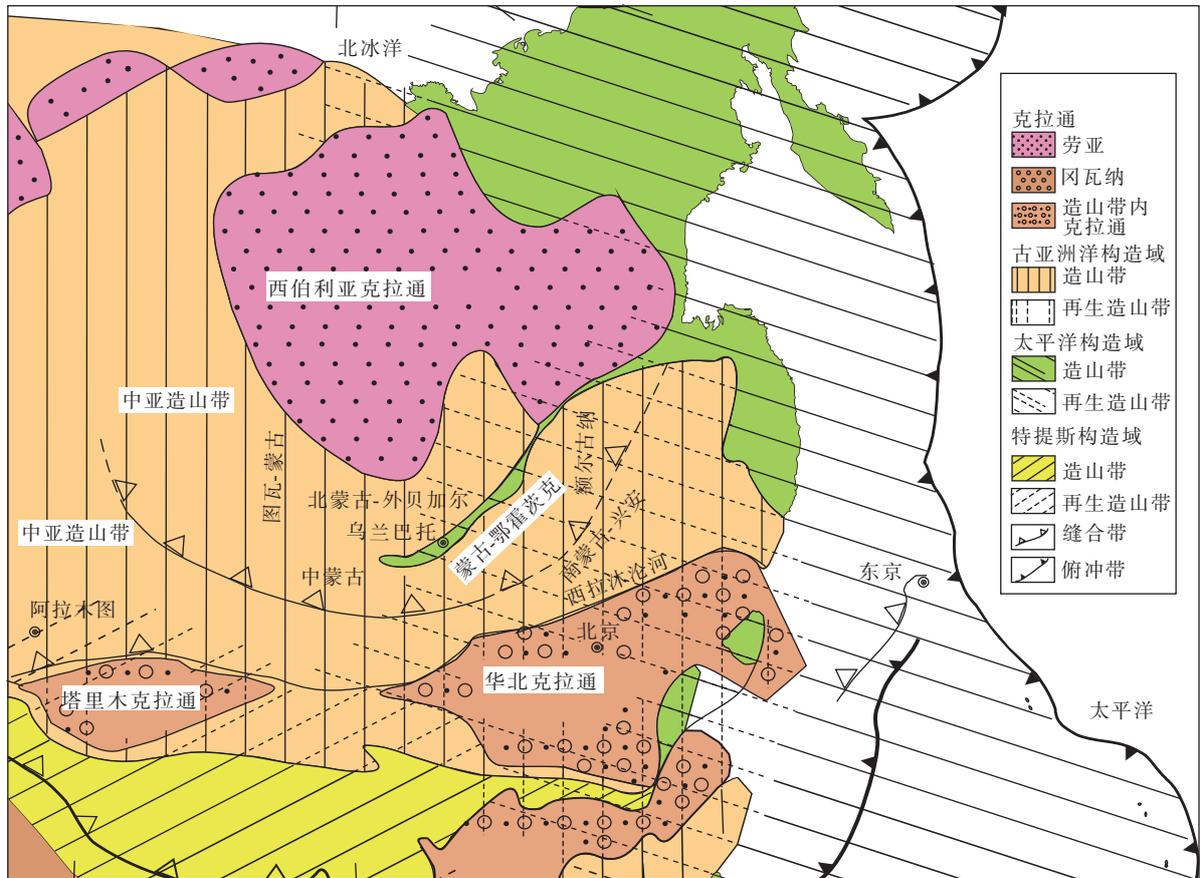


图1 东北亚大地构造简图(据王涛等, 2022)

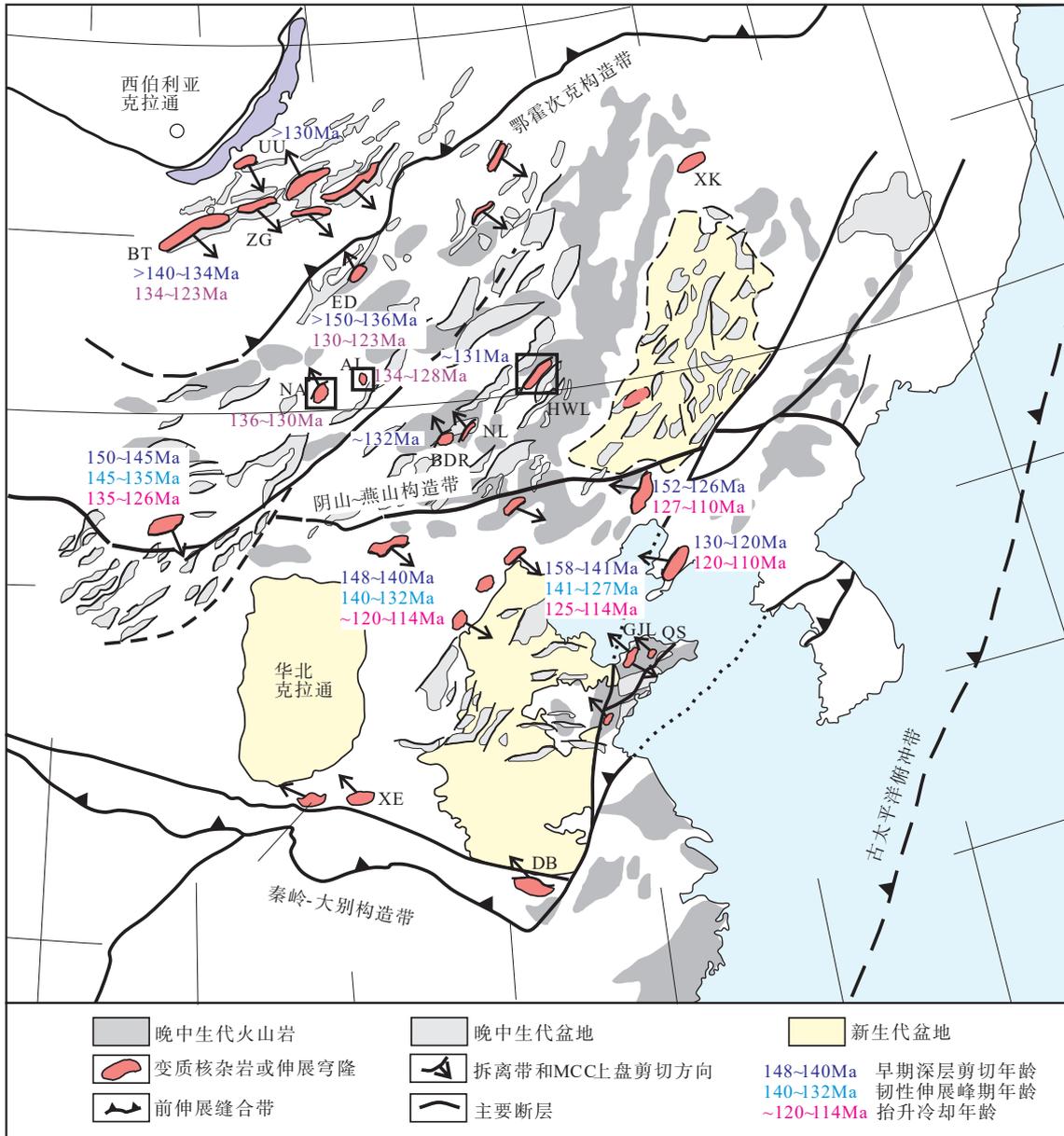
Fig. 1 Tectonic sketch map of Northeast Asia

亚洲洋向南北两侧大陆板块俯冲, 导致南蒙古经历了一系列岩浆弧(包括岛弧和安第斯型陆缘弧)和大陆块体(包括古陆壳、增生楔)的增生过程, 并发育复杂的弧-弧碰撞拼贴、地壳缩短和大规模陆内走滑剪切(Ruzhentsev et al., 1989; Sengör et al., 1996; Xiao et al., 2003; 吴妍蓉等, 2024); 晚二叠世, 西伯利亚板块南缘的增生弧与华北板块北缘的增生弧最终沿索伦-黑根山脉一线缝合对接, 中亚古生代多期巨型造山运动结束, 进入中生代大陆内山脉剥蚀和盆地充填阶段; 早中生代, 在两大板块碰撞的影响下, 南蒙古地壳发生了大规模的缩短和增厚, 此时的沉积格局主要是陆源沉积物, 并发生构造反转进入前陆盆地演化阶段(Lehmann et al., 2010; Edel et al., 2014); 晚侏罗世—早白垩世, 该地区应力场发生转变, 以拉张为主, 形成大规模的变质核杂岩和与裂谷有关的岩浆岩, 对应的拉张盆地以河湖相沉积为主(Badarch, 2005; Wang et al., 2012); 至晚白垩世末期, 该地区持续干燥, 与现今的中亚塔里木盆地和准噶尔盆地类似(Xiao et al., 2003, 2018)。

中蒙边境区域大地构造位置属华北地台、塔里木地台和西伯利亚地台 3 大构造单元的构造结合部。该区主要出露角闪岩相深变质岩系、元古代黄褐色白云质大理岩及古生代浅变质岩系和中生代沉积岩系。其中元古代大理岩主要以推覆体形式叠置于新地层之上。古生界(包括上二叠统的典型浊积岩)已经历了绿片岩相的区域变质作用(王涛等, 2002)。晚二叠世至晚三叠世为隆升和造山期, 上三叠统为陆相的红色磨拉石。侏罗系以褐色块状角砾岩为主。下白垩统主要由砾岩等粗碎屑岩组成, 为同伸展盆地快速堆积产物(王涛等, 2002)。

## 2 研究区花岗岩伸展穹隆

南蒙古—中蒙边境作为东北亚伸展构造发育的集中区域, 是研究伸展构造的天然实验室, 笔者以罕乌拉、Nartyn、Altanshiree 等 3 个花岗岩伸展穹隆为代表(图 2), 开展野外调查以及低温热年代学工作。



黑框显示了文中研究的 3 个花岗岩伸展穹隆

图 2 东北亚地区晚中生代变质核杂岩或伸展穹隆构造分布图(据 Wang et al., 2012 修改)

Fig. 2 Late mesozoic extensional structures in Northeast Asia

### 2.1 罕乌拉穹隆

罕乌拉穹隆位于东乌旗地区, 整体呈 NE30°~50° 方向展布(图 3)。该穹隆经历了晚中生代多期次花岗岩岩浆的侵入, 形成黑云母二长花岗岩和钾长花岗岩的主体。根据前人研究, 罕乌拉穹隆主要由沙麦岩体和海莫赛格岩体以及叠加其上的罕乌拉拆离断层带构成, 整体上形成主、次两个穹隆结构, 拆离断层的上盘为晚中生代盆地和前中生代岩浆-沉积杂岩(杜灿等, 2022)。

罕乌拉穹隆的核心区出露面积约为 1 500 km<sup>2</sup>。该岩体普遍发育近水平的透入性岩浆节理。岩体中心向外, 节理的产状由近水平逐渐外倾。岩体边部韧性剪切带发育且出露宽度变化较大, 从几百米到 2 000 m 不等, 走向总体为 NE 或 NNE, 且面理产状受控于下伏岩体, 随剪切带走向变化而变化, 由剪切带的南缘至北缘, 产状整体上越来越缓。穹隆韧性剪切带内运动学指示为上盘向 NW 伸展(程银行等, 2014; 杜灿等, 2022)。韧性剪切带顶部叠加拆离断

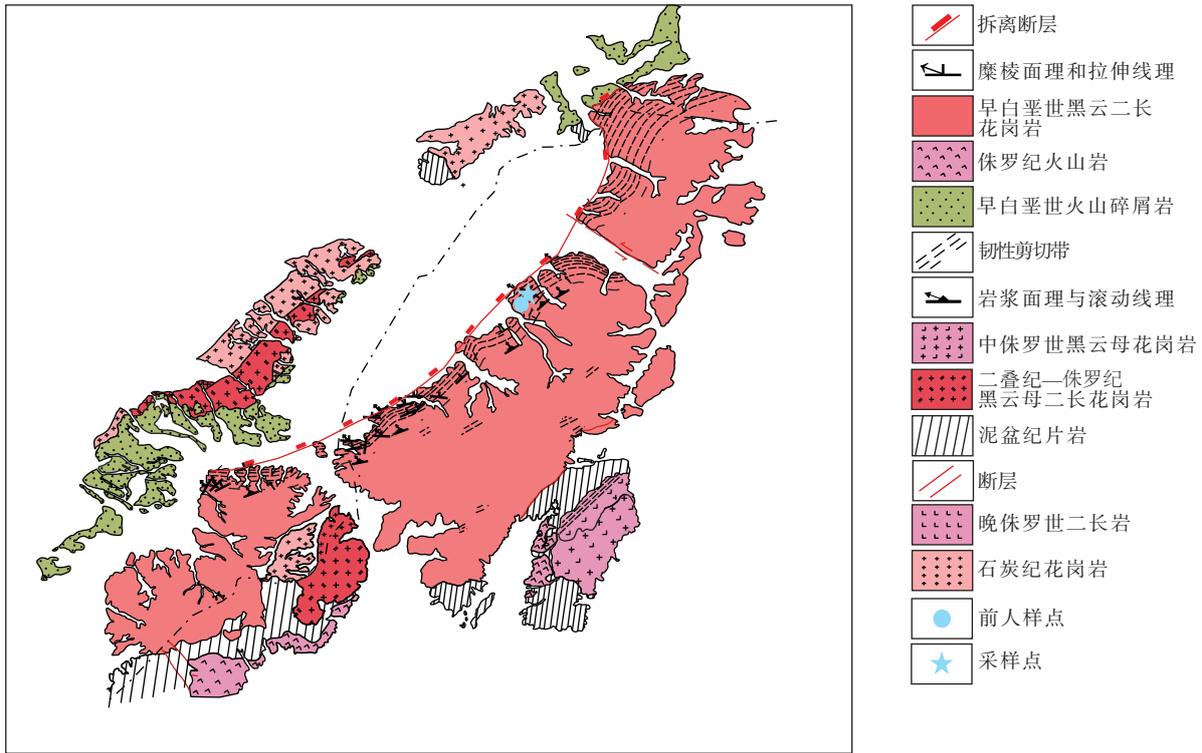


图3 罕乌拉穹隆构造简图(据杜灿等, 2022)

Fig. 3 Hanullah dome structure schematic diagram

层, 出露宽度约为 10 m, 包括断层角砾岩、绿泥石化微角砾岩、拆离断层面及大量平行于拆离断层面的摩擦镜面和高角度正断层, 该穹隆在抬升过程中经历了早期韧性变形和晚期脆性变形的递进过程(杜灿等, 2022)。

程银行等(2014)在 1:5 万填图工作中围绕该地区的构造组成、伸展极性及其伸展时限等相关问题开展工作, 沙麦岩体核部的锆石 U-Pb 年龄为(133±2) Ma, 花岗质糜棱岩的成岩年龄为(136±1)Ma 至 (130±1) Ma, 两者结果在误差范围内一致。这些学者观测发现不同变形程度的花岗质糜棱岩之间存在交切关系, 弱变形的细粒花岗岩小角度斜切强变形的中粗粒黑云母钾长花岗岩, 早期变形形成的糜棱面理被细粒花岗岩脉所切割, 细粒花岗岩脉可能与邻近的小型细粒花岗岩株就位有关, 该岩株也经历了变形, 发育有微弱面理和拉伸线理, 与剪切带的变形一致, 表明这些岩脉可能为同构造侵位, 强变形的中粗粒钾长花岗岩的 U-Pb 年龄为(133±1) Ma, 代表了中粗粒钾长花岗岩的侵位年龄; 而弱变形的细粒花岗岩的 U-Pb 年龄为(128±2) Ma, 略晚于中粗粒花岗岩, 代表了细粒花岗岩的侵位年龄。这些构造观测结果有效限定了岩体的侵位时间, 并表明韧性伸展发生在 133 Ma 之后, 持续至

128 Ma 或更晚(杜灿等, 2022)。

## 2.2 Nartyn 穹隆

Nartyn 穹隆位于南蒙古中东部(图 4), 该穹隆的西北边界为 NE-SW 走向的 Choyr 盆地, 该盆地主要砾岩和砂岩充填, 厚度约为 1 500 m(Daoudene et al., 2012)。穹隆核部为 NE-SW 走向的花岗岩体, 面积约为 300 km<sup>2</sup>, 穹隆的核部为粗粒黑云母花岗岩, 发育近水平的岩浆组构, 花岗岩内长石斑晶局部呈现不规则堆积和叠瓦状堆积特征。随着离核部的距离增加, 花岗岩的粒度逐渐变细, 白云母和伟晶岩的数量显著增加(Daoudene et al., 2012)。围岩主要由新元古代至寒武纪的变沉积岩构成(Byamba et al., 1990; Amantov 1966; Badarch et al., 2002), 后被早白垩世一系列沉积物覆盖。在穹隆与围岩的接触带上, 发育大量淡色花岗岩、伟晶岩和细晶岩脉。

穹隆西北缘拆离断层带发育, 边部及其与围岩的接触区域均受到变形影响, 其主要特征是发育倾向 WN 的面理及 NW-SE 向的拉伸线理。拆离断层带由糜棱岩化的片麻岩和花岗岩组成, 在拆离断层带之上发育 20 m 厚的碎裂岩层。穹隆经历了早白垩世 NW-SE 向伸展, S-C 组构和布丁构造等运动学指示均反映剪切带上盘向 NW 伸展(Daoudene et al., 2012)。

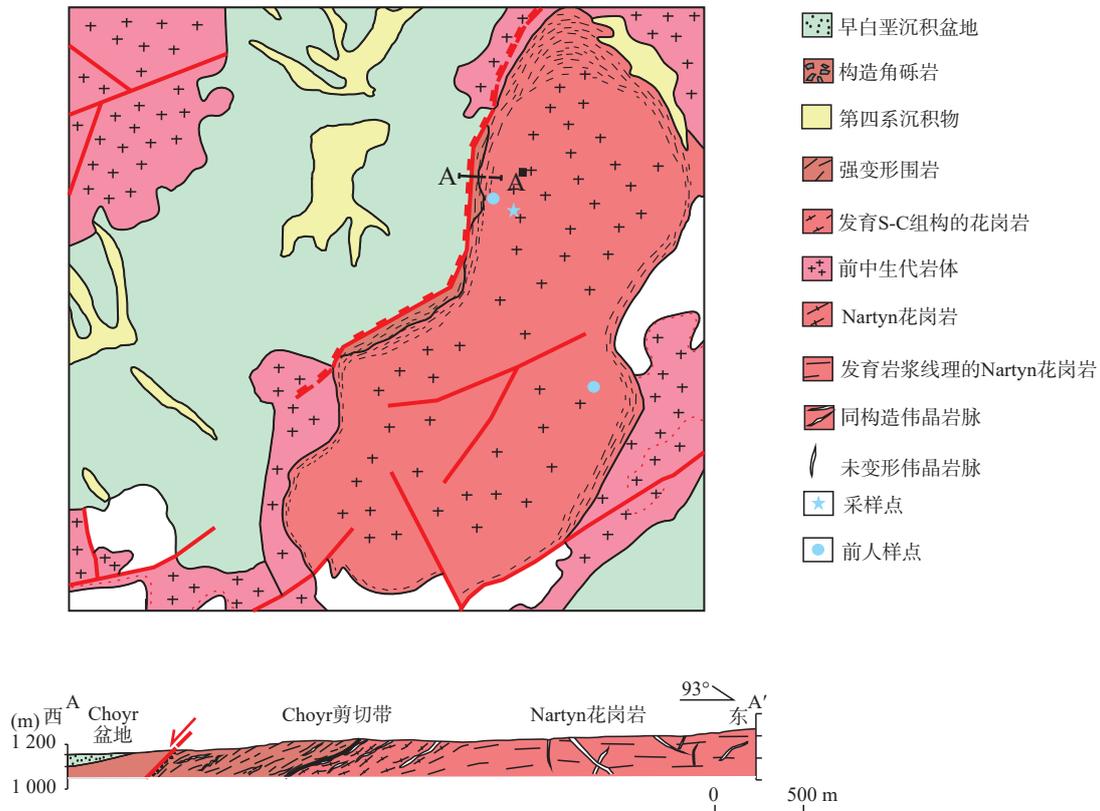


图4 Nartyn 穹隆构造简图(据 Daoudene et al., 2012)

Fig. 4 Nartyn dome structure schematic diagram

已有研究对穹隆核部花岗岩样品进行锆石 U-Pb 定年及云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年, 确定 Nartyn 花岗岩的侵位年龄为(133±3) Ma, 且花岗岩的冷却历史至少持续到 132~129 Ma, 而 Choyr 剪切带中变形程度不同的花岗岩、正片麻岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 测年结果显示, 136~130 Ma 期间的花岗岩侵位后, Choyr 剪切带开始发育并于 125 Ma 或更晚停止发育(Daoudene et al., 2012)。

### 2.3 Altanshiree 穹隆

Altanshiree 穹隆位于 Nartyn 穹隆以东约 140 km 处, 该穹隆的北西侧发育早白垩世沉积盆地(图 5)。穹隆主体为粗粒黑云母花岗岩(图 6a), 穹隆核部花岗岩体内近水平岩浆流面发育(图 6f)。野外发现该穹隆北西侧发育完整的拆离断层带(图 6b), 呈宽约 500~700 m 的韧性剪切带(图 6c), 韧性剪切岩石矿物拉伸线理发育, 产状为 300°~301°∠11°~12°, 指示穹隆 NW-SE 向伸展(图 6d), 该剪切带上叠加有 10~20 m 的微角砾带(图 6e)。

Daoudene 等(2012)对该穹隆已经开展了一系列年代学工作: 核部花岗岩锆石 U-Pb 年龄为(127±

7) Ma, 角闪岩<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为(130.7±0.9) Ma 和(129.1±0.7) Ma, 核部花岗岩、伟晶岩以及围岩中伟晶岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为(128.5±0.3) Ma~(126.4±0.3) Ma。年代学数据反映出 Altanshiree 花岗岩侵位时限为 134~128 Ma。

## 3 研究方法

### 3.1 样品信息

本次研究分别对 Nartyn 穹隆、Altanshiree 穹隆、罕乌拉穹隆的韧性剪切带和下部弱变形岩体进行样品采集, 并开展低温热年代学分析(表 1), 样品位置见图 3、图 4 和图 5, 手标本照片见图 7。

### 3.2 测试方法

#### 3.2.1 磷灰石裂变径迹分析

磷灰石裂变径迹分析是在美国亚利桑那大学地球科学系的实验室完成, 锆石和磷灰石颗粒通过外探测器方法进行测年。磷灰石颗粒被安装在环氧树脂、氧化铝和金刚石中抛光, 然后在 20 °C(±1 °C)下用

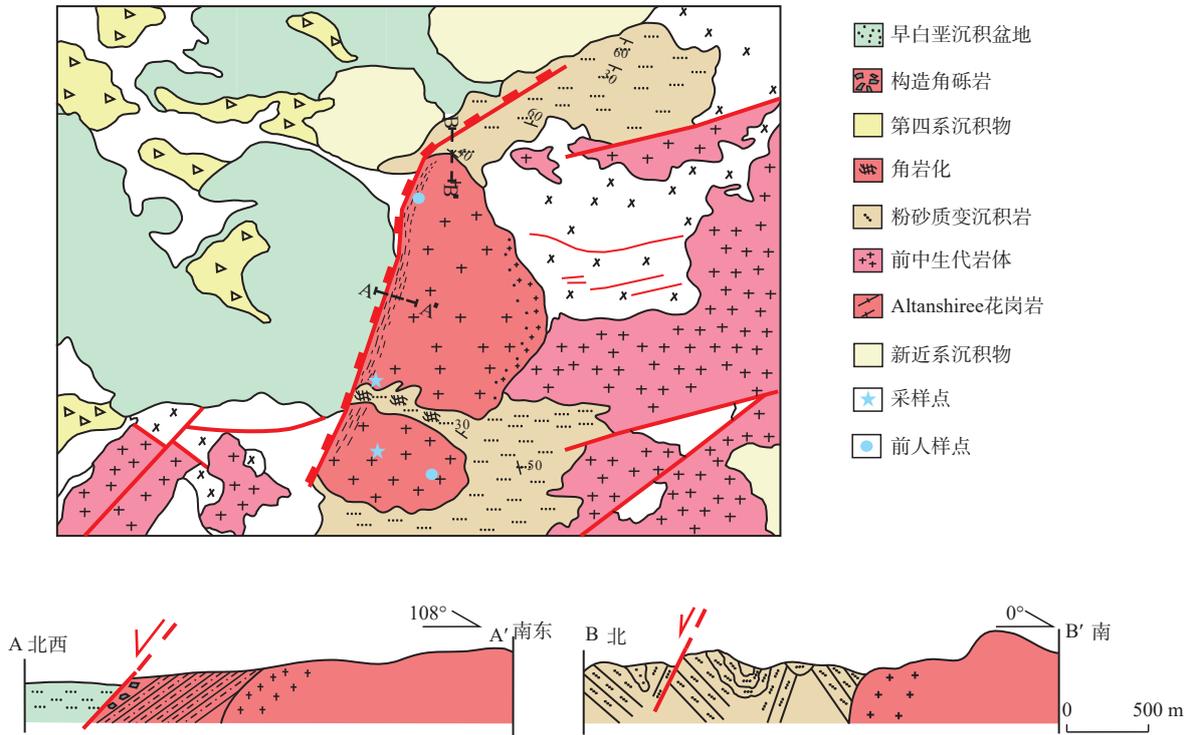


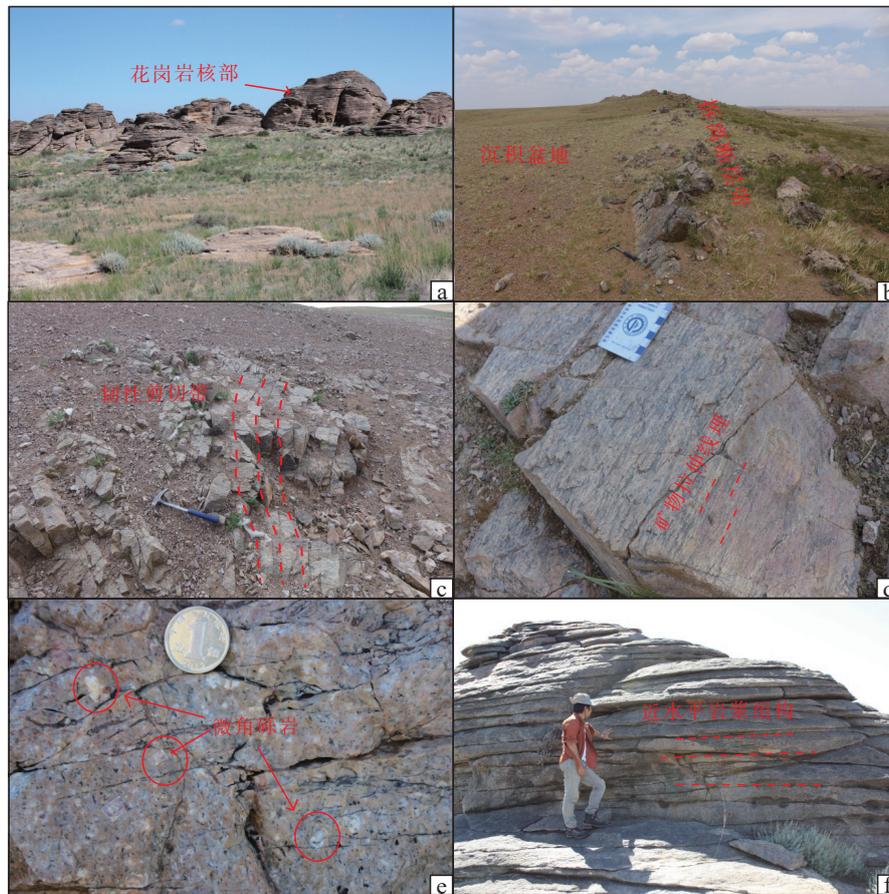
图5 Altanshiree穹隆构造简图

Fig. 5 Altanshiree dome structure schematic diagram

5.5 M 的  $\text{HNO}_3$  蚀刻 20 s ( $\pm 0.5$  s), 显示出自发裂变径迹。锆石颗粒固定在全氟烷氧基树脂上, 使用金刚石进行抛光, 而后在锆坩埚 220 °C 条件下使用  $\text{KOH-NaOH}$  共晶熔体蚀刻 3~36 h (Byamba et al., 1990)。最佳刻蚀时间取决于样品的年龄和辐射损伤, 需要通过重复刻蚀和每隔 3~6 h 观察监测。在美国俄勒冈州立大学 Triga 反应堆进行照射, 中子通量使用欧洲标准物质和测量研究所 (IRMM) 的铀玻璃 IRMM 540R 进行监测。照射后通过用 48% HF 刻蚀 20 min 揭示出诱变径迹。利用奥林巴斯 BX61 显微镜和 Kinetek 自动分级系统计算自发和诱导的裂变径迹密度。裂变径迹的长度和 Dpar 值使用 FTStage 软件进行校准, 裂变径迹年龄采用 Hurford 等 (1983) 推荐的 Zeta 校准方法 IUGS 计算, 以获得  $\pm 1\sigma$  误差的中心年龄。根据 Hurford (1990) 的建议, 通过反复校准包括 Durango、Fish Canyon 磷灰石和 Fish Canyon 锆石在内的大量国际公认的年龄标准, 获得了磷灰石和锆石 IRMM 540R 和 IRMM541 Zeta 校准因子分别为  $351.9 \pm 3.8$  和  $116.0 \pm 1.3$ 。详细分析流程据 Thomson 等 (2006) 的标准 (Hurford et al., 1983; Hurford, 1990; Thomson et al., 2006)。

### 3.2.2 锆石 (U-Th)/He 分析

岩石样品经过破碎、过筛、淘洗、重液分离等标准的矿物分选流程后, 得到锆石矿物颗粒。用于 (U-Th)/He 定年的锆石样品在体式显微镜下进一步挑选出自形程度高、无包裹体、无裂缝、满足尺寸要求的晶体。将挑选好的晶体进行拍照, 并测量晶体尺寸, 根据测量结果计算  $\alpha$  校正系数 ( $F_T$ ), 然后将样品装入铂囊中。He 气提取和分析在 Alphachron III 氦同位素质谱仪上进行。采用 970 nm 二极管激光器加热提取 He 气, 加热温度约为 900 °C。样品中释放的  $^4\text{He}$  与  $^3\text{He}$  混合, 通过四极杆质谱测定  $^4\text{He}/^3\text{He}$  值;  $^3\text{He}$  的量通过  $^4\text{He}$  标准气体标定, 最终计算可得到样品中的  $^4\text{He}$  含量。 $^4\text{He}$  的测量精度优于 1%。气体纯化系统由机器泵、分子泵、离子泵和锆铝泵组成, 系统真空优于  $1 \times 10^{-9}$  torr。在相同的流程下至少进行两次取气、分析过程。完成 He 含量分析的锆石样品加入 25 微升  $^{235}\text{U}$  和  $^{230}\text{Th}$  浓度分别为 15 ppb 和 5 ppb 的稀释剂溶液; 同时, 在含 25 ppb U 和 25 ppb Th 的标准溶液中加入等量稀释剂。稀释剂溶液中的 7 mol/L 的硝酸可以将锆石溶解。在锆石完全溶解之后, 加水进行稀释即可用于 U、Th 测试。U、Th 元素分析在电感耦合等离子



a.穹隆核部花岗岩体; b.伸展盆地(左)与拆离断层带(右); c.韧性剪切带; d.矿物拉伸线理发育; e.微角砾岩发育; f.穹隆核部近水平岩层组构

图6 Altanshree 穹隆野外照片

Fig. 6 Field photos of the Altanshree dome

表 1 南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆韧性剪切带内样品特征及低温年代学信息

Tab. 1 Characteristics and geochronology of mylonitic samples from the granite domes at the South Mongolia-Sino-Mongolian border

样品	采样地点	GPS点位	岩性	高程 (m)	AFT年龄 (Ma)	ZHe年龄 (Ma)	Ar-Ar年龄 (Ma)
N180717-4	罕乌拉穹隆	116°36'44"E 46°03'54"N	糜棱岩化细粒黑云母钾长花岗岩	890	104.94±5.84	123.4±7.35	123.9±0.90(Bi) 122.3±0.80(K)
N180717-9	罕乌拉穹隆	116°36'44"E 46°03'54"N	糜棱岩化中粗粒黑云母钾长花岗岩	890			121.3±1.40(Bi) 122.2±1.20(K)
M19713-39.1	Nartyn穹隆	108°37'43.04"E 45°44'28.47"N	糜棱岩化闪长岩	1 125	101.30±5.51	123.7±7.42	
M19715-310.2	Altanshree穹隆	110°37'55.60"E 45°46'43.36"N	花岗质糜棱岩	1 109	101.73±6.20		
M19715-311.1	Altanshree穹隆	110°37'56.89"E 45°45'39.60"N	花岗质糜棱岩	1 117	110.05±7.38		

质谱(ICP-MS)上完成,U和Th同位素比值分析不确定度通常小于2%。

### 3.2.3 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 热年代学分析

所有等分样品用铝箔包裹成薄片,用国际标准

YBCs(29.286±0.045) Ma 堆放于石英试管中。在中国北京 49-2 核反应堆(49-2 NR)的 H8 位置进行了中子辐照,辐照通量为~6.5×10<sup>12</sup> n (cm<sup>2</sup>s)<sup>-1</sup>,辐照时间为 24 h。CO<sub>2</sub> 激光器 (Teledyne Photon machines Fusion



图7 手标本照片

Fig. 7 Hand specimen descriptions

10.6)用于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 分析。同位素测量是在中国科学院地质与地球物理研究所的 Noblesse 质谱仪上进行的。Ca 和 K 校正因子分别为  $[^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}]_{\text{Ca}}=0.000\ 278\pm 0.000\ 001\ 54$ ,  $[^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}]_{\text{Ca}}=0.000\ 68\pm 0.000\ 001\ 9$ ,  $[^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}]_{\text{K}}=0.000\ 20\pm 0.000\ 013$ 。年龄是根据 Steiger 和 Jäger (1977) 列出的衰变常数 ( $5.543\times 10^{-10}\ \text{yr}^{-1}$ ) 计算的, 所有误差均以  $2\sigma$  水平引用。其中平年龄通过 3 个或 3 个以上连续步骤确定, 其中包括  $>50\%$  的  $^{39}\text{Ar}$  释放, 以揭示在 95% 置信水平下得出的一致年龄。由于没有对被困成分做出任何假设, 因此首选等时年龄, 使用约克回归算法根据平台步骤结果计算而得 (York, 1969)。文中所报告的年龄误差是内部误差, 包括分析误差、空白、相互作用因子、质量鉴别和 J 值的误差; 总衰变常数的误差不会传播到年龄误差中。所有数据在 95% 置信水平 ( $2\sigma$ ) 下均具有不确定度。数据由 ArArCALC 软件处理 (York 1969; Steiger et al., 1977; Koppers, 2002; Wang et al., 2014)。

## 4 结果与数据分析

本次研究获得磷灰石裂变径迹分析结果见表 2, 锆石 (U-Th)/He 分析结果见表 3,  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  热年代学分析结果见表 4。

### 4.1 磷灰石裂变径迹

笔者对 4 件样品进行了磷灰石裂变径迹分析, 从每个样品中挑选出 20 个质量良好的磷灰石颗粒进行测试, 测试结果如表 2 和图 8 所示。4 件样品的平均裂变径迹长度为  $13.58\sim 13.97\ \mu\text{m}$ , 均显示较窄的单峰分布, 暗示样品快速通过部分退火带 (Gleadow et al., 1986; Lü et al., 2013; 王雅美等, 2021)。所有样品均通过卡方检验 ( $P(\chi^2) > 99.9\%$ , 表 2), 显示了单一的单颗粒年龄, 即样品的年龄可以反映其经历的构造热事件 (杨雪叶等, 2021), 样品中心年龄分别为  $(101.7\pm 5.4)\ \text{Ma}$  (M19715-310.2)、 $(104.9\pm 4.9)\ \text{Ma}$  (N180717-4)、 $(101.3\pm$

表 2 南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆磷灰石裂变径迹分析结果

Tab. 2 Apatite fission track data of the granitoid samples from the South Mongolia-Sino-Mongolian border

样号	颗粒数目	径迹密度 ( $10^6\ \text{tr}\ \text{cm}^{-2}$ )			卡方检验 ( $P\chi^2$ )	裂变径迹 年龄 (Ma)	平均裂变径 迹长度	SD
		ps (Ns)	pi (Ni)	pd (Nd)				
N180717-4	20	0.958 4 (679)	1.937 (1 372)	1.246 (3 987)	$< 0.01\%$ (99.9%)	$104.9\pm 5.5$	$13.66\pm 0.09$ (100)	0.94
M19713-39.1	20	1.640 (723)	3.359 (1 481)	1.219 (3 902)	$< 0.01\%$ ( $> 99.9\%$ )	$101.3\pm 5.5$	$13.70\pm 0.10$ (100)	1.02
M19715-311.1	20	0.499 0 (427)	0.930 3 (796)	1.206 (3 860)	$< 0.01\%$ ( $> 99.9\%$ )	$110.1\pm 7.4$	$13.97\pm 0.15$ (40)	0.93
M19715-310.2	20	1.138 (533)	2.271 (1 064)	1.193 (3 818)	$< 0.01\%$ ( $> 99.9\%$ )	$101.7\pm 6.2$	$13.58\pm 0.13$ (54)	0.97

表 3 南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆锆石(U-Th)/He 分析结果

Tab. 3 Analysed ages of zircon of the granitoid samples from the South Mongolia-Sino-Mongolian border

样品	4He	+/-	U	+/-	Th	+/-	Th/U	FT	矫正年龄	+/-	等效半径
	ncc		10 <sup>-6</sup>		10 <sup>-6</sup>			factor	Ma	Ma	μm
M19713-39.1-2	33.46	0.89	1 771.08	45.49	673.08	15.56	0.39	0.64	128.1	7.8	42.4
M19713-39.1-3	18.75	0.48	872.21	19.82	515.24	10.44	0.61	0.66	116.9	7.0	44.3
M19713-39.1-4	60.70	1.63	2 149.20	49.33	824.03	16.16	0.39	0.69	126.2	7.6	48.0
M19713-39.1-5	37.31	0.95	1 150.77	27.68	587.72	12.19	0.52	0.69	121.1	7.3	49.3
加权平均年龄: (123.07±7.42) Ma											
N1801717-4-1	6.47	0.16	449.93	10.32	173.80	3.70	0.40	0.63	120.8	7.2	40.3
N1801717-4-2	13.52	0.34	1 214.71	26.45	527.63	10.08	0.45	0.59	124.4	7.4	37.1
N1801717-4-3	23.41	0.59	847.47	19.27	195.43	3.97	0.24	0.69	124.1	7.4	47.7
N1801717-4-4	7.15	0.18	213.55	4.88	102.70	2.10	0.49	0.69	124.2	7.4	49.4
加权平均年龄: (123.40±7.35) Ma											

表 4 罕乌拉穹隆样品<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 数据测试结果

Tab. 4 Test results of <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar data of samples of the Hanwula Dome

实验编号	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	± 1σ	<sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	± 1σ	<sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	± 1σ	<sup>40</sup> Ar*/ <sup>39</sup> Ar <sub>k</sub>	± 2σ	<sup>40</sup> Ar*(%)	<sup>39</sup> Ar <sub>k</sub> (%)	Age± 2σ(Ma)
样品	N180717-4B	黑云母	J = 0.003 712 00 ± 0.000 011 14								
0.24 W	20.531 780	0.104 821	0.142 605	0.060 565	0.019 815	0.000 432	14.689 29	± 0.290 77	71.54	15.85	95.79 ± 1.85
0.31 W	20.119 006	0.103 066	0.135 168	0.075 452	0.005 498	0.000 148	18.506 99	± 0.208 82	91.98	11.71	119.87 ± 1.31
0.39 W	20.308 166	0.104 367	0.120 672	0.094 277	0.005 129	0.000 148	18.803 66	± 0.212 29	92.58	9.38	121.73 ± 1.33
0.47 W	4	20.739 718	0.109 146	0.409 513	0.151 288	0.005 897	19.035 85	± 0.228 57	91.76	6.36	123.18 ± 1.43
0.54 W	4	20.775 851	0.109 524	0.115 864	0.196 640	0.005 644	19.118 88	± 0.239 01	92.02	4.89	123.70 ± 1.49
0.63 W	4	20.884 293	0.110 252	0.278 187	0.197 592	0.006 560	18.972 02	± 0.242 82	90.83	4.48	122.78 ± 1.52
0.70 W	4	20.754 695	0.108 812	0.234 170	0.198 751	0.005 961	19.015 33	± 0.236 37	91.60	4.84	123.05 ± 1.48
0.78 W	4	20.503 014	0.107 249	0.340 590	0.190 122	0.004 625	19.168 62	± 0.234 48	93.47	4.66	124.01 ± 1.47
0.86 W	4	20.610 343	0.110 820	0.726 417	0.257 214	0.004 061	19.479 45	± 0.254 30	94.47	3.75	125.96 ± 1.59
0.93 W	4	19.988 401	0.106 379	0.611 624	0.216 567	0.002 748	19.234 39	± 0.231 51	96.19	4.46	124.42 ± 1.45
1.00 W	4	20.585 591	0.108 484	0.394 969	0.209 604	0.004 985	19.149 78	± 0.237 70	93.00	4.60	123.90 ± 1.49
1.08 W	4	19.813 551	0.102 555	0.068 224	0.115 787	0.002 211	19.166 51	± 0.208 46	96.73	8.33	124.00 ± 1.30
1.24 W	4	19.575 201	0.100 446	0.064 570	0.091 324	0.001 823	19.042 34	± 0.203 08	97.27	10.57	123.22 ± 1.27
1.49 W	4	19.838 581	0.106 558	0.346 033	0.386 145	0.002 960	18.996 68	± 0.272 36	95.73	2.30	122.94 ± 1.70
1.89 W	4	20.273 910	0.113 862	0.597 110	0.563 081	0.003 629	19.258 23	± 0.335 78	94.95	1.72	124.57 ± 2.10
2.55 W	4	20.496 665	0.113 778	0.760 246	0.424 380	0.003 933	19.406 95	± 0.301 11	94.63	2.10	125.50 ± 1.88
样品	N180717-4K	钾长石	J = 0.003 690 00 ± 0.000 011 07								
0.24 W	25.163 348	0.085 913	0.403 111	0.219 346	0.021 854	0.000 353	18.743 50	± 0.244 21	74.47	2.49	120.66 ± 1.52
0.31 W	4	19.328 187	0.062 117	0.058 952	0.083 375	0.001 435	18.909 47	± 0.126 54	97.83	6.56	121.69 ± 0.79
0.39 W	4	19.252 791	0.062 362	0.190 835	0.093 198	0.000 720	19.058 11	± 0.126 94	98.98	6.48	122.62 ± 0.79
0.47 W	4	19.529 441	0.063 189	0.224 488	0.122 151	0.001 812	19.015 13	± 0.131 13	97.35	4.48	122.35 ± 0.82
0.54 W	4	20.093 618	0.064 802	0.146 194	0.103 398	0.003 816	18.979 70	± 0.133 92	94.45	5.30	122.13 ± 0.83
0.63 W	4	20.881 883	0.066 766	0.201 178	0.104 793	0.006 824	18.884 44	± 0.141 61	90.42	5.78	121.53 ± 0.88
0.70 W	4	20.657 816	0.063 624	0.079 660	0.019 460	0.005 707	18.978 87	± 0.125 67	91.87	28.22	122.12 ± 0.78
0.78 W	4	20.571 003	0.063 101	0.067 531	0.023 995	0.005 056	19.083 08	± 0.124 23	92.76	25.27	122.77 ± 0.77
0.86 W	4	20.548 632	0.065 367	0.140 247	0.066 146	0.004 848	19.129 11	± 0.132 34	93.08	8.30	123.06 ± 0.82
0.93 W	4	20.502 663	0.076 789	1.015 035	0.422 475	0.003 905	19.445 32	± 0.203 93	94.78	1.30	125.02 ± 1.27

续表 4

实验编号	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$	$\pm 2\sigma$	$^{40}\text{Ar}^*(\%)$	$^{39}\text{Ar}_k(\%)$	Age $\pm 2\sigma$ (Ma)	
1.00 W	20.754 697	0.079 351	1.312 573	0.546 316	0.004 099	0.000 247	19.668 63	$\pm 0.228 67$	94.68	1.01	126.41 $\pm 1.42$	
1.08 W	20.448 630	0.066 922	0.333 780	0.124 320	0.004 055	0.000 096	19.282 10	$\pm 0.139 89$	94.27	4.42	124.01 $\pm 0.87$	
1.24 W	20.527 270	0.102 368	1.637 441	1.447 526	0.002 510	0.000 531	19.942 30	$\pm 0.443 33$	97.04	0.38	128.11 $\pm 2.75$	
1.49 W	21.717 950	0.366 280	18.755 073	20.929 979	0.007 100	0.006 277	21.433 88	$\pm 5.211 89$	97.43	0.03	137.33 $\pm 32.16$	
样号	N180717-9B	黑云母	J = 0.003 391 00 $\pm$ 0.000 010 17									
0.24 W	23.004 564	0.119 670	0.181 200	0.235 896	0.028 023	0.000 638	14.740 23	$\pm 0.400 20$	64.07	5.64	88.00 $\pm 2.33$	
0.31 W	21.943 223	0.127 811	1.222 262	0.795 877	0.010 930	0.000 566	18.829 36	$\pm 0.420 35$	85.74	1.67	111.67 $\pm 2.42$	
0.39 W	22.326 218	0.123 558	0.263 407	0.514 345	0.010 036	0.000 428	19.385 73	$\pm 0.341 43$	86.81	2.59	114.87 $\pm 1.96$	
0.47 W	21.764 129	0.115 855	-	-	0.008 902	0.000 281	19.109 67	$\pm 0.266 93$	87.82	4.08	113.28 $\pm 1.53$	
0.54 W	21.693 013	0.113 462	-	-	0.007 724	0.000 253	19.387 26	$\pm 0.255 10$	89.39	4.93	114.87 $\pm 1.46$	
0.63 W	21.679 232	0.114 854	0.185 663	0.290 037	0.006 368	0.000 239	19.814 92	$\pm 0.257 04$	91.39	4.60	117.33 $\pm 1.47$	
0.70 W	21.889 067	0.115 529	0.336 051	0.356 497	0.006 520	0.000 263	19.994 46	$\pm 0.268 15$	91.32	4.07	118.36 $\pm 1.54$	
0.78 W	22.129 088	0.117 367	0.202 087	0.315 695	0.008 445	0.000 278	19.652 66	$\pm 0.269 71$	88.80	4.23	116.40 $\pm 1.55$	
0.86 W	4	22.041 749	0.116 604	-	-	0.005 404	0.000 254	20.417 29	$\pm 0.269 86$	92.65	3.59	120.78 $\pm 1.54$
0.93 W	4	22.023 307	0.120 175	-	-	0.004 626	0.000 246	20.626 93	$\pm 0.275 70$	93.68	3.40	121.98 $\pm 1.58$
1.00 W	4	22.075 273	0.120 652	0.366 199	0.476 738	0.005 208	0.000 311	20.571 29	$\pm 0.300 78$	93.16	2.81	121.66 $\pm 1.72$
1.08 W	4	22.212 936	0.117 836	0.487 768	0.272 280	0.005 820	0.000 231	20.539 72	$\pm 0.260 71$	92.44	4.92	121.48 $\pm 1.49$
1.24 W	4	21.759 433	0.111 894	0.109 716	0.116 391	0.004 820	0.000 134	20.345 43	$\pm 0.224 40$	93.49	12.51	120.37 $\pm 1.28$
1.49 W	4	21.566 047	0.110 471	0.000 000	0.114 503	0.004 437	0.000 128	20.254 66	$\pm 0.221 40$	93.92	12.72	119.85 $\pm 1.27$
2.55 W	4	21.773 349	0.112 491	0.100 670	0.157 263	0.003 532	0.000 135	20.739 13	$\pm 0.230 06$	95.24	8.54	122.62 $\pm 1.32$
样号	N180717-9K	钾长石	J = 0.003 409 00 $\pm$ 0.000 010 23									
0.16 W	161.147 324	2.051 576	-	-	0.342 016	0.011 232	53.853 86	$\pm 6.394 71$	34.61	0.05	304.13 $\pm 33.24$	
0.24 W	47.535 005	0.356 976	1.020 714	2.887 088	0.073 486	0.002 361	25.921 93	$\pm 1.495 08$	54.49	0.22	152.78 $\pm 8.45$	
0.31 W	4	22.946 326	0.134 071	-	-	0.009 189	0.000 484	20.207 06	$\pm 0.403 61$	88.08	0.60	120.19 $\pm 2.32$
0.39 W	4	21.559 667	0.117 302	-	-	0.003 792	0.000 237	20.399 52	$\pm 0.279 49$	94.65	1.08	121.30 $\pm 1.61$
0.47 W	4	21.022 739	0.111 769	0.185 482	0.393 483	0.001 575	0.000 142	20.574 89	$\pm 0.243 37$	97.86	1.60	122.30 $\pm 1.40$
0.54 W	4	20.983 271	0.109 254	-	-	0.001 626	0.000 108	20.493 66	$\pm 0.227 18$	97.67	2.36	121.84 $\pm 1.31$
0.63 W	4	20.627 325	0.107 597	-	-	0.000 455	0.000 082	20.440 01	$\pm 0.222 04$	99.13	2.71	121.53 $\pm 1.28$
0.70 W	4	20.605 658	0.106 689	0.065 024	0.169 290	0.000 615	0.000 060	20.429 96	$\pm 0.216 37$	99.14	3.43	121.47 $\pm 1.24$
0.78 W	4	20.621 180	0.107 199	-	-	0.000 459	0.000 063	20.483 13	$\pm 0.218 56$	99.33	3.25	121.78 $\pm 1.26$
0.86 W	4	20.616 450	0.107 153	-	-	0.000 557	0.000 068	20.439 69	$\pm 0.218 62$	99.15	3.00	121.53 $\pm 1.26$
0.93 W	4	20.568 653	0.107 310	0.027 789	0.235 795	0.000 442	0.000 076	20.440 64	$\pm 0.221 43$	99.38	2.68	121.53 $\pm 1.27$
1.00 W	4	20.677 657	0.108 624	0.454 520	0.275 624	0.000 695	0.000 089	20.515 78	$\pm 0.226 61$	99.19	2.29	121.96 $\pm 1.30$
1.08 W	4	20.641 435	0.109 085	0.069 387	0.270 966	0.000 622	0.000 094	20.463 96	$\pm 0.227 91$	99.14	2.15	121.67 $\pm 1.31$
1.16 W	4	20.767 389	0.110 617	0.371 822	0.315 586	0.000 833	0.000 102	20.556 65	$\pm 0.233 15$	98.96	2.00	122.20 $\pm 1.34$
1.24 W	4	20.781 080	0.110 559	-	-	0.001 087	0.000 111	20.456 15	$\pm 0.232 30$	98.44	2.03	121.62 $\pm 1.34$
1.30 W	4	20.921 318	0.110 546	-	-	0.001 401	0.000 106	20.463 99	$\pm 0.230 34$	97.84	2.16	121.67 $\pm 1.32$
1.38 W	4	20.912 413	0.109 562	-	-	0.001 458	0.000 101	20.467 15	$\pm 0.226 46$	97.88	2.52	121.68 $\pm 1.30$
1.64 W	4	21.413 501	0.109 436	0.084 902	0.090 068	0.002 952	0.000 082	20.549 06	$\pm 0.216 02$	95.96	7.04	122.16 $\pm 1.24$
1.89 W	4	21.383 846	0.108 055	0.019 233	0.037 556	0.002 584	0.000 062	20.621 80	$\pm 0.211 62$	96.44	15.55	122.57 $\pm 1.22$
2.13 W	4	21.006 622	0.107 757	0.018 975	0.080 507	0.001 004	0.000 042	20.711 69	$\pm 0.214 38$	98.59	7.94	123.09 $\pm 1.23$
2.30 W	4	21.153 334	0.107 174	0.038 664	0.037 754	0.001 304	0.000 039	20.771 62	$\pm 0.211 83$	98.19	15.59	123.43 $\pm 1.22$
2.55 W	4	21.056 866	0.107 121	0.097 790	0.069 175	0.001 061	0.000 042	20.752 56	$\pm 0.212 97$	98.55	9.25	123.33 $\pm 1.22$
2.79 W	4	21.142 492	0.108 544	-	-	0.001 029	0.000 048	20.831 18	$\pm 0.216 40$	98.53	6.12	123.78 $\pm 1.24$
3.01 W	4	22.324 369	0.120 802	-	-	0.004 742	0.000 230	20.833 40	$\pm 0.272 30$	93.38	1.38	123.79 $\pm 1.56$

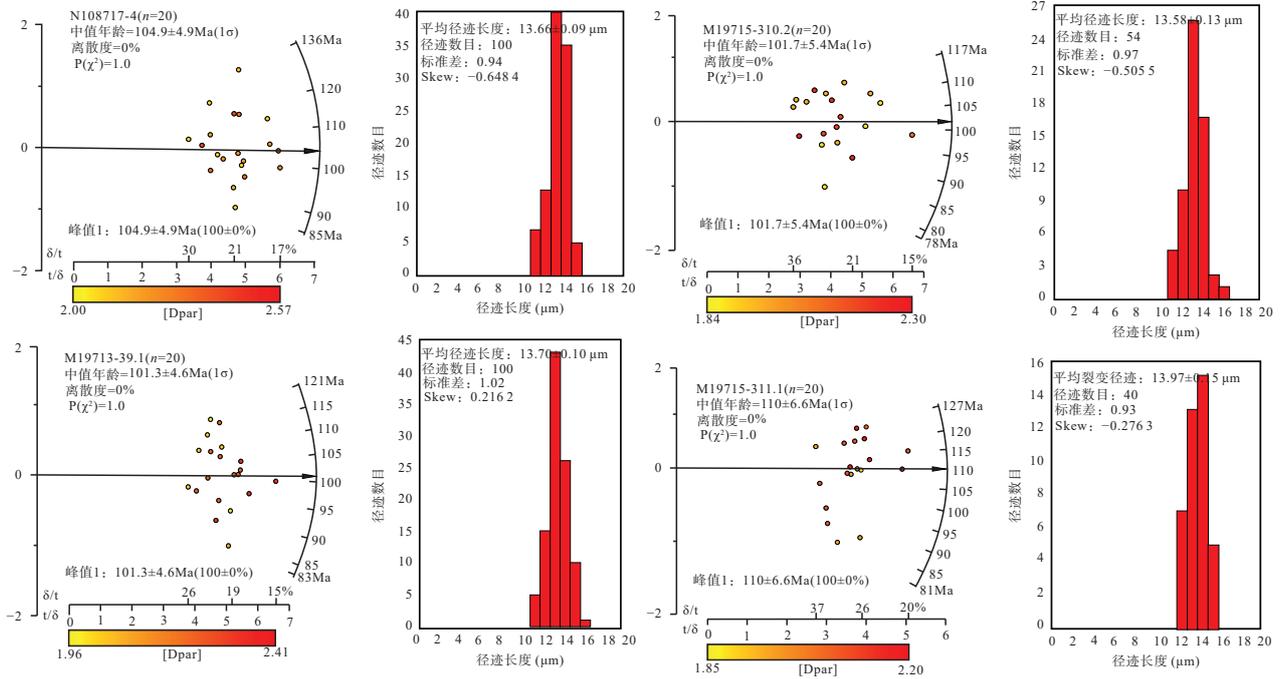


图8 磷灰石裂变径迹年龄雷达图(左)和径迹长度分布图(右)

Fig. 8 Radial plots of apatite fission track ages (left) and track length distributions (right)

4.6) Ma (M19713-39.1) 和 (110 ± 6.6) Ma (M19715-311.1)。4 件样品的平均 Dpar 值在 1.98~2.13 μm, 大于标准矿物磷灰石的蚀刻半径, 表明其较高的耐退火率 (Donelick et al., 1999, 2005; 王雅美等, 2021)。

#### 4.2 锆石 (U-Th)/He

笔者对两件样品进行了锆石 (U-Th)/He 测年, 分析结果见表 3, 代表性的锆石显微照片见图 9, 锆石呈半自形-自形结构, 粒度均 > 60 μm。其中, 两件样品

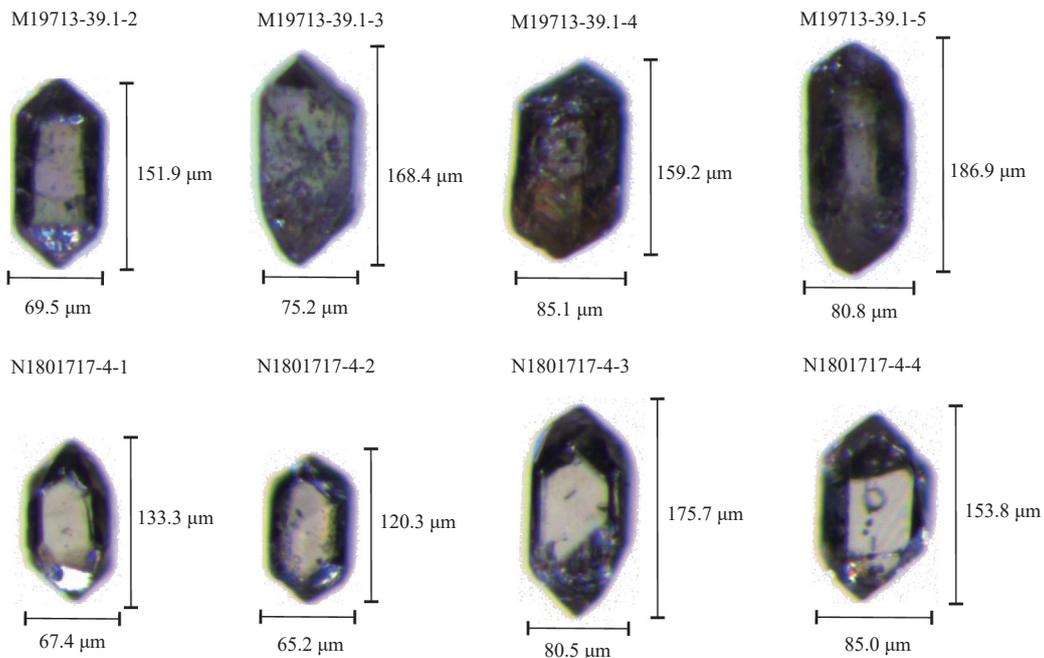


图9 Nartyn 穹隆闪长岩样品 (M19713-39.1) 中所选锆石与罕乌拉穹隆花岗岩样品 (M1801717-4) 中所选锆石显微照片

Fig. 9 Selected zircon micrographs from the Nartyn dome diorite sample (M19713-39.1) and the rare earth element-rich granite sample from the Hanwula dome (M1801717-4)

锆石颗粒的(U-Th)/He 加权平均年龄分别为(123.07±7.42) Ma(M19713-39.1)、(123.40±7.35)Ma(N1801717-4)。ZHe 年龄或者加权年龄都明显比前人得出的锆石 U-Pb 年龄更年轻(Daoudene et al.; 2012; 杜灿等, 2022), 表明数据是可靠的, 能反映岩体就位以来的冷却过程。

#### 4.3 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 热年代学

笔者对采自罕乌拉穹隆韧性剪切带内的 2 件糜棱岩样品进行黑云母和钾长石 Ar-Ar 阶段加热定年分析, 其坪年龄、均方根偏差(MSWD)以及各项分析具体数值见图 10 和表 4。样品 N180717-4 为糜棱岩化细粒黑云母钾长花岗岩, 由黑云母所测出的坪年龄为(123.9±0.9)Ma, 均方根偏差为 1.46, 较接近 1, 表明数据点的分布与拟合线较为一致, 测定结果数据没有显著偏差, 所选的拟合模型是可靠的; 由钾长石所测坪年龄为(122.3±0.8) Ma, 均方根偏差为 1.62, 较接近 1, 年龄结果也较为可靠。另一样品 N180717-9 为糜棱岩

化中粗粒黑云母钾长花岗岩, 黑云母所测出的坪年龄为(121.3±1.4) Ma, 均方根偏差为 1.94, 样品可能存在氩气流失现象, 导致该结果的可靠性较低(Zhang et al., 2020), 钾长石所测坪年龄为(122.2±1.2)Ma, 均方根偏差为 1.51, 数据点与拟合线之间的偏差较小, 测定结果较为可信。

#### 4.4 HeFTy 软件模拟

笔者使用 HeFTy 软件对样品进行热历史模拟, 以便更好地了解样品所经历的时间-温度信息。输入数据包括磷灰石裂变径迹的单颗粒年龄、长度、蚀刻半径以及 C 轴投影夹角等。扩散动力学模型引自 Ketcham 的多元动力学模型(Ketcham et al., 2007), 动力学参数用 Dpar 值, 初始径迹长度为 16.3  $\mu\text{m}$  (Donelick et al., 1999)。长度拟合最优方程选用 Kolmogorov-Smirnov Test, 计算方法选择 Monte Carlo (Ketcham et al., 2009)。起始点限制条件为温度 250~350  $^{\circ}\text{C}$ , 年龄 115~125 Ma, 温度的限制必须高

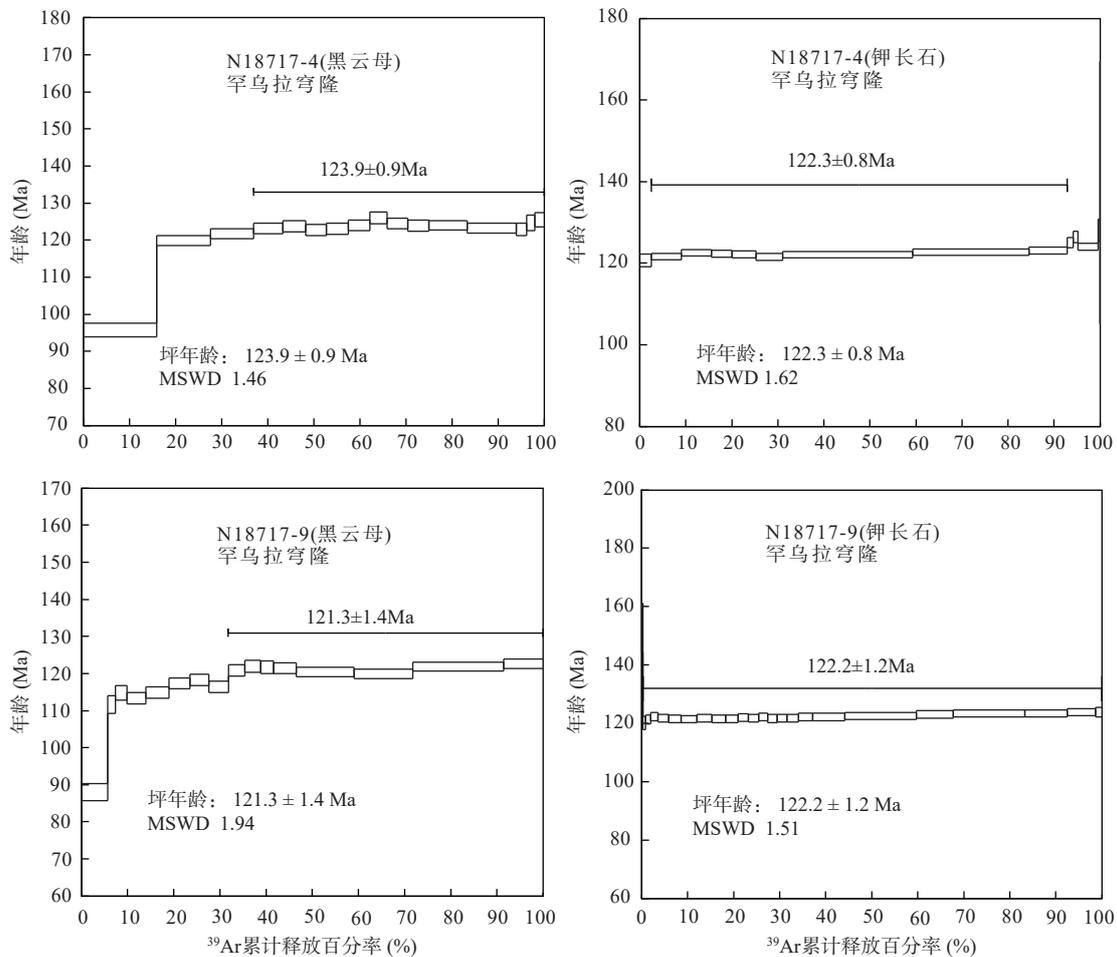


图10 罕乌拉穹隆韧性剪切带花岗质糜棱岩样品 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄

Fig. 10 Ar-Ar plateau age of the granitic mylonite samples from the Hanwula dome ductile shear zone.

表5 基于热史模拟法、年龄-封闭温度法和矿物对法的南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆隆升速率

Tab. 5 The rate of granite dome uplift in the South Mongolia-Sino-Mongolian border on thermal history simulation, age-sealing temperature method and mineral pair method

样号	热史模拟法				年龄-封闭温度法				矿物对法			
	快速隆升阶段		较缓慢隆升阶段		ZHe		AFT		Bi Ar-Ar/ZHe		ZHe/AFT	
	时间	速率	时间	速率	年龄	速率	年龄	速率	时间	速率	时间	速率
M180717-4	133~124	1.41	123~105	0.109	123.4	0.038	104.9	0.026	123.9~123.4	5.71	123.4~104.9	0.109
	124~123	5.71										
M19713-39.1	133~125	1.79	123~101	0.09	123.7	0.038	101.3	0.027	125~123.7	2.02	123.7~101.3	0.09
	125~123	2.02										
M19715-311.1	127~126	14.3	123~110	0.151			110.1	0.025				
	126~123	1.27										

时间单位为Ma; 速率单位为Km/Ma

于 AFT 封闭温度, 年龄的限制范围是 AFT 和锆石 U-Pb 的年龄之间。同时假定模拟终点的地表温度为  $20 \pm 3$  °C。其中模拟结果分为良好热历史曲线 ( $GOF > 0.05$ ) 和较好热历史曲线 ( $GOF > 0.5$ )。每件样品的模拟直到良好路径达到 100 条时才会停止, 在对 4 件样品的模拟过程中, 只有两件样品成图, 笔者推测是因为样品裂变径迹长度过长, 近乎未退火, 这种情况可能并不适用于 HeFTy 软件热模拟, 因为该软件是基于径迹的退火行为编写的程序, 但是样品本身无疑是反映了快速冷却作用。模拟结果见图 11。其中, 最佳拟合路径和加权平均路径分别用黑色和白色曲线标注。AFT、ZHe、黑云母 Ar-Ar 的封闭温度区间分别为 60~110 °C (Gleadow et al., 1986)、160~200 °C、250~350 °C (Green, 1989; Corrigan, 1991)。由于裂变径迹在高于封闭温度时退火作用几乎在瞬时发生, 而低于封闭温度时退火速率极低 (Gleadow et al., 1986), 因此, 退火模型仅在封闭温度 (PAZ) 范围内有效, 不应过度解释 PAZ 以外获得的冷却曲线。笔者的热历史模拟结果显示出南蒙古-中蒙边境相关穹隆经历了快速隆升, 即早白垩世 (120~105 Ma) 快速隆升。

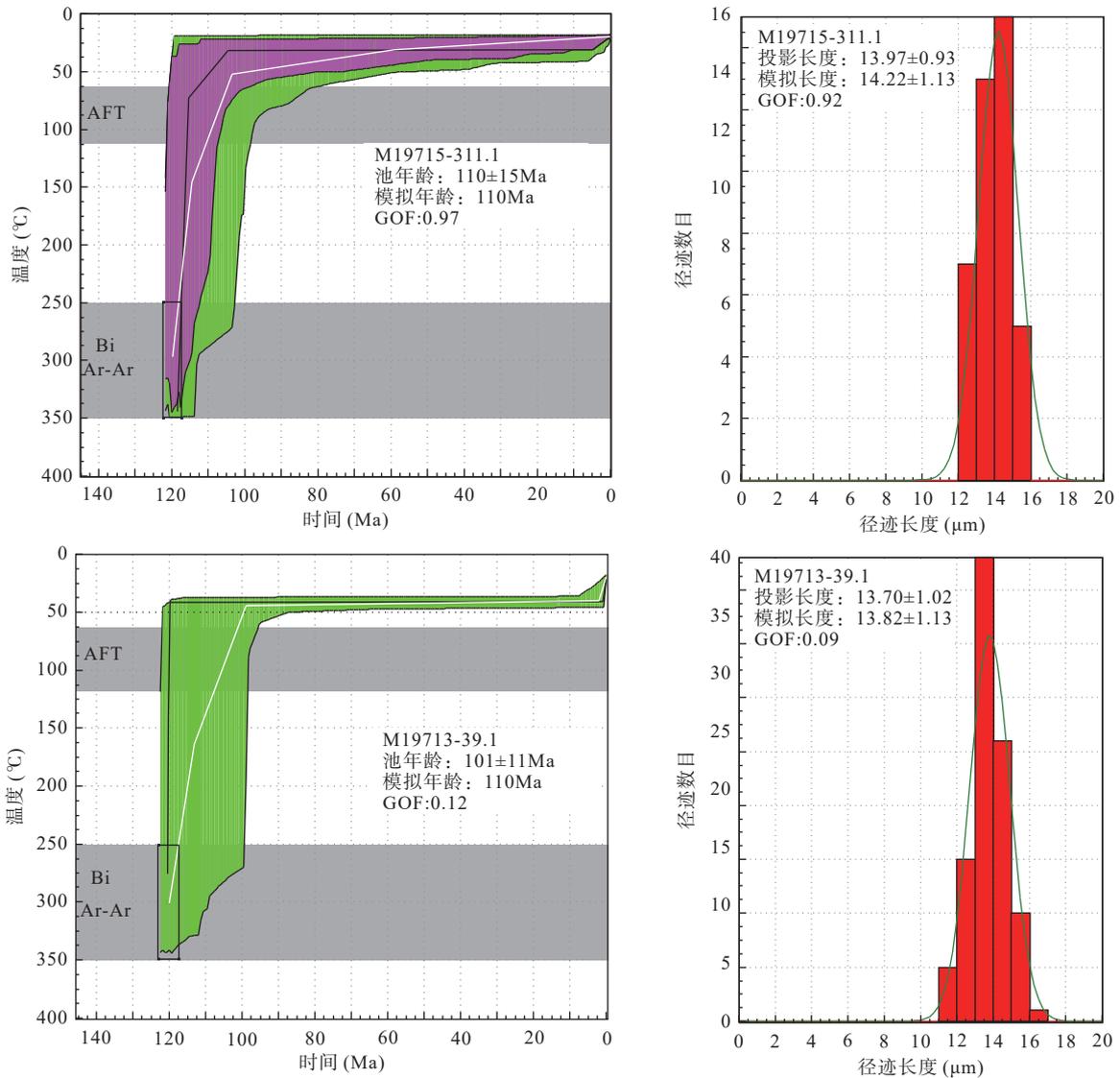
## 5 讨论

### 5.1 热演化模拟与隆升速率分析

以实测和收集的罕乌拉穹隆、Nartyn 穹隆以及 Altanshiree 穹隆年代学数据为基础, 笔者采用 HeFTy 模拟与多同位素投图的方法来揭示南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆所经历的构造-热演化历史和不同阶段的隆升速率。

目前, 利用低温热年代学数据来估算穹隆隆升速

率的方法有: 封闭温度法、热史模拟法、矿物对法、年龄-高程法等 (Ding et al., 2007; Lü et al., 2013)。本次样品采集数量有限, 而且高程相近, 因此本次研究采用封闭温度法、热史模拟法、矿物对法分别计算罕乌拉、Nartyn、Altanshiree 穹隆隆升速率。在本次计算过程中, AFT、ZHe 和黑云母 Ar-Ar 的密封温度分别取 110 °C (Donelick et al., 1999)、180 °C (Reiners et al., 2004)、350 °C。假设本区的古地温梯度为 35 °C/km (Li et al., 2011), 表面温度为 15 °C, 热史模拟法计算结果为: 罕乌拉穹隆 (M180717-4) 于 133~124 Ma, 隆升速率为 1.4 km/Ma, 于 124~123 Ma, 隆升速率为 5.71 km/Ma, 于 123~105 Ma, 隆升速率为 0.109 km/Ma; Nartyn 穹隆 (M19713-39.1) 于 133~125 Ma, 隆升速率为 1.79 km/Ma, 于 125~123 Ma, 隆升速率为 2.02 km/Ma, 于 123~101 Ma, 隆升速率为 0.09 km/Ma; Altanshiree 穹隆 (M19715-311.1) 于 127~126 Ma, 隆升速率为 14.3 km/Ma, 于 126~123 Ma, 隆升速率为 1.27 km/Ma, 于 123~110 Ma, 隆升速率为 0.151 km/Ma。年龄封闭温度法计算结果为: 罕乌拉穹隆 (M180717-4) 123.4 Ma 隆升速率为 0.038 km/Ma, 104.9 Ma 隆升速率为 0.026 km/Ma; Nartyn 穹隆 (M19713-39.1) 123.7 Ma 隆升速率为 0.038 km/Ma, 101.3 Ma 隆升速率为 0.027 km/Ma; Altanshiree 穹隆 (M19715-311.1) 110.1 Ma 隆升速率为 0.025 km/Ma; 矿物对法计算结果为: 罕乌拉穹隆 (M180717-4) 123.9~123.4 Ma 隆升速率为 5.71 km/Ma; 123.4~104.9 Ma 隆升速率为 0.109 km/Ma; Nartyn 穹隆 (M19713-39.1) 125~123.7 Ma 隆升速率为 2.02 km/Ma; 123.7~101.3 Ma 隆升速率为 0.09 km/Ma。详见表 5。其中热史模拟法记录的是样品各冷却阶段平均剥露速率, 年龄封闭温度法记录的是某时间节点



绿色区域和紫色区域分别代表可接受模拟结果(拟合度 $>5\%$ )和良好模拟结果(拟合度 $>50\%$ ), 黑色实线和白色实线分别代表最优拟合结果和加权平均路径, 图中矩形框表示时间-温度约束框

图11 南蒙古-中蒙边境花岗岩穹隆 HeTFy 模拟结果

Fig. 11 Results of thermal history modeling of granitoid domes from the South Mongolia-Sino-Mongolian border

的剥露速率(Lü et al., 2013), 虽然采取了3种不同的计算方法, 但其反映的隆升速率均为快速-缓慢地变化。

结合前人关于3个穹隆的高中温年代学数据以及对应盆地的时间-温度变化曲线(Daouene et al., 2012; 杜灿等, 2022; Xu et al., 2023), 笔者以所测单矿物年龄为横坐标, 以矿物封闭温度为纵坐标, 建立南蒙古-中蒙边境相关穹隆热演化历史(图12), 其中折线由陡变缓反映冷却速率逐渐变小, 特别地, (第一段、第二段折线)  $800^{\circ}\sim 180^{\circ}$  冷却速率远大于正常岩浆岩冷却速率( $20^{\circ}/\text{Ma}$ )说明岩体是在隆升的过程中快速

冷却。(第三段折线)  $180^{\circ}\sim 110^{\circ}$  冷却速率的降低说明岩体温度已近于地表, 但仍有缓慢的隆升作用参与。因此, 笔者以岩体冷却速率为依据, 将穹隆隆升分为3阶段: ①温度  $800^{\circ}\sim 350^{\circ}$ , 133~125 Ma 中等速度隆升。②温度  $350^{\circ}\sim 180^{\circ}$ , 125~123 Ma 快速隆升。③温度  $180^{\circ}\sim 110^{\circ}$ , 123~100 Ma 缓慢隆升。

## 5.2 穹隆三阶段隆升过程

通过对穹隆的磷灰石裂变径迹、锆石(U-Th)/He、 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测试结果以及构造-热演化历史模拟结果的综合分析, 笔者认为罕乌拉、Nartyn 和 Altanshiree 穹隆在晚中生代经历了3个隆升阶段。

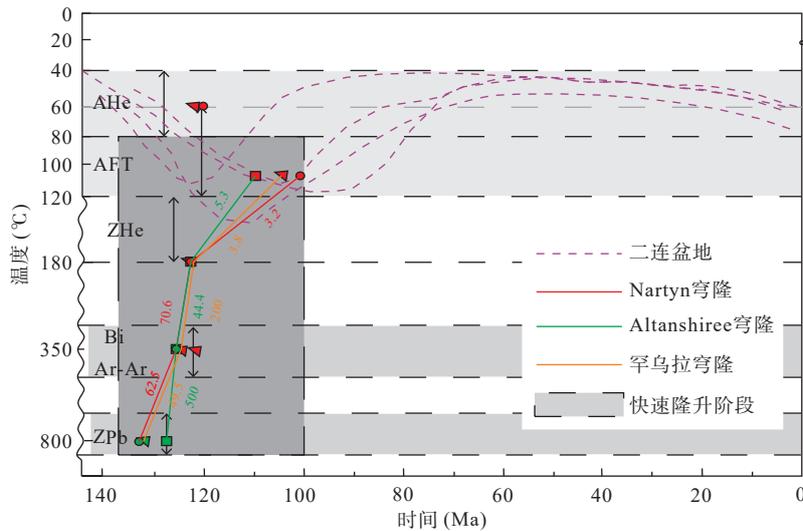


图12 南蒙古-中蒙边境典型花岗岩穹隆隆升冷却历史图(每一段折线上的数据为各阶段冷却速率)

Fig. 12 Cooling history of typical granite dome of the South Mongolia-Sino-Mongolian border

第一阶段(133~125 Ma)Nartyn 穹隆冷却速率为 62.5 °C/Ma, 罕乌拉穹隆冷却速率为 49.6 °C/Ma, 均远大于正常岩浆岩冷却速率(20 °C/Ma), 代表中等速度隆升过程。前人通过对构造变形机制、热动力学、变质作用及 P-T-t 轨迹的研究, 认为岩浆侵位是伸展构造的关键成因之一。因此, 结合已有的锆石 U-Pb 年龄数据(笔者解释认为 133 Ma 或更早, 具有 A 型花岗岩特征的岩浆开始侵入并加热地壳, 导致地壳岩石圈强度降低, 诱导花岗岩穹隆快速隆升。

第二阶段(125~123 Ma)Nartyn 穹隆冷却速率为 70.6 °C/Ma, 罕乌拉穹隆冷却速率为 200 °C/Ma, 冷却进一步加速。在野外观察中, 大量穿插于穹隆中的伟晶岩脉(125~123 Ma; Daudene et al., 2012), 暗示本阶段岩浆持续上涌仍促使穹隆隆升; 125 Ma 之后区域应力状态以拉伸为主, 3 个穹隆的拆离断层带普遍发育, 且晚期巨大伸展背景下发育的拆离断层叠加于早期韧性剪切带之上, 递进变形明显, 因此, 此阶段穹隆隆升为岩浆岩与区域伸展共同作用结果。

第三阶段(123~100 Ma), 穹隆冷却速率大幅下降(3.8~3.2 °C/Ma), 此时, 与穹隆相关岩体近乎出露于地表, 且野外未发现晚于 123 Ma 的岩浆岩作用证据, 而拆离断层带仍有发育, 即岩浆作用对穹隆隆升影响减弱, 区域伸展对穹隆仍有影响, 这也暗示穹隆伸展作用进入尾声。

对于 Altanshiree 穹隆, 其演化过程与 Nartyn 穹隆和罕乌拉穹隆存在一定差异(该穹隆三阶段冷却速率分别为 500 °C/Ma、44.4 °C/Ma、5.3 °C/Ma, 对应隆升速

率呈现骤减趋势), 笔者推测, Altanshiree 穹隆的隆升过程可能存在多期次岩浆就位, 随着岩浆作用减弱或减少, 隆升基本同期结束而区域伸展对此影响较弱。

### 5.3 穹隆伸展过程及区域对比

结合前人研究成果, 笔者将穹隆的发育过程分为以下 4 个阶段(图 13)。

(1)初期(约 160 Ma): 该阶段标志着穹隆初步形成, 区域内以中晚侏罗世 A 型岩浆作用为主(林伟等, 2019)。在这一时期, 增厚地壳发生拆沉, 导致地壳深部发生减薄, 岩浆呈层状侵入中下地壳, 导致地壳流变性增强, 形成相对软弱带。这一阶段的岩浆活动不仅推动了地壳的减薄, 还为穹隆后续的伸展奠定了基础。

(2)穹隆启动(约 160~130 Ma): 随着深部地壳伸展的加剧, 下地壳进一步熔融并形成大规模花岗质岩浆作用(Wang et al., 2011, 2012)。此时, 岩浆侵入中地壳并形成近水平的伸展剪切, 标志着穹隆形成的早期阶段。该阶段穹隆不仅受到岩浆侵位的影响, 还受到区域构造应力场的控制, 以韧性剪切带发育为特征, 反映出复杂的地壳变形过程。

(3)韧脆性转化(130~124 Ma): 随着地壳进一步减薄及岩浆的持续上涌, 穹隆进入韧脆性转化阶段, 形成了大型拆离带, 反映出穹隆的较快速抬升。在此过程中, 流体活动可能进一步影响岩体的变形机制和冷却历史, 晚期的低角度正断层普遍叠加于早期发育的韧性剪切带之上, 形成完整的拆离断层带。

(4)快速隆升阶段(124~105 Ma): 在这一阶段早

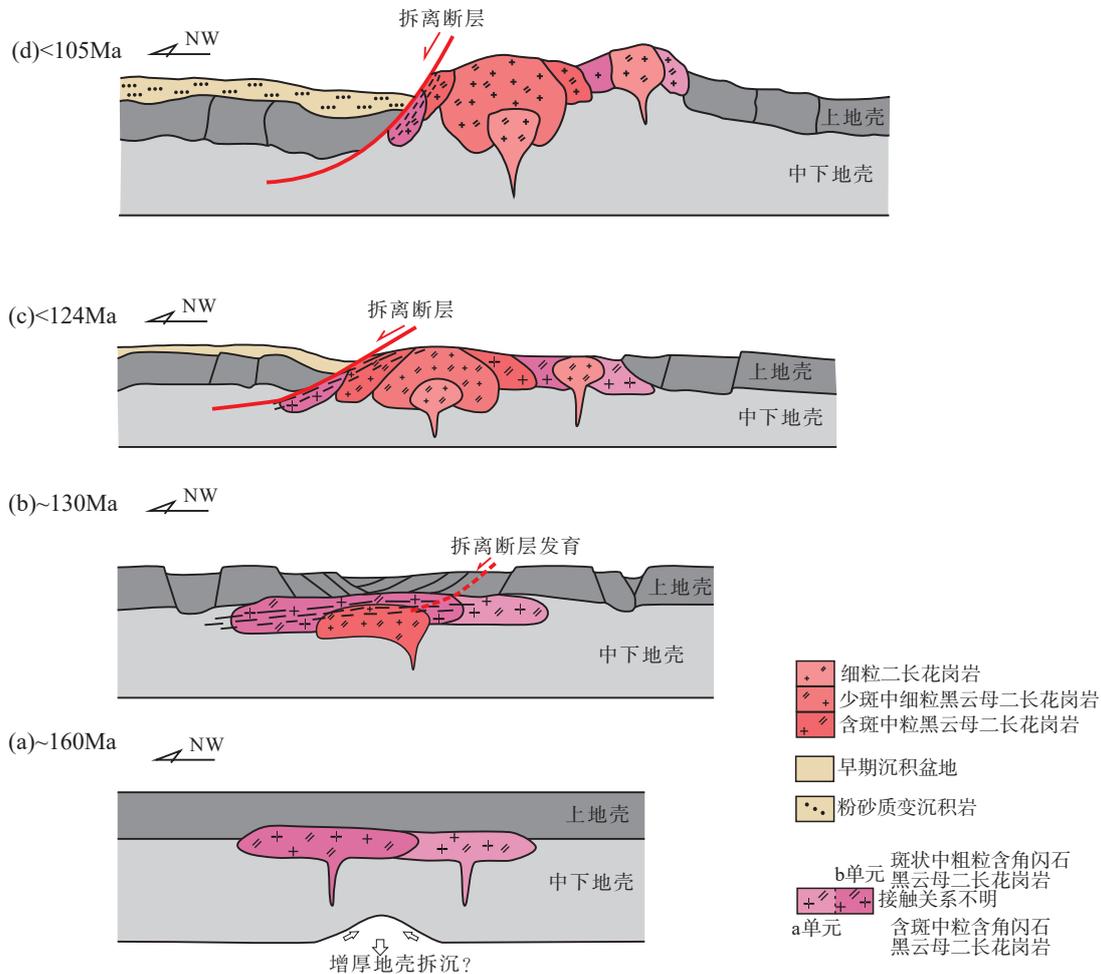


图13 南蒙古-中蒙边境地区早白垩世花岗岩穹隆隆升过程模式图

Fig. 13 Uplift process model of early Cretaceous granitic domes in the South Mongolia-Sino-Mongolian border

期, 穹隆隆升占据主导地位, 导致剪切带沿拆离面逐渐抬升, 最终剥露至浅表, 而在这变形过程中, 低角度正断层的断层面因垂向应力的作用, 角度逐渐增大最终转变为后期高角度铲式断层, 即随着变形的持续, 低角度断层面逐渐沿滑脱方向滑动, 转变为后期的高角度破裂面, 形成典型的铲式断层。这一阶段的快速抬升特征反映出岩浆活动与地壳伸展的相互作用。

前人的研究(Wang et al., 2012; 林伟等, 2013, 2019), 特别是热年代学的研究成果表明: 东北亚地区的伸展变形峰期为 130~120 Ma(Zhang et al., 1998; Webb et al., 1999; Zheng et al., 1991; Davis et al., 2001; Yin, 2004; Darby et al., 2004; Yang et al., 2007; Don-skaya et al., 2008; Guo et al., 2011; Daoudene et al., 2012, 2013; Wang et al., 2011, 2012; Zhang et al., 2012, 2017; Zhou et al., 2012; 林伟等, 2013; Yang et al., 2014; 林少泽等, 2014)。而根据 3 个穹隆的野外岩浆岩特征、剪切带内构造指示(NW-SE 伸展)及 Ar-Ar 热年代学数

据(128~122 Ma)的综合分析, 笔者认为 Altanshiree、Nartyn 和罕乌拉穹隆的发育与东北亚其他伸展穹隆具有一致性。

#### 5.4 大地构造意义

关于早白垩世发生大规模伸展的动力学机制主要有 3 种观点(Meng et al., 2003; Xu et al., 2013; Tang et al., 2020; Zhang et al., 2021; Yang et al., 2022): ①蒙古-鄂霍茨克洋闭合后, 岩石圈重力垮塌而引发的大规模伸展。②古太平洋板块向西俯冲导致弧后伸展以及岩石圈拆沉。③与蒙古-鄂霍茨克洋闭合相关的岩石圈伸展以及古太平洋板块回撤的共同作用。

Nartyn 穹隆、Altanshiree 穹隆和罕乌拉穹隆的伸展方向均为 NW-SE 向, 与蒙古及外贝加尔湖地区的伸展构造样式一致, 且靠近蒙古-鄂霍茨克构造带, 这表明伸展启动可能更多的是受到了蒙古-鄂霍茨克洋造山后垮塌的影响(Wang et al., 2011, 2022)。此外, 3 个穹隆在 130~120 Ma 期间岩浆活动持续不断, 这可

能与古太平洋板块的俯冲后撤所引起的岩石圈拆沉的相关岩浆作用进一步叠加, 导致穹隆的快速隆升和剥露。因此, 笔者推测 Altanshree 穹隆、Nartyn 穹隆和罕乌拉穹隆的隆升早期可能与蒙古-鄂霍茨克洋造山后垮塌相关, 后期则受到古太平洋板块俯冲回撤引发弧后伸展的叠加影响。

## 6 结论

(1) 罕乌拉、Nartyn 和 Altanshree 3 个穹隆代表性样品中低温热年代学测试结果为: 磷灰石裂变径迹年龄: 101.30~110.05 Ma; 锆石(U-Th)/He 年龄: 123.07~123.40 Ma; 黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄: 121.3~123.9 Ma; 钾长石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄: 122.2~122.3 Ma。

(2) 中低温热年代学数据结合热史模拟得出: 内蒙古-中蒙边境的 3 个穹隆在晚中生代经历了明显的隆升过程, 根据不同的隆升速率可分为 3 个阶段: ①133~125 Ma 为较快速的隆升过程。②125~123 Ma 为快速隆升过程。③123~100 Ma 为缓慢隆升过程。

(3) 罕乌拉穹隆、Nartyn 穹隆和 Altanshree 穹隆与东北亚的其他伸展构造具有一致的峰期伸展历史, 隆升机制可能早期与蒙古-鄂霍茨克洋造山后垮塌相关, 后期则受到古太平洋板块俯冲回撤引发的弧后伸展的叠加影响。

## 参考文献(References):

- 程银行, 滕学建, 李艳锋, 等. 东乌旗罕乌拉韧性剪切带的构造属性及其年代约束[J]. 地球科学, 2014, 39(4): 375-386.
- CHENG Yinhang, TENG Xuejian, LI Yanfeng, et al. Structural attributes and chronological constraints of the Hanwula ductile shear zone in Dongwuqi[J]. Earth Science, 2014, 39(4): 375-386.
- 杜灿, 郭磊, 王涛, 等. 中蒙边界早白垩世不对称花岗岩穹隆的伸展时限、剪切作用类型和区域构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(1): 18-36.
- DU Can, GUO Lei, WANG Tao, et al. Timing of extension, shear types, and regional tectonic implications of the Early Cretaceous asymmetric granitic dome along the China-Mongolia border[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(1): 18-36.
- 郭磊, 李建波, 童英, 等. 内蒙古苏尼特左旗早白垩世宝德尔花岗岩伸展穹隆的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 2015, 34(12): 2195-2202.
- GUO Lei, LI Jianbo, TONG Ying, et al. Identification and geological significance of the Early Cretaceous Baode'er granite extensional dome in Sonid Left Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(12): 2195-2202.
- 林伟, 许德如, 侯泉林, 等. 中国大陆中东部早白垩世伸展穹隆构造与多金属成矿[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 409-430.
- LIN Wei, XU Deru, HOU Quanlin, et al. Early Cretaceous extensional doming and polymetallic mineralization in central-eastern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(3): 409-430.
- 林伟, 王军, 刘飞, 等. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1791-1810.
- LIN Wei, WANG Jun, LIU Fei, et al. Late Mesozoic extensional structures and their geodynamic background in the North China Craton and adjacent regions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1791-1810.
- 林少泽, 朱光, 赵田, 等. 燕山地区喀喇沁变质核杂岩的构造特征与发育机制[J]. 科学通报, 2014, 59(32): 3174-3189.
- LIN Shaoze, ZHU Guang, ZHAO Tian, et al. Structural characteristics and development mechanism of the Kalaqin metamorphic core complex in the Yanshan area[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(32): 3174-3189.
- 王雅美, 尹继元, 袁超, 等. 新疆西准噶尔苏云河斑岩型钼矿的剥露和保存条件: 来自裂变径迹和(U-Th)/He 热年代学的约束[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2547-2561.
- WANG Yamei, YIN Jiyuan, YUAN Chao, et al. Exhumation and preservation conditions of the Suyunhe porphyry Mo deposit in West Junggar, Xinjiang: Constraints from fission track and (U-Th)/He thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(8): 2547-2561.
- 王涛, 郑亚东, 刘树文, 等. 中蒙边界亚干变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩——早中生代收缩与伸展构造体制的转换标志[J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 177-186.
- WANG Tao, ZHENG Yadong, LIU Shuwen, et al. Mylonitized K-feldspar granites in the Yagan metamorphic core complex along the China-Mongolia border: A marker of transition from contraction to extension in the Early Mesozoic[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 177-186.
- 王涛, 张建军, 李舫, 等. 东北亚晚古生代—中生代岩浆时空演化: 多重板块构造体制范围及叠合的鉴别证据[J]. 地学前缘, 2022, 29(2): 28-44.
- WANG Tao, ZHANG Jianjun, LI Shan, et al. Spatiotemporal evolution of Late Paleozoic-Mesozoic magmatism in Northeast Asia: Identification evidence for the scope and superposition of multiple plate tectonic regimes[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(2): 28-44.
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 等. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义[J]. 地质通报, 2007, 26(9): 1154-1166.
- WANG Tao, ZHENG Yadong, ZHANG Jinjiang, et al. Some problems in the study of Mesozoic extensional tectonics of the North

- China Craton and their significance for lithospheric thinning[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(9): 1154–1166.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 11–28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 11–28.
- 杨雪叶, 尹继元, 肖文交, 等. 东北那丹哈达岭中—新生代构造-热演化史: 来自 (U-Th)/He 和裂变径迹热年代学的证据[J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3660–3675.
- YANG Xueye, YIN Jiyuan, XIAO Wenjiao, et al. Meso-Cenozoic tectonic-thermal evolution of the Nadanhada Range in Northeast China: Evidence from (U-Th)/He and fission track thermochronology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3660–3675.
- Amanatov V A. First discovery of the lower Cambrian deposits in Eastern Mongolia[M]//Marinov N A, ed. *Materials for Geology of Mongolian People's Republic*. Moscow: Nedra, 1966: 13–15.
- Badarch G. Tectonics of south Mongolia[M]//Seltmann R, Gerel O, Kirwin D, eds. *Geodynamics and Metallogeny of Mongolia with a Special Emphasis on Copper and Gold Deposits*. London: CERCAMS, 2005: 119–129.
- Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 87–110.
- Byamba J, Lkhundev S, Tundev S. New data on age of Upper Proterozoic deposits in Middle Gobi[J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1990, 312(12): 428–431.
- Corrigan J. Inversion of apatite fission track data for thermal history information[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B6): 10347–10360.
- Daoudene Y, Gapaïs D, Ruffet G, et al. Syn-thinning pluton emplacement during Mesozoic extension in eastern Mongolia[J]. *Tectonics*, 2012, 31(3): TC3001.
- Daoudene Y, Ruffet G, Cocherie A, et al. Timing of exhumation of the Ereendavaa metamorphic core complex (north-eastern Mongolia): U-Pb and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 98–116.
- Darby B J, Davis A D, Zhang X H. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulushan, western Liaoning Province, northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 145–155.
- Davis G A, Wang C, Zheng Y D, et al. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional styles[J]. *Geology*, 1998, 26(1): 43–46.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, Northern China[C]//Geological Society of America Memoir. Boulder: Geological Society of America, 2001: 171–197.
- Ding R X, Zhou Z Y, Wang W. Modeling exhumation rates of orogenic belts with low-temperature thermochronological data[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(5): 447–455.
- Donelick R A, Ketcham R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: II. Crystallographic orientation effects[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84(9): 1224–1234.
- Donelick R A, O'Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite fission track analysis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 58(1): 49–94.
- Donskaya T V, Windley B F, Mazukabzov A M, et al. Age and evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 2008, 165(1): 405–421.
- Edel J B, Schulmann K, Hanžl P, et al. Palaeomagnetic and structural constraints on  $90^\circ$  anticlockwise rotation in SW Mongolia during the Permo-Triassic: Implications for Altaid oroclinal bending[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 94: 157–171.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, et al. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 94(4): 405–415.
- Green P F. Thermal and tectonic history of the East Midlands shelf (onshore UK) and surrounding regions assessed by apatite fission track analysis[J]. *Journal of the Geological Society*, 1989, 146(5): 755–773.
- Guo L, Wang T, Zhang J J, et al. Evolution and time of formation of the Hohhot metamorphic core complex, North China: New structural and geochronological evidence[J]. *International Geology Review*, 2011, 54(11): 1309–1331.
- Huang B, Yan Y L, Piper J D A, et al. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during late Paleozoic and early Mesozoic times[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 8–36.
- Huang H, Wang T, Tong Y, et al. Rejuvenation of ancient micro-continents during accretionary orogenesis: Insights from the Yili Block and adjacent regions of the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103255.
- Hurford A J. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommittee on Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 1990, 80(2): 171–178.
- Hurford A J, Green P F. The zeta age calibration of fission-track dating[J]. *Chemical Geology*, 1983, 41(1): 285–317.
- Ketcham R A, Carter A, Donelick R A, et al. Improved modeling of fission-track annealing in apatite[J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(5–6): 799–810.

- Ketcham R A, Donelick R A, Balestrieri M L, et al. Reproducibility of apatite fission-track length data and thermal history reconstruction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(3-4): 504-515.
- Koppers A A P. ArArCALC—Software for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age calculations[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(5): 605-619.
- Lehmann J, Schulmann K, Lexa O, et al. Structural constraints on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia [J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(7): 575-628.
- Lin W, Faure M, Monie P, et al. Polyphase Mesozoic tectonics in the eastern part of North China Block: Insights from the Eastern Liaoning Peninsula massif (NE China)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 280(1): 153-169.
- Lin W, Wei W. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis [J]. *International Geology Review*, 2018.
- Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. *Tectonophysics*, 2005, 407(1): 65-80.
- Li S Z, Zhang G W, Zhou L H, et al. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 79-107.
- Lü H H, Chang Y, Wang W, et al. Rapid exhumation of the Tianshan Mountains since the early Miocene: Evidence from combined apatite fission track and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(12): 2116-2125.
- Meng Q R. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract?[J]. *Tectonophysics*, 2003, 369(3-4): 155-174.
- Reiners P W, Spell T L, Nicolescu S, et al. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(8): 1857-1887.
- Ruzhentsev S V, Pospelov I I, Badarch G. Tectonics of the Mongolian Indosinides[J]. *Geotectonics*, 1989, 23(5): 476-487.
- Sengör A M C. Some current problems on the tectonic evolution of the Mediterranean during the Cainozoic[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- Sengör A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis[C]//Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-641.
- Steiger R H, Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36(3): 359-362.
- Tang J, Li A P, Xu W L. Geochronology and geochemistry of late Carboniferous-Middle Jurassic magmatism in the Helong area, NE China: Implications for the tectonic transition from the Paleo-Asian oceanic to circum-Pacific regime[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(3): 1808-1825.
- Thomson S N, Ring U. Thermochronologic evaluation of postcollision extension in the Anatolide orogen, western Turkey[J]. *Tectonics*, 2006, 25(3): TC3005.
- Wang F, Jourdan F, Lo C H, et al. YBCs: A new standard for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating[J]. *Chemical Geology*, 2014, 388: 87-98.
- Wang T, Guo L, Zheng Y D, et al. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. *Lithos*, 2012, 154: 315-345.
- Wang T, Guo L, Zhang L, et al. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97(Part B): 365-392.
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, et al. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. *Tectonics*, 2011, 30(6): TC6007.
- Wang T, Tong Y, Xiao W J, et al. Rollback, scissor-like closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and formation of an orocline: magmatic migration based on a large archive of age-data[J]. *National Science Review*, 2022, 9(12): nwab210.
- Webb LE, Graham S A, Johnson C L, et al. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia[J]. *Geology*, 1999, 27(2): 143-146.
- Wilde S A. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction—A review of the evidence[J]. *Tectonophysics*, 2015, 662: 345-362.
- Wu F Y, Han R H, Yang J H, et al. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2007, 238(3): 232-248.
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China[J]. *Lithos*, 2012, 150: 6-25.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 94-128.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069.

- Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167–193.
- Xu W, Zhou Y S, Zhang J, et al. Thermo-tectonic evolution of the northern Erlian Basin (NE China): Evidence from fission track and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 248: 105620.
- Yang F, Chen G Z, Wu G, et al. Geochronology and geochemistry of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks from Erguna Massif, NE China: Evidence for the back-arc extension of the Mongol-Okhotsk orogenic belt[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2022, 111(1): 173–194.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(11): 1405–1414.
- Yang L Q, Deng J, Goldfarb R, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1469–1483.
- Yin A. Gneiss domes and gneiss dome systems[C]//Whitney D L, Teyssier C, Siddoway C S, eds. *Gneiss Domes in Orogeny*. Boulder: Geological Society of America Special Paper, 2004, 380: 1–14.
- York D. Least squares fitting of a straight line with correlated errors[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1969, 5(5): 320–324.
- Zhang B, Cai F, Chen S, et al. Sinistral strike-slip shearing along the Jiali shear zone around the Eastern Himalaya syntaxis region: Evidence for Oligocene eastward limited translation of Tibet[J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 139: 104016.
- Zhang F Q, Dilek Y, Chen H L, et al. Late Cretaceous tectonic switch from a Western Pacific- to an Andean-Type continental margin evolution in East Asia, and a foreland basin development in NE China[J]. *Terra Nova*, 2017, 29(6): 335–342.
- Zhang F Q, Chen H L, Yang S F, et al. Late Mesozoic–Cenozoic evolution of the Sanjiang Basin in NE China and its tectonic implications for the West Pacific continental margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 287–299.
- Zhang J J, Guo P Y, Sun P, et al. Petrogenesis of the early Cretaceous intra-plate basalts from the Western North China Craton: Implications for the origin of the metasomatized cratonic lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 2021, 380–381: 105887.
- Zhang J J, Zheng Y D, Liu S W. *Xiao Qinling Metamorphic Core Complex*[M]. Beijing: Ocean Press, 1998: 1–120.
- Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, et al. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(3–4): 588–600.
- Zheng Y D, Wang S Z, Wang Y F. An enormous thrust nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in Sino-Mongolian boundary area[J]. *Science in China Series B*, 1991, 34(9): 1146–1152.
- Zhou Y Z, Han B F, Zhang B, et al. The Yingba shear zone on the Sino-Mongolian border: Southwestern extension of the Zuunbayan Fault from Mongolia to China and implications for Late Mesozoic intracontinental extension in Eastern Asia[J]. *Tectonophysics*, 2012, 574: 118–132.