

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202601310039

拉萨地体巴松措片岩变质条件与时代：对其早侏罗世地壳增厚的约束

宋小春¹, 沈洁^{1,2}, 戴紧根^{1,*}, 刘伯蓉¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南 海口 571127)

摘要: 南、北拉萨地体于晚三叠世—早侏罗世碰撞拼贴, 但其碰撞后的变质作用时限、条件与动力学过程仍缺乏精确约束。位于二者之交的巴松措地区是研究该过程的理想区域, 然而已有研究对其碰撞后约200 Ma以来的变质记录缺乏系统认识。本文对巴松措地区石榴子石云母片岩开展了详细的岩相学、全岩地球化学、锆石U-Pb年代学与相平衡模拟研究。结果表明: (1) 变质成因锆石边部U-Pb加权平均年龄为 (191.84 ± 0.84) Ma (MSWD = 0.25, $n = 12$), 限定了该期变质作用发生于早侏罗世。(2) 相平衡模拟获得峰值变质条件为589.5 °C和12.4 kbar, 并揭示了一条具顺时针演化特征的 P - T 轨迹, 指示了增压升温后近等温折返的过程。(3) 全岩地球化学特征指示原岩为大陆碰撞背景下的泥质沉积岩。本研究在巴松措地区识别出 (191.84 ± 0.84) Ma的高压变质事件, 其较高的压力与顺时针 P - T 轨迹共同揭示了南、北拉萨地体碰撞后地壳持续增厚与热松弛滞后的动力学过程, 为完善拉萨地体构造演化模型提供了关键的温压-年代学约束。

关键词: 拉萨地体; 高压变质; 变质相图; 地壳增厚; 相平衡模拟

中图分类号: P54; P575.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-0973-13

Metamorphic P - T Conditions and Age of Schist in Basong Tso, Southern Tibet : Implications for Early Jurassic Crustal Thickening of the Lhasa Terrane

SONG Xiaochun¹, SHEN Jie^{1,2}, DAI Jinggen^{1,*}, LIU Borong¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Haikou Marine Geological Center, China Geological Survey, Haikou, Hainan 571127, China)

Abstract: The collision between the South and North Lhasa terranes occurred from the Late Triassic to the Early Jurassic, yet the timing, conditions, and dynamic processes of post-collisional metamorphism remain poorly constrained. The Basong Tso region, located at the boundary between the two terranes, is an ideal area for studying this process. However, existing studies lack a systematic understanding of the metamorphic record since ca. 200 Ma (i. e., after the collision). In this paper, we present detailed petrographic, whole-rock geochemical, zircon U-Pb geochronological, and phase equilibrium modeling analyses on garnet-mica schist from

收稿日期: 2026-01-31; 修回日期: 2026-03-15; 编辑: 李龚健。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2652023001)。

作者简介: 宋小春, 女, 本科生, 2004年出生, 地质学专业。Email: songxiaochun04@163.com。

* 通信作者: 戴紧根, 男, 教授, 1983年出生, 构造地质学专业, 主要从事青藏高原构造地貌演化及其资源效应。

Email: djgtibet@163.com。

引用格式: 宋小春, 沈洁, 戴紧根, 等. 拉萨地体巴松措片岩变质条件与时代: 对其早侏罗世地壳增厚的约束 [J]. 现代地质, 2026, 40 (4): 973-985. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202601310039.

SONG Xiaochun, SHEN Jie, DAI Jinggen, et al. Metamorphic P - T Conditions and Age of Schist in Basong Tso, Southern Tibet : Implications for Early Jurassic Crustal Thickening of the Lhasa Terrane [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (4): 973-985. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202601310039.

the Basong Tso region. The results show that: (1) The weighted mean U-Pb age of metamorphic zircon rims is (191.84 ± 0.84) Ma (MSWD = 0.25, $n = 12$), constraining the timing of this metamorphic event to the Early Jurassic. (2) Phase equilibrium modeling yields peak metamorphic conditions of 589.5 °C and 12.4 kbar and reveals a clockwise P - T path, indicating near-isothermal exhumation following an increase in pressure and temperature. (3) Whole-rock geochemical characteristics suggest that the protolith formed in a continental collision setting. This study identifies a (191.84 ± 0.84) Ma high-pressure metamorphic event in the Basong Tso region. The elevated pressure and clockwise P - T path collectively reveal the dynamic process of continuous crustal thickening and delayed thermal relaxation after the collision of the South and North Lhasa terranes, providing critical P - T - t constraints for refining the tectonic evolution model of the Lhasa terrane.

Key words: Lhasa Terrane; high-pressure metamorphic; metamorphic phase diagram; crustal thickening; phase equilibrium modeling

0 引言

拉萨地体作为青藏高原的核心组成部分,起源于冈瓦纳大陆北缘,其演化历史经历了多期的裂解、漂移,最终向北拼贴至欧亚大陆南缘^[1-9]。拉萨地体中部的唐加—松多俯冲增生杂岩带(即洛巴堆—米拉山断裂带)将其进一步划分为北拉萨和南拉萨两个主要构造单元^[10]。现有研究表明,拉萨地体经历了复杂的变质演化历史,主要包括四个阶段:新元古代和晚古生代洋壳俯冲背景下的高压变质作用;早古生代和早中生代陆-陆碰撞带的高压和中压变质作用;晚白垩世与洋中脊俯冲相关的中压变质作用;以及新生代两期与地壳加厚有关的中压变质作用^[6, 11]。这些变质事件记录了特提斯洋演化及印度—亚洲碰撞造山的关键信息,对构建青藏高原南部的构造演化模型具有重要意义。

巴松措地区位于南、北拉萨地体交界处,完整记录了松多古特提斯洋闭合至南、北拉萨地体碰撞拼合的地质过程,是研究这一关键阶段的理想窗口。Weller等^[12]在巴松措地区识别出了两条性质不同的变质带:北部的扎拉(Zhala)变质带由副片麻岩和花岗岩组成,记录了198~192 Ma期间Buchan型伸展背景下的低压高温变质作用;南部的巴松措(Basong Tso)变质带则由剪切片岩和正片麻岩组成,记录了204~201 Ma期间Barrovian型大陆碰撞背景下的中等温压变质作用。然而,目前的年代学与岩石学资料尚不足以完整重建南、北拉萨地体碰撞后的精细热力学过程,特别是对于碰撞后地壳是否经历了持续的增厚作用及其对应的 P - T 演化轨迹,仍缺乏系统的约束^[13]。

为了探讨上述科学问题,本研究选取巴松措地区对温压条件变化极为敏感的石榴子石云母片岩为研究对象,综合运用岩相学、全岩地球化学、锆石U-Pb年代学以及相平衡模拟方法,精确限定该区域变质作用的时限与 P - T 轨迹。本研究旨在通过解析变质作用的温压条件与动力学机制,揭示南、北拉萨地体碰撞后地壳热演化的深部过程,为完善拉萨地体碰撞造山模型提供新的关键证据。

1 地质背景

青藏高原由多个自北向南依次拼贴的地体构成,主要包括昆仑地体、松潘—甘孜地体、羌塘地体、拉萨地体和喜马拉雅地体。这些地体之间被一系列主缝合带所分隔,如阿尼玛卿缝合带、金沙江缝合带(JS)、班公湖—怒江缝合带(BN)以及印度河—雅鲁藏布江缝合带(IYZ)(图1(a))。拉萨地体位于青藏高原南部,南北介于班公湖—怒江缝合带与雅鲁藏布江缝合带之间,呈近东西向展布,南北宽100~300 km,东西延伸超过2000 km^[5, 14](图1(b))。其内部可识别出三条近东西向展布的中高级变质带^[6]:北部为北拉萨地体内的新元古代高压(HP)变质带;中部为位于南、北拉萨地体边界附近的晚二叠世高压(HP)—三叠世中压(MP)变质带;南部为南拉萨地体南缘的晚白垩世高温/中压(HT/MP)—始新世中压(MP)变质带。

巴松措地区(图1(c))主要由两条近东西向展布的晚三叠世—早侏罗世变质带组成,这两条变质带被约5 km宽的变沉积岩(变浊积岩)分隔,其界限可能为断层^[15]。北部带主要由扎拉杂岩组成,该杂岩带主要由副片麻岩和泥质混合

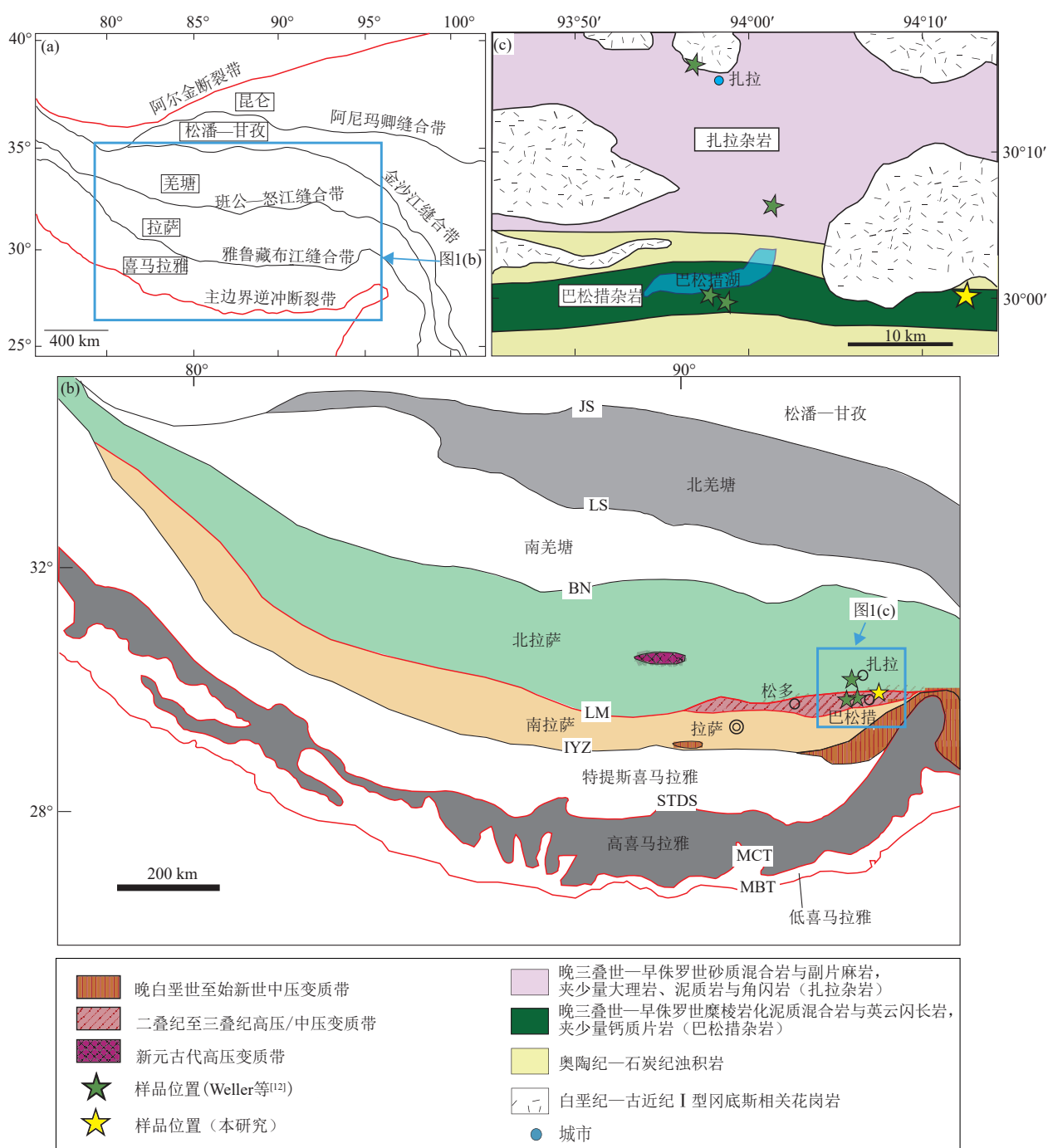


图1 青藏高原地质简图 (a), 拉萨地体地质简图 (b), 拉萨地体东段巴松措地区地质图 (c) (据 Zhang 等^[6], Yin 和 Harrison^[14], Guynn 等^[16], Shi 等^[17] 修改)

Fig. 1 Geological map of Tibetan Plateau (a), Geological map of Lhasa terrane (b), Geological map of Basong Tso area in eastern Lhasa terrane (c) (modified from Zhang et al^[6], Yin & Harrison^[14], Guynn et al^[16] and Shi et al^[17])

JS. 金沙江缝合带; LS. 龙木错—双湖缝合带; BN. 班公湖—怒江缝合带; LM. 洛巴堆—米拉山断裂带; IYZ. 印度河—雅鲁藏布江缝合带; STDS. 藏南拆离系; MCT. 主中央逆冲断层; MBT. 主边界逆冲断层

岩组成, 伴有少量大理岩和角闪岩。该杂岩带记录了早侏罗世 (约 192 Ma) 的变质峰期, 前人根据副片麻岩中低 Th/U 锆石边部的 U-Pb 分析结果, 限定其峰期变质时代为 192 Ma^[15]。扎拉杂岩带内发育部分变形的钾长石巨斑 S 型花岗岩侵入体, 表

明其构造-热演化历史复杂。南部带由巴松措杂岩组成, 该杂岩带主要由含蓝晶石的泥质混合岩和正片麻岩构成, 发育强烈的糜棱岩化构造, 其内正片麻岩的原岩结晶时代为 197 ~ 203 Ma, 副片麻岩记录的变质时代为 204 ~ 193 Ma。两个高级变质

带均经历了复杂的多期变形,区域上以区域动力热变质作用为主。

2 采样与分析方法

2.1 样品与岩相学

本研究样品(LCBR21-05)采自南拉萨地体巴松措杂岩带内(图1(c)),岩性为石榴子石白云母片岩,采样点GPS坐标为 $30^{\circ}00'27.05''\text{N}$,

$94^{\circ}13'00.13''\text{E}$ 。样品具典型的斑状变晶结构和片状构造(图2(a))。变斑晶主要为自形-半自形石榴子石,粒径最大可达 $3\sim 5\text{ mm}$,多数颗粒发育明显的网格状裂纹(图2(b-d))。基质由石英(约40%)、白云母(约20%)、黑云母(约15%)及少量斜长石等矿物组成。该矿物组合是进行相平衡模拟以约束变质温压条件的理想对象^[18-19]。

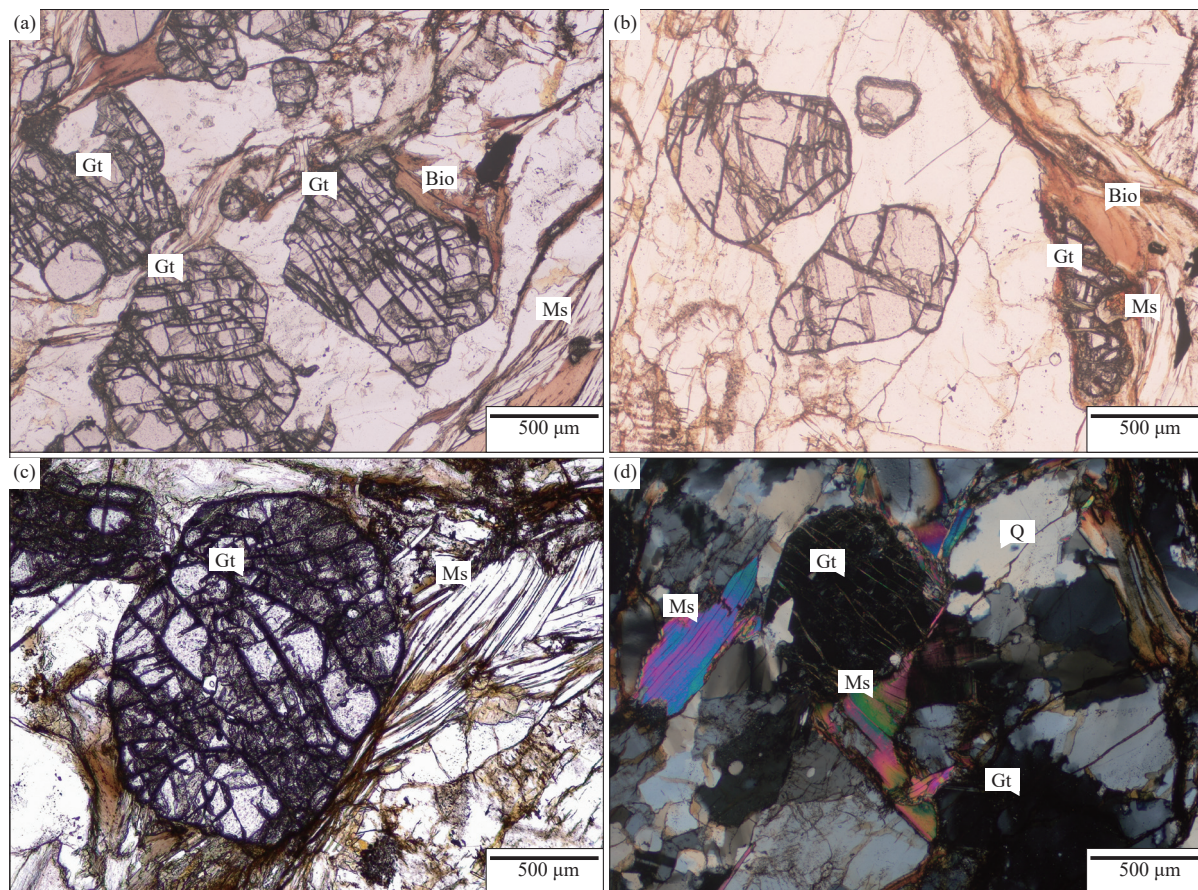


图2 拉萨地体东段巴松措地区石榴子石白云母片岩显微照片

Fig. 2 Microphotographs of garnet mica schist in Basong Tso area, eastern Lhasa terrane

Gt. 石榴子石; Bio. 黑云母; Ms. 白云母

2.2 分析方法

2.2.1 矿物主量元素分析

矿物的原位主量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,采用日本电子JXA-8230型电子探针(EPMA)。分析条件为:加速电压 15 kV ,束流 2 nA ,束斑直径 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。采用ZAF方法进行数据校正,标样为SPI公司提供的系列矿物及单质标样。

2.2.2 全岩地球化学分析

样品的全岩主量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。全岩主量元素分析仪器使

用日本理学(Rigaku)生产的ZSX Primus II型波长色散X射线荧光光谱仪(XRF), 4.0 kW 端窗铑靶X射线光管,测试条件为电压: 50 kV ,电流: 60 mA ,主量各元素分析谱线均为 $\text{K}\alpha$,标准曲线使用国家标准物质岩石系列GBW07101-14、土壤系列:GSS07401-08、水系沉积物系列和GBW07302-12建立。数据校正采用理论 α 系数法,测试相对标准偏差(RSD) $<2\%$ 。

全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用Agilent7700e ICP-MS分析完成,仪器工作参数为:RF功率为 1550 W ,等离子体气流

速 15 L/min, 采样深度 7.5 mm, 检测模式为模拟和脉冲两种模式, 采集时间 100 ms, 矩管: 屏蔽矩。测试精度为 5% (RSD), 准确度为 10% (相对偏差 (RD)), 内标采用 In。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下: (1) 将 200 目样品置于 105 °C 烘箱中烘干 12 小时; (2) 准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中; (3) 先后依次缓慢加入 1 ml 高纯 HNO₃ 和 1 ml 高纯 HF; (4) 将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 24 小时以上; (5) 待溶样弹冷却, 开盖后置于 140 °C 电热板上蒸干, 然后加入 1 ml HNO₃ 并再次蒸干; (6) 加入 1 ml 高纯 HNO₃、1 ml MQ 水和 1 ml 内标 In (浓度为 1 ppm), 再次将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 12 小时以上; (7) 将溶液转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

2.2.3 锆石 U-Pb 年代学与微量元素分析

锆石 U-Pb 定年及微量元素测试在中国地质大学 (北京) 矿物激光微区分析实验室 (MILMA Lab) 利用 LA-ICP-MS 方法完成。激光剥蚀系统为 193 nm ArF 准分子激光器, 剥蚀斑束直径 35 μm。采用国际标准锆石 91500 和 GJ-1 作为外部标准进行 U-Pb 分馏校正, NIST SRM 610 玻璃标样用于微量元素含量校准。数据处理采用 ICPMS-DataCal 软件。本次研究共对样品中的 40 颗锆石进行了分析。

2.2.4 相平衡模拟

相平衡模拟使用 GeoPS 软件 (3.6.5.16878 版本), 采用 Holland 和 Powell^[20] 的热力学数据库及相应的矿物活度-成分 (*a-X*) 模型。模拟所采用的具体固溶体模型包括: 石榴子石 (Gt; White^[21])、黑云母 (Bio; White 等^[21])、白云母

(Ms; White 等^[21])、斜长石 (Pl; Holland 和 Powell^[22])、钾长石 (Kf; Waldbaum&Thompson^[23]) 以及绿泥石 (Chl; Holland&Powell^[24]) 等。

模拟基于样品的全岩成分各氧化物 (扣除烧失量归一化至 100% 后对 TFe₂O₃ 简化处理, 对 CaO 含量依据全岩 P₂O₅ 含量和磷灰石分子式进行重新计算以扣除部分磷灰石中 CaO 的含量) 及独立组分 H₂O 进行, 以约束其稳定的矿物组合及 *P-T* 条件。

变质峰期水以流体相或含水矿物结构水的形式存在, 是热力学系统的必要组分, 且在中-高压变质作用的进变质过程中, 含水矿物 (如白云母) 的脱水反应会持续释放 H₂O, 且流体不易逃逸, 系统中通常存在游离流体相。因此尽管全岩成分已扣除烧失量, 但模拟中假设水为饱和状态 (过剩纯 H₂O 流体相)。

样品全岩主量元素分析中总铁以 TFe₂O₃ 形式给出, 未分别测试 FeO 和 Fe₂O₃。基于对样品的岩相学观察 (图 2 (a-d)) 未见磁铁矿、赤铁矿等富 Fe³⁺ 矿物, 指示岩石形成于相对还原的环境, 且即使存在少量的 Fe³⁺, 其主要赋存于副矿物 (如磁铁矿) 中, 对硅酸盐矿物平衡的影响可忽略。因此, 在相平衡模拟过程中, 将 TFe₂O₃ 简化处理, 全部换算为 FeO (换算系数为 0.8998), 即假设所有铁均为 Fe²⁺。

3 分析结果

3.1 矿物化学成分

石榴子石的电子探针成分分析结果列于表 1, 其端元组分三角投图示于图 3。分析结果表明, 石榴子石具有明显的成分环带: 从核部 (Gt-c) 到边部 (Gt-r), 铁铝榴石 (Alm) 组分由 73.9 ~ 75.4% 保持主导地位; 钙铝榴石 (Grs) 组分从核

表 1 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 中代表性石榴子石电子探针成分 (%)

Table 1 Representative garnet Electron probe microanalysis (EPMA) compositions in sample LCBR21-05(%)

点号	1Gt-c1	1Gt-c2	1Gt-r1	1Gt-r2	2Gt-c1	2Gt-r1	2Gt-r2	3Gt-c1	3Gt-r1	3Gt-r2	4Gt-r2	4Gt-r3	5Gt-c1	5Gt-c2	5Gt-r1	5Gt-r2	4Gt-r2
SiO ₂	37.18	37.20	37.29	37.33	37.23	37.21	37.70	36.95	37.03	37.24	37.14	37.50	36.59	37.09	37.28	36.94	36.71
TiO ₂	0.02	0.00	0.11	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	21.44	21.18	21.64	21.42	21.20	21.45	21.60	21.59	21.26	21.61	21.48	21.57	21.16	21.88	21.42	21.37	21.33
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00
FeO	33.12	33.53	33.65	33.47	34.20	33.93	33.06	34.97	34.43	34.23	32.95	33.24	33.67	34.03	33.87	33.11	32.74
MnO	3.59	3.39	3.10	2.57	2.01	1.79	2.04	2.30	2.70	2.50	2.03	2.09	1.97	2.71	2.72	2.58	2.23
MgO	3.49	3.61	3.51	2.97	3.24	3.21	3.08	3.53	3.64	3.49	3.18	3.12	3.14	3.58	3.41	3.26	3.00
CaO	1.41	1.18	1.25	2.30	2.64	2.57	3.28	1.21	1.05	1.59	3.17	2.97	2.75	1.40	1.60	2.71	3.34

注: Gt-c. 石榴子石核部; Gt-r. 石榴子石边部。

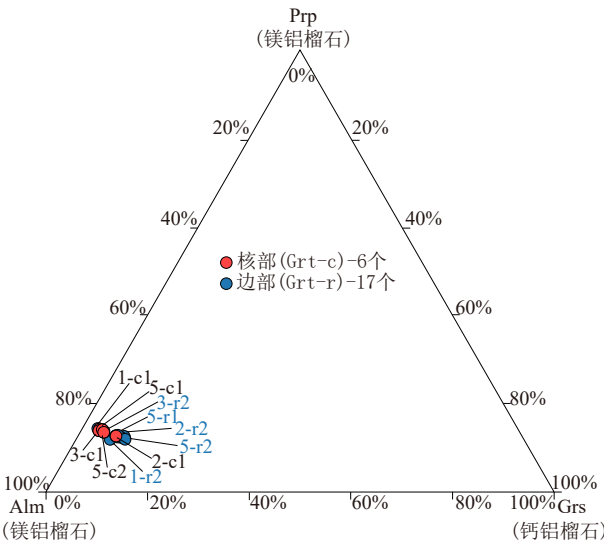


图3 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 中代表性石榴子石电子探针成分三角投图

Fig. 3 Triangular diagram of representative garnet electronic probe components in sample LCB21-05

部约5%增至边部9.7%，显著升高；而镁铝榴石 (Prp) 组分则从14.0~15.2%降至12.1~14.0%呈现轻微的降低趋势。锰铝榴石 (Sps) 组分含量极低 (<1%)。

白云母的电子探针分析结果 (数据详见表2) 显示其成分相对均一。SiO₂ 含量为46.2~48.3%，Al₂O₃ 为34.3~36.1%，K₂O 为9.2~10.1%，Na₂O 为0.9~1.2%，TiO₂ 为0.3~0.9%，FeO 为0.9~1.4%，MgO 为0.8~1.1%。

3.2 全岩地球化学特征

样品LCBR21-05的全岩主、微量元素分析结

果见表3和4，其稀土元素 (REE) 球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化蛛网图示于图4。其主量元素特征为：SiO₂ 含量为66.91%，高 Al₂O₃ (15.52%)，低 CaO (1.06%)、MgO (2.26%)，具有高 Al₂O₃/TiO₂ (20.29) 比值和高 K₂O/Na₂O (1.90) 比值。值得注意的是，MnO 含量仅为0.07%，属于泥质岩中 Mn 含量的低范围值，这一极低的 Mn 含量意味着 Mn 在体系中的热力学影响有限。球粒陨石标准化图解 (图4 (a)) 显示，样品ΣREE 较高，La (56.7 × 10⁻⁶)、Ce (111 × 10⁻⁶) 等轻稀土元素 (LREE) 富集，Yb (3.05 × 10⁻⁶)、Lu (0.48 × 10⁻⁶) 等重稀土元素 (HREE) 亏损，(La/Yb)_N 比值为16.79，轻、重稀土分异强烈，呈典型右倾分布模式；Eu/Eu* 为0.21，呈现显著的 Eu 负异常 (Eu/Eu* < 1)，与林彦蒿等^[25] 在巴松措附近报道的片麻岩相比，该样品的右倾趋势更明显，Eu 负异常强度更大。在其它微量元素特征方面，样品富集 Rb (144 × 10⁻⁶)、Ba (617 × 10⁻⁶) 等大离子亲石元素 (LILE)，相对亏损 Nb (20.6 × 10⁻⁶)、Ta (1.18 × 10⁻⁶) 等高场强元素 (HFSE)。在原始地幔标准化图解 (图4 (b)) 中显示，与林彦蒿等^[25] 报道的片麻岩相比，该片岩 LIFE 含量更高，Ti 亏损更显著，HFSE 含量相近；Nb/Ta 比值为17.46，接近大陆地壳平均比值17.5，Zr/Hf 比值为33.50 符合大陆地壳比值范围^[26]，Th/Yb 为7.44，Nb/Yb 为6.76，与大陆碰撞构造背景的变质岩地球化学特征相符^[27]。

表2 样品LCBR21-05白云母电子探针成分 (%)

Table 2 Muscovite Electron probe microanalysis (EPMA) compositions in sample LCB21-05 (%)

	Q2-04	Q2-05	Q2-06	Q4-04	Q4-05	Q4-06	Q6-04	Q6-05	Q6-06	Q7-04	Q7-05	Q7-06	Q9-05	Q9-06	Q9-07
K ₂ O	9.37	9.44	9.54	9.48	10.08	9.34	9.74	9.71	9.20	9.99	9.61	9.39	9.66	9.38	9.46
Cl	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.05	0.03	0.05	0.04	0.02	0.02	0.00	0.01
CaO	0.03	0.05	0.00	0.07	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.01
TiO ₂	0.56	0.61	0.92	0.67	0.60	0.86	0.71	0.61	0.60	0.68	0.49	0.51	0.29	0.66	0.75
Na ₂ O	1.22	1.16	1.07	1.08	0.94	1.16	1.14	1.03	1.16	1.14	1.01	1.13	1.18	1.12	1.12
MgO	0.77	0.94	1.10	0.89	0.90	0.98	0.95	1.00	1.08	1.09	0.93	0.92	0.84	0.93	1.09
Al ₂ O ₃	36.14	35.15	34.29	35.17	34.99	34.70	34.29	34.60	35.09	34.96	35.48	35.42	36.14	34.56	34.64
SiO ₂	47.27	47.11	47.00	47.32	47.31	46.56	46.23	47.76	48.35	47.99	47.32	46.78	47.60	46.70	47.46
NiO	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.07	0.06	0.07
FeO	1.19	1.37	1.20	1.24	1.08	1.19	1.12	1.06	1.12	1.08	0.88	1.18	1.33	1.09	1.24
MnO	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.05	0.09	0.02	0.00	0.00	0.07	0.06	0.04	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00
F	0.00	0.05	0.02	0.03	0.04	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
总量	96.61	96.01	95.16	95.98	95.93	94.90	94.26	95.88	96.65	96.97	95.83	95.36	97.20	94.50	95.85

表 3 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 全岩主量元素 (%) 分析结果
Table 3 Analysis results of major elements (%) in the whole rock of sample LCBR21-05

样品编号	备注	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TF _{e2} O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM
LCBR21-05	样品	66.91	0.77	15.52	5.90	0.07	2.26	1.06	1.74	3.30	0.10	2.21	99.84

注：LOI 指烧失量；SUM 指归一化总和，约 99.84%。

表 4 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 全岩微量元素 (10⁻⁶) 分析结果
Table 4 Analysis results of trace elements (10⁻⁶) in the whole rock of sample LCBR21-05

样品编号	LCBR21-05	BHVO-2	BHVO-2	RGM-2	RGM-2	GSR-3	GSR-3	JA-2	JA-2
备注	样品	标样	标样	标样	标样	标样	标样	标样	标样
Li	13.24	4.35	4.50	58.35	57.00	9.80	9.50	27.79	29.18
Be	1.22	1.05	1.08	2.44	2.37	2.64	2.50	2.11	2.26
Sc	14.66	31.85	31.83	4.79	4.40	14.64	15.20	19.14	18.93
V	99.29	315.81	318.20	13.04	13.00	166.61	167.00	122.52	119.70
Cr	74.24	277.49	287.20	3.65	5.90	131.59	134.00	437.69	424.80
Co	12.18	43.58	44.89	2.12	2.00	46.77	46.50	29.34	28.33
Ni	27.42	116.77	119.80	1.95	5.20	141.11	140.00	138.04	136.00
Cu	22.56	125.89	129.30	10.37	9.60	51.08	48.60	29.44	29.00
Zn	86.72	106.19	103.90	32.95	32.00	150.02	150.00	61.46	64.50
Ga	21.82	21.00	21.37	16.86	16.55	24.69	24.80	17.03	16.85
Rb	144.24	9.92	9.26	148.38	150.00	39.35	37.00	68.63	69.80
Sr	194.53	384.75	394.10	106.10	107.50	1123.09	1100.00	234.71	245.80
Y	33.94	25.40	25.91	23.12	23.16	22.95	22.00	16.54	16.89
Zr	262.83	165.30	171.20	226.73	220.00	279.97	277.00	105.24	108.50
Nb	20.62	18.92	18.10	8.79	9.30	76.33	75.80	8.59	9.30
Sn	1.08	1.66	1.78	3.58	3.34	2.10	2.00	1.52	1.69
Cs	4.39	0.10	0.10	9.74	9.60	0.45	0.42	4.62	4.78
Ba	617.01	128.22	130.90	824.75	810.00	519.93	526.00	302.89	308.40
La	56.72	15.65	15.20	23.97	24.00	55.00	56.00	16.09	15.46
Ce	110.99	37.41	37.53	46.46	47.00	106.29	105.00	32.27	32.86
Pr	12.65	5.59	5.34	5.75	5.36	12.01	12.80	3.95	3.69
Nd	47.45	23.97	24.27	19.79	19.00	48.37	48.90	14.13	14.04
Sm	9.46	6.16	6.02	4.10	4.30	10.08	10.20	3.24	3.03
Eu	1.84	2.06	2.04	0.64	0.66	3.20	3.20	0.90	0.89
Gd	7.78	6.23	6.21	3.73	3.70	8.36	8.50	3.11	3.01
Tb	1.18	0.96	0.94	0.63	0.66	1.13	1.14	0.49	0.48
Dy	6.90	5.37	5.28	3.86	4.10	5.58	5.60	3.06	2.85
Ho	1.27	0.99	0.99	0.80	0.82	0.88	0.88	0.61	0.59
Er	3.41	2.44	2.51	2.41	2.35	1.95	2.00	1.73	1.68
Tm	0.47	0.32	0.33	0.37	0.37	0.23	0.23	0.26	0.25
Yb	3.05	1.96	1.99	2.53	2.60	1.28	1.20	1.68	1.65
Lu	0.48	0.28	0.28	0.39	0.40	0.16	0.16	0.25	0.25
Hf	7.85	4.40	4.47	6.34	6.20	6.29	6.50	3.00	2.84
Ta	1.18	1.14	1.15	0.93	0.95	4.30	4.30	0.68	0.65
Tl	0.77	0.03	0.02	0.90	0.93	0.05	—	0.35	0.33
Pb	22.48	1.51	1.65	19.60	19.27	4.32	4.75	19.18	18.88
Th	22.71	1.24	1.22	14.68	15.10	6.06	6.00	5.19	4.80
U	3.10	0.40	0.41	5.77	5.80	1.39	1.40	2.23	2.18

注：“—”表示低于检测限。

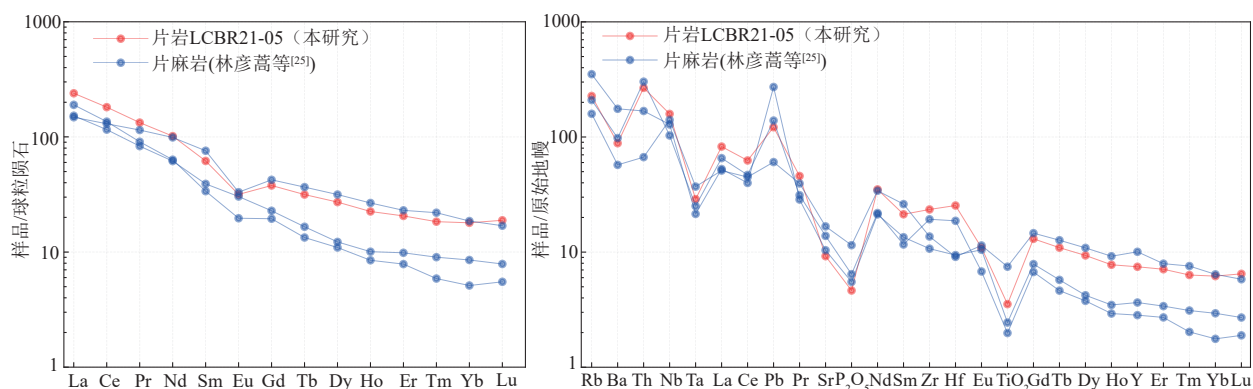


图4 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 全岩稀土元素球陨石标准化配分图 (a) 与微量元素原始地幔标准化蛛网 (b) (蓝线数据根据林彦嵩等^[25]; 标准化值根据 McDonough 和 Sun^[26]; Sun 和 McDonough^[28])

Fig. 4 Whole rock rare earth element chondrite-normalized distribution map of sample LCBR21-05 (a) and trace element primitive mantle-normalized spider diagram (b) (blue line data according to Lin et al^[25]; normalized values based on McDonough and Sun^[26]; Sun and McDonough^[28])

3.3 锆石 U-Pb 年代学结果

样品中的锆石多呈半自形-自形长柱状, 长宽比多为 2:1 至 3:1, 粒径约 100~150 μm 。阴极发光 (CL) 图像显示, 大部分锆石具有核-边结构

(图 5 (a))。锆石核部通常发育振荡环带或结构复杂, 其锆石 U-Pb 分析结果如表 5 所示, 显示出约 1060 Ma 和约 1029 Ma 两组年龄 (图 5 (b-c)), 代表中元古代末期的继承锆石年龄。锆石 CL 图像

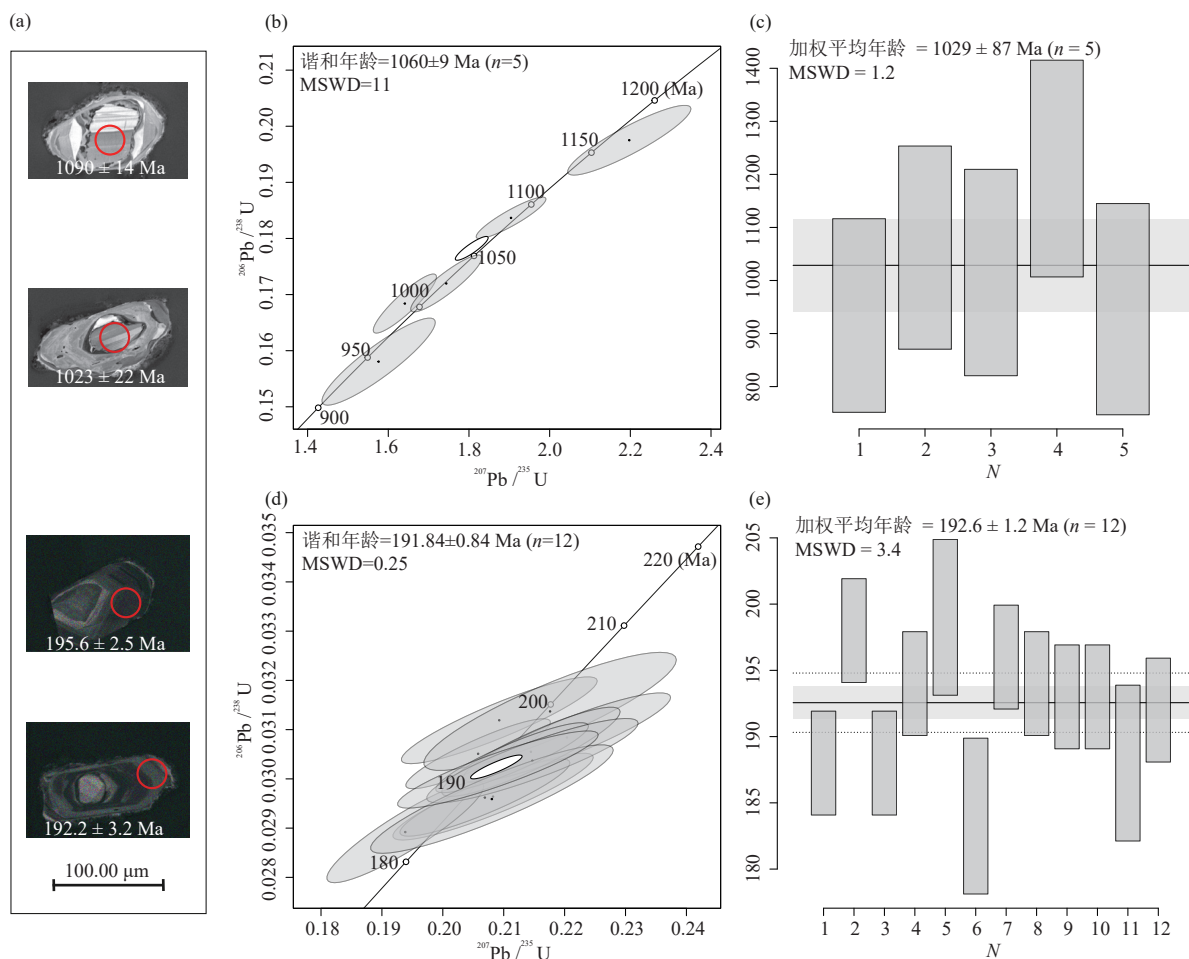


图5 巴松措石榴子石云母片岩 (LCBR21-05) 锆石 CL 图像与锆石年龄结果

Fig. 5 Zircon CL image and zircon age results of sample LCBR21-05

表 5 样品 LCBR21-05 锆石 U-Pb 分析结果
Table 5 Zircon U-Pb analysis results of sample LCBR21-05

测点号	同位素比值								年龄(Ma)								谐和度 (%)
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	
1	0.0470	0.0010	0.0779	0.0024	0.0120	0.0001	0.0038	0.0001	48	48	76	2	77	0.8	76	2	98.70
2	0.0586	0.0015	0.7473	0.0277	0.0923	0.0012	0.0298	0.0008	550	56	567	16	569	7	594	15	99.65
3	0.0506	0.0011	0.2083	0.0067	0.0296	0.0004	0.0364	0.0028	224	50	192	6	188	2	722	54	102.13
4	0.0702	0.0007	1.6411	0.0320	0.1684	0.0022	0.0509	0.0013	934	20	986	12	1003	12	1004	25	93.12
5	0.0471	0.0008	0.1903	0.0048	0.0292	0.0003	0.0230	0.0021	54	40	177	4	185	2	460	41	95.68
6	0.0490	0.0008	0.2301	0.0066	0.0340	0.0005	0.0514	0.0024	146	38	210	5	215	3	1013	47	97.67
7	0.0976	0.0012	4.1204	0.0901	0.3047	0.0035	0.0815	0.0021	1579	23	1658	18	1715	17	1584	39	92.07
8	0.0992	0.0009	3.5568	0.0550	0.2584	0.0022	0.0842	0.0026	1610	16	1540	12	1482	11	1633	48	108.64
9	0.0488	0.0011	0.2093	0.0066	0.0312	0.0004	0.0527	0.0043	139	50	193	6	198	2	1039	82	97.47
10	0.0538	0.0015	0.3445	0.0144	0.0471	0.0008	0.0155	0.0005	363	60	301	11	296	5	310	9	101.69
11	0.0504	0.0009	0.2069	0.0057	0.0296	0.0003	0.0302	0.0025	214	42	191	5	188	2	602	49	101.60
12	0.0748	0.0009	1.9043	0.0353	0.1837	0.0015	0.0546	0.0010	1062	23	1083	12	1087	8	1074	20	97.70
13	0.0489	0.0008	0.2058	0.0049	0.0305	0.0003	0.0185	0.0012	141	36	190	4	194	2	371	24	97.94
14	0.0503	0.0013	0.2176	0.0085	0.0314	0.0005	0.0099	0.0003	210	60	200	7	199	3	199	6	100.50
15	0.0483	0.0007	0.1938	0.0053	0.0289	0.0004	0.0091	0.0002	114	36	180	4	184	3	182	4	97.83
16	0.0518	0.0011	0.2204	0.0070	0.0308	0.0004	0.0326	0.0027	278	48	202	6	196	2	648	53	103.06
17	0.0511	0.0009	0.2145	0.0060	0.0306	0.0004	0.0349	0.0025	244	39	197	5	194	2	693	49	101.55
18	0.0597	0.0014	0.2171	0.0070	0.0264	0.0003	0.1321	0.0172	594	48	199	6	168	2	2508	308	118.45
19	0.0501	0.0008	0.2114	0.0051	0.0304	0.0003	0.0250	0.0058	199	36	195	4	193	2	499	113	101.04
20	0.0513	0.0012	0.2147	0.0071	0.0304	0.0004	0.0096	0.0002	253	52	197	6	193	2	192	4	102.07
21	0.0493	0.0009	0.1854	0.0047	0.0272	0.0003	0.0263	0.0023	161	40	173	4	173	2	524	46	100.00
22	0.0744	0.0008	1.5517	0.0262	0.1505	0.0011	0.0451	0.0014	1053	21	951	10	904	6	891	27	105.20
23	0.0981	0.0019	4.0226	0.1216	0.2967	0.0040	0.0855	0.0021	1588	34	1639	25	1675	20	1659	38	94.81
24	0.0527	0.0009	0.2407	0.0074	0.0330	0.0005	0.0325	0.0037	318	39	219	6	209	3	646	73	104.78
25	0.0578	0.0013	0.4373	0.0146	0.0546	0.0007	0.0168	0.0005	523	48	368	10	343	4	337	10	107.29
28	0.0523	0.0012	0.3649	0.0128	0.0507	0.0008	0.0165	0.0005	299	48	316	10	319	5	330	9	99.06
29	0.0730	0.0008	1.7438	0.0360	0.1720	0.0021	0.0526	0.0010	1015	22	1025	13	1023	11	1035	19	99.22
30	0.0511	0.0013	0.2081	0.0081	0.0296	0.0005	0.0502	0.0074	246	58	192	7	188	3	989	142	102.13
31	0.0500	0.0012	0.2090	0.0067	0.0302	0.0003	0.0259	0.0022	197	52	193	6	192	2	516	43	100.52
33	0.0553	0.0011	0.2200	0.0067	0.0289	0.0004	0.0672	0.0055	422	44	202	6	184	2	1314	104	109.78
34	0.0806	0.0014	2.1975	0.0624	0.1975	0.0025	0.0561	0.0014	1211	34	1180	20	1162	14	1103	28	104.22
35	0.0469	0.0009	0.1942	0.0058	0.0300	0.0004	0.0090	0.0003	44	42	180	5	190	2	181	6	94.74
36	0.0719	0.0015	1.5760	0.0574	0.1581	0.0032	0.0456	0.0018	983	40	961	23	946	18	902	34	101.59
37	0.0499	0.0022	0.1775	0.0099	0.0258	0.0004	0.0082	0.0007	189	94	166	9	164	2	164	14	101.22
40	0.0763	0.0026	1.8008	0.0867	0.1711	0.0027	0.0514	0.0007	1104	66	1046	31	1018	15	1014	13	108.45

边部弱分带/亮白色, Th/U 比值普遍低于 0.1, 并且具有低 REE 含量, 这些证据均指示其为变质成因^[29-33]。对边部变质增生区域的定年结果集中分布在 (191.84±0.84) Ma, 其谐和图与加权平均年龄高度一致 (图 5 (d-e)), 此年龄被解释为本研究样品所经历主期变质作用的时间。

3.4 相平衡模拟和变质作用 P - T 条件

基于样品全岩成分, 通过相平衡模拟构建了

其 P - T 视剖面图 (图 6 (a))。视剖面图中投绘了根据实际矿物成分 (白云母和石榴子石的 XMg 等值线) 计算得到的温压计约束。模拟结果显示, 薄片观察到的矿物组合 (石榴子石 + 白云母 + 黑云母 + 石英 + 斜长石) 稳定在一个相对狭窄的 P - T 区间如图 6 (b) 红色框中稳定域所示。综合矿物成分等值线交汇区域 (图 6 (b)), 可以进一步限定本次变质事件的峰期条件约为 589.5 °C 和

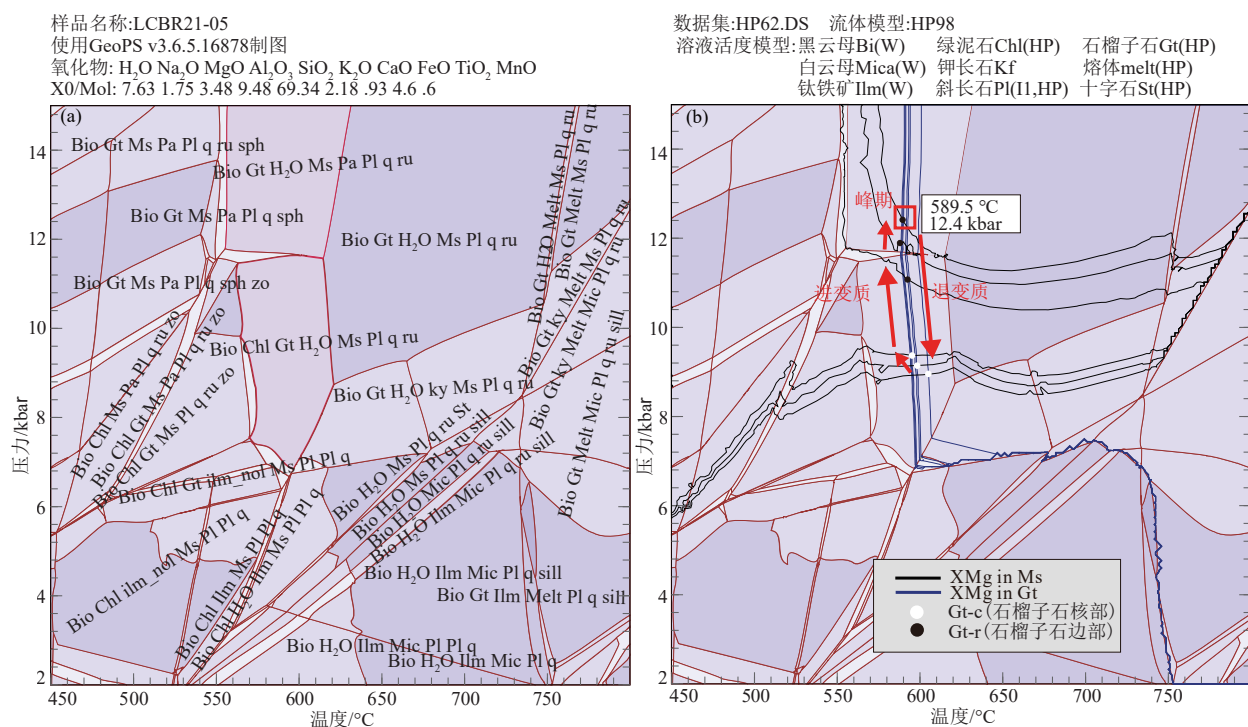


Fig. 6 P - T path and stability fields and P - T trajectory diagram of garnet mica schist

12.4 kbar。其中,石榴子石的6条XMg等值线由左到右的数值依次为: 0.121, 0.122, 0.123, 0.127, 0.129和0.144; 白云母的6条XMg等值线由下到上的数值依次为: 0.51, 0.52, 0.53, 0.59和0.62。模拟揭示顺时针 P - T 轨迹(图6(b)箭头所示), 表现为在压力从约8 kbar显著增加至约12 kbar的过程中, 温度仅小幅变化, 指示近等温增压过程。

4 讨论

4.1 原岩性质与构造背景

全岩地球化学分析结果表明, 样品LCBR21-05具有高 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (20.29)、高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (1.90) 比值及高 Al_2O_3 (15.52%) 含量, 这些特征与被动大陆边缘或碰撞造山带典型的泥质沉积岩地球化学组成高度一致^[34]。样品强烈富集LREE和LILE (如Rb、Ba), 明显亏损HFSE (如Nb、Ta、Ti), 且具有显著的Eu负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.21$) (图4)。这些特征共同指示其原岩为成熟度较高的陆源泥质沉积岩, 其物源主要来自上地壳物质^[25]。显著的Eu负异常通常归因于源区存在斜长石残留或沉积/变质过程中发生了以斜长石分离为特征的熔体抽取作用^[35], 这与碰撞造山背景下地壳深熔作用的过程相符。此外, 样品的Th/Yb (7.44) 和Nb/Yb

(6.76) 比值落在典型大陆碰撞环境范围内^[27]。因此, 综合地球化学特征表明, 该石榴子石云母片岩的原岩形成于南、北拉萨地体碰撞相关的构造背景, 其原岩记录了碰撞造山过程中地壳物质的沉积再循环与变质改造。

4.2 变质时间与P-T演化轨迹

锆石U-Pb定年结果显示, 样品中变质成因锆石边部给出了约192 Ma的加权平均年龄(图5(d-e)), 这为巴松措地区存在早侏罗世变质事件提供了直接证据。该年龄略晚于Weller等^[12]在南侧巴松措杂岩带报道的峰期变质时代(204~201 Ma), 但与北侧扎拉杂岩带报道的变质时代(198~192 Ma)在误差范围内完全重叠。这一发现将巴松措杂岩带内与碰撞相关的热事件记录明确延续至约192 Ma, 表明南、北拉萨地体碰撞后的构造热活动并非仅限于204~201 Ma, 而是持续到了早侏罗世早期。

相平衡模拟成功限定了本次变质事件的峰期条件为约589.5 °C和12.4 kbar, 并揭示了一条具有顺时针演化特征的 P - T 轨迹(图6(b))。该轨迹表现为压力显著增加(从约8 kbar至12.4 kbar)的同时, 温度仅小幅变化, 指示了一个近等温的快速埋藏(增压)过程。石榴子石的成分环带为此提供了独立的矿物学佐证: 从核部到边部, 钙

石榴石 (Grs) 组分显著增加, 而镁铝榴石 (Prp) 组分轻微降低 (图3, 表1)。这种成分变化正是进变质过程中压力迅速升高主导、升温相对滞后的典型响应, 符合 Barrovian 型变质作用中与地壳增厚相关的石榴子石生长模式^[36-38]。 P - T 轨迹的顺时针形态及峰期高压特征, 共同揭示了变质作用发生在碰撞导致的构造负载与地壳持续增厚的动力学背景之下^[39]。近等温增压 (约8→12.4 kbar) 与石榴子石边部 Grs 升高 (约5%→9.7%) 耦合, 反映构造埋藏速率 > 热松弛速率。同时, 值得讨论的是在本次相平衡模拟过程中, 采用 Holland 和 Powell^[20] 的热力学数据库及相应的矿物活度-成分 (a - X) 模型未专门考虑 Mn 的影响。本研究样品中锰铝榴石 (Sps) 组分含量极低 (<1%), 且全岩 MnO 含量仅为 0.07%, 属于 White 等^[21] 定义的“大多数泥质岩中实测含量”的低范围 (0.1~0.3%)。根据 White 等^[21] 对含 Mn 泥质岩的系统研究, 在本文的 Mn 含量水平下, Mn 的主要作用是扩大石榴子石的稳定域, 但对其他常见泥质矿物 (如白云母、黑云母) 的稳定性影响很小, 含 Mn 体系计算出的相图与不含 Mn 体系高度相似; 即使考虑 Mn, 石榴子石在大部分 P - T 范围内的模式含量仍小于 1%, 对于相平衡计算的整体影响可以忽略。因此, 本研究样品极低的 Mn 含量对于最终 P - T 条件的约束不产生实质性影响。

值得注意的是, 本研究所获峰期压力 (12.4 kbar) 高于 Zhang 等^[6] 在该区域报道的早期 (约 204~201 Ma) Barrovian 型变质作用的峰期压力 (约 9 kbar), 而温度 (589.5 °C) 则相对更低。这一“更高压、更低温”的特征, 可能指示在约 192 Ma 时期, 研究区地壳经历了进一步的垂向加厚 (埋深增大), 但地温梯度尚未因深部热松弛而同步升高, 从而记录了碰撞造山过程持续进行、热松弛相对滞后的瞬态热状态, 即本研究的 192 Ma 事件压力更高 (12.4 kbar) 但温度相当 (约 590 °C), 指示同期地壳垂向增厚而非热抬升。

综上, 锆石年代学 (约 192 Ma) 与相平衡模拟 (顺时针) P - T 轨迹共同约束了碰撞后持续增厚的时间-温压框架。

4.3 区域构造意义

本研究在巴松措杂岩带内识别出的约 192 Ma 高压变质事件, 对厘清南、北拉萨地体碰撞后的构造演化具有重要启示。关于巴松措地区两条早

中生代变质带的关系, 前人存在不同认识: 一种观点认为它们分别代表了碰撞后不同构造层次、不同时期的响应, 即巴松措杂岩带记录较早的 M1 事件 (204~201 Ma), 扎拉杂岩带记录较晚的 M2 事件 (198~192 Ma)^[12]; 另一种观点则认为二者可能属于同一持续变质热事件的产物^[40]。本研究获得的证据支持后一种观点。首先, 192 Ma 的变质年龄不仅存在于扎拉杂岩带, 也明确存在于巴松措杂岩带内部, 表明该时期的热事件具有区域性。其次, 该期变质作用表现出典型的与挤压增厚相关的 Barrovian 型 P - T 轨迹特征, 与早期 (204~201 Ma) 事件的动力学背景一致, 均为碰撞造山过程的延续。结合陈智佳^[40] 在扎拉杂岩带识别出的 201~190 Ma 变质年龄, 可以认为巴松措地区在约 204~190 Ma 期间普遍经历了一期持续的、与南、北拉萨地体碰撞后地壳持续增厚相关的区域变质作用^[41]。

因此, 本研究揭示的约 192 Ma 高压变质事件表明, 南、北拉萨地体的碰撞造山作用并非在初始拼贴 (204~201 Ma) 后即刻停止, 其导致的构造缩短与地壳增厚过程至少持续了十余个百万年, 直至早侏罗世早期。这一持续增厚过程是拉萨地体早期构造演化乃至青藏高原原特提斯构造体制终结阶段的重要组成部分, 本研究为其提供了关键的温压-年代学约束。

5 结 论

(1) 变质时代: 锆石 U-Pb 定年结果显示, 样品中变质成因锆石的年龄为约 192 Ma, 精确厘定了巴松措杂岩带内存在一期早侏罗世变质事件。该年龄将南、北拉萨地体碰撞后该区域与碰撞相关的构造热事件记录明确延续至 192 Ma。

(2) 变质条件与过程: 相平衡模拟定量限定本次变质作用的峰期温压条件为 589.5 °C/12.4 kbar。模拟揭示的顺时针 P - T 轨迹, 结合石榴子石成分环带特征, 共同指示了一个以近等温增压为特征的快速构造埋藏过程, 具有典型的 Barrovian 型变质作用属性, 反映了碰撞造山过程中地壳增厚与热松弛滞后的耦合动力学响应。

(3) 构造意义: 本研究峰期变质压力 (12.4 kbar) 高于已报道的约 204~201 Ma 的同类变质作用压力 (约 9 kbar), 而温度相对更低。指示南、北拉萨地体碰撞后地壳持续垂向增厚 (而

非热松弛抬升)。支持巴松措地区在 204 ~ 190 Ma 期间经历持续地壳增厚变质事件, 表明碰撞造山作用持续 > 10 Ma, 为完善拉萨地体构造演化模型提供了新的约束。

参考文献:

- [1] ALLÈGRE C J. Cold Gondwana, warm Tethys and the Tibetan Lhasa Block[J]. *Nature*, 1984, 310: 165 – 166.
- [2] AUDLEY-CHARLES M G. Reconstruction of eastern Gondwanaland[J]. *Nature*, 1983, 306: 48 – 50.
- [3] SENGOR A C. Tectonics of the tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1987, 15: 213 – 244.
- [4] KAPP P, AN Y, MANNING C E, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 19 – 22.
- [5] ZHU D C, ZHAO Z D, NIU Y L, et al. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(1/2): 241 – 255.
- [6] ZHANG Z M, DONG X, SANTOSH M, et al. Metamorphism and tectonic evolution of the Lhasa terrane, Central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 170 – 189.
- [7] 刘德民, 王杰, 姜淮, 等. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 154 – 169.
- [8] 李子颖, 郭强, 秦明宽, 等. 青藏高原碰撞隆升与中国西北及中亚邻区砂岩铀成矿作用[J]. *矿床地质*, 2024, 43(6): 1336 – 1359.
- [9] 余长胜. 拉萨地体的起源及演化——来自前寒武纪基底的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [10] YANG J S, XU Z Q, LI Z L, et al. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo-Tethys?[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(1): 76 – 89.
- [11] 王向伟, 张保涛, 杨浩强, 等. 青海省海晏县团宝山一带变质岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. *现代地质*, 2023, 37(3): 586 – 598.
- [12] WELLER O M, STONGE M R, SEARLE M P, et al. Quantifying the P–T–t conditions of north–south Lhasa terrane accretion: New insight into the pre-Himalayan architecture of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2015, 33(1): 91 – 113.
- [13] 毕先梅, 莫宣学, 刘艳宾. 西藏南部极低级变质岩及其地质与资源意义[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 201 – 210.
- [14] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211 – 280.
- [15] LIN Y H, ZHANG Z M, DONG X, et al. Early Mesozoic metamorphism and tectonic significance of the eastern segment of the Lhasa terrane, south Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 78: 160 – 183.
- [16] GUYNN J, KAPP P, GEHRELS G E, et al. U–Pb geochronology of basement rocks in central Tibet and paleogeographic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 43(1): 23 – 50.
- [17] SHI R D, YANG J S, XU Z Q, et al. The Bangong Lake ophiolite (NW Tibet) and its bearing on the tectonic evolution of the Bangong–Nujiang suture zone[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(5/6): 438 – 457.
- [18] 李方兰, 刘学龙, 周云满, 等. 滇西保山地块陡崖铁铜多金属矿床石榴子石年代学及其地球化学特征[J]. *地学前缘*, 2024, 31(3): 113 – 132.
- [19] 王晓彤, 刘军, 杨艳, 等. 新疆北部喇嘛苏铜矿床成矿时代与构造背景: 来自石榴子石原位 LA–ICP–MS U–Pb 测年的证据[J]. *现代地质*, 2023, 37(3): 645 – 661.
- [20] HOLLAND T J B, POWELL R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29(3): 333 – 383.
- [21] WHITE R W, POWELL R, JOHNSON T E. The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New a–x relations for manganese-bearing minerals[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2014, 32(8): 809 – 828.
- [22] HOLLAND T, POWELL R. Activity–composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145(4): 492 – 501.
- [23] WALDBAUM D R, THOMPSON J B Jr. Mixing properties of sanidine crystalline solutions: II. Calculations based on volume data I[J]. *American Mineralogist*, 1968, 53(11/12): 2000 – 2017.
- [24] HOLLAND T J B, POWELL R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16(3): 309 – 343.
- [25] 林彦嵩, 张泽明, 董昕. 拉萨地体东南缘始新世早期变质作用及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 1962 – 1976.
- [26] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223 – 253.
- [27] PEARCE J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100(1/2/3/4): 14 – 48.
- [28] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313 – 345.
- [29] 杨伟, 邱亮, 木红旭, 等. 西准噶尔谢米斯台辉绿岩锆石 U–Pb 年代学及其构造意义[J]. *现代地质*, 2025, 39(6): 1461 – 1482.
- [30] 张乐民, 张聚全, 吴晓贺, 等. 太行山南段洪山碱性火山–侵入杂岩成因与构造意义: 锆石 U–Pb 年代学和地球化学的约束[J]. *现代地质*, 2025, 39(3): 752 – 773.
- [31] 胡子奇, 张德贤, 刘磊. 束斑直径和能量密度对锆石 U–Pb 定年准确度的影响研究[J]. *现代地质*, 2023, 37(3): 722 – 732.

- [32] 黄宇, 钟世华, 李三忠, 等. 副矿物包裹体和信号采集时间对锆石 U-Pb 年龄和微量元素分析结果的影响[J]. 地学前缘, 2025, 32(1): 388 – 400.
- [33] 刘晓惠, 刘一珉, 丁林, 等. 中拉萨地体当惹雍措锆石微量元素特征及其对地壳厚度演化的指示[J]. 地学前缘, 2025, 32(1): 343 – 366.
- [34] TAYLOR S, MCLENNAN S. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [35] RUDNICK R L, GAO S. 3. 01-Composition of the Continental Crust [M/OL] // Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. Oxford: Pergamon, 2003, 3: 1–64 [2025–05–18]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080437516030164>.
- [36] SPEAR F. Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths [M]. Washington, D. C.: Mineralogical Society of America, 1993.
- [37] 夏琼霞, 郑永飞. 高压–超高压变质岩石中石榴石的环带和成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 433 – 450.
- [38] 杨建军. 榴辉岩石榴子石反应边的震击成因初探[J]. 地学前缘, 2025, 32(6): 276 – 285.
- [39] ENGLAND P C, THOMPSON A B. Pressure: Temperature: Time paths of regional metamorphism I. heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 894 – 928.
- [40] 陈智佳. 青藏高原拉萨地体东部早中生代变质作用与构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [41] 张艳斌, 翟明国, 周艳艳, 等. 大陆下地壳[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 28 – 45.