

榍石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法的评估及其对中喜马拉雅退变榴辉岩变质及深熔时代的限定

王淑真, 张贵宾, 刘帅奇, 熊璐, 李楠, 刘泽宇

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

摘要: 榍石 U-Pb 年代学是目前研究变质演化、部分熔融等过程的重要手段。本文利用 ThermoFisher Scientific iCapRQ 激光剥蚀四级杆等离子体质谱仪, 配套 GeoLas HD 193 nm 准分子激光剥蚀系统, 评估了榍石 U-Pb 定年方法。通过评估剥蚀束斑、激光能量以及剥蚀频率对于榍石 U-Pb 体系分馏的影响, 确定了适合本实验室的最佳仪器条件为 $5\sim 8\text{ J/cm}^2$ 、 $5\sim 8\text{ Hz}$ 、 $44\text{ }\mu\text{m}$, 并且准确测定了 3 种榍石国际标样年龄 (BLR-1: $1\,047\pm 6\text{ Ma}$; Ontario: $1\,055\pm 6\text{ Ma}$; Pakistan: $21.0\pm 0.6\text{ Ma}$)。另外采用该系统对中喜马拉雅退变榴辉岩中榍石进行了 U-Pb 定年和微量元素分析。中喜马拉雅榴辉岩及深熔浅色体中的榍石可划分为两种类型, 基质榴辉岩中为典型的变质榍石, 而浅色体中的榍石为转熔成因榍石。中喜马拉雅退变榴辉岩变质榍石具有低含量的 Nb、Ta 和 Y 但高的 Nb/Ta 值, 3 组变质榍石的 U-Pb 年龄分别为 14.1 ± 1.6 、 14.2 ± 0.4 和 $15.3\pm 2.5\text{ Ma}$ 。榴辉岩中变质榍石通常以退变产物的形式出现, 记录了变质冷却时代, 结合榍石的 Zr 温度计 ($700\sim 850^\circ\text{C}$), 本研究认为在 $15\sim 14\text{ Ma}$ 中喜马拉雅榴辉岩已经退变至麻粒岩相-高角闪岩相。而转熔榍石中包含有熔体包裹体, 并且其相对于变质榍石具有高含量的 Th、Nb、Ta 和 REE 和 Th/U 值但低的 Nb/Ta 值, U-Pb 年龄为 $12.1\pm 1.7\text{ Ma}$, 与浅色体锆石边部的年龄结果 ($13.5\pm 0.9\text{ Ma}$) 一致, 但明显晚于幔部变质锆石, 指示中喜马拉雅榴辉岩在折返阶段发生了减压熔融。两种不同类型的榍石 U-Pb 定年结果和微量元素特征限定了中喜马拉雅榴辉岩 $15\sim 14\text{ Ma}$ 的麻粒岩相-高角闪岩相退变质时间和折返过程中约 12 Ma 的深熔时代。

关键词: 变质榍石; 转熔榍石; U-Pb 定年; 榴辉岩; 中喜马拉雅

中图分类号: P578.94⁺9; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)03-0587-24

Evaluation of in situ U-Pb dating method of titanite by LA-ICP-MS and its constraints on the metamorphic and anatectic ages of retrograded eclogites from the central Himalaya

WANG Shu-zhen, ZHANG Gui-bin, LIU Shuai-qi, XIONG Lu, LI Nan and LIU Ze-yu

(Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Titanite U-Pb dating is a significant way to investigate the geological processes such as metamorphism and partial melting. Here, we evaluate in situ titanite U-Pb dating method based on three well-known titanite standards (BLR-1, Ontario, Pakistan), using ThermoFisher Scientific iCapRQ quadrupole-inductively coupled plasma-mass spectrometer (Q-ICP-MS) coupled with 193 nm ArF excimer GeoLas HD laser-ablation system. After evaluating

收稿日期: 2024-04-29; 接受日期: 2025-01-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372061, 91755206, 41972056, 41622202)

作者简介: 王淑真 (1997-), 女, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: 1801110599@pku.edu.cn; 通讯作者: 张贵宾 (1979-), 男, 副教授, 变质岩和同位素地球化学方向, E-mail: gbzhang@pku.edu.cn。

网络首发时间: 2025-02-01; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20250221.1542.002.html>

the influence of beam diameters, laser energy, and repetition rates on the U-Pb isotopic fractionation, the optimal instrumental conditions were confirmed at $5\sim 8\text{ J/cm}^2$, $5\sim 8\text{ Hz}$, $44\text{ }\mu\text{m}$. Besides, the titanite standards were accurately determined with ages of $1\,047\pm 6\text{ Ma}$ for BLR-1, $1\,055\pm 6\text{ Ma}$ for Ontario, $21.0\pm 0.6\text{ Ma}$ for Pakistan. Further, we chose the granulitized eclogite and its partial melts from the central Himalaya for titanite U-Pb dating. Two types of titanite were recognized from the Himalayan granulitized eclogite and its partial melts, metamorphic type in eclogite and peritectic type in the leucosome. The metamorphic titanites in granulitized eclogites are characterized with lower Nb, Ta, Y but higher Nb/Ta. The U-Pb ages for three sets of metamorphic titanites are 14.1 ± 1.6 , 14.2 ± 0.4 and $15.3\pm 2.5\text{ Ma}$. However, titanite commonly appears as the retrograded product and records the cooling age in eclogite, hence this study insists that granulitized eclogite from the central Himalaya has retrograded into granulite facies to high amphibolite facies at $15\sim 14\text{ Ma}$, combined with the Zr thermometer ($700\sim 850^\circ\text{C}$) of the titanite. The peritectic titanites with melt inclusions occurred are characterized with higher Th, Nb, Ta, REE and Th/U ratio but lower Nb/Ta ratio than the metamorphic type. Forty laser analyses for the peritectic titanite yield intercept ages of $12.1\pm 1.7\text{ Ma}$, consistent with the zircon rims ($13.5\pm 0.9\text{ Ma}$) from the leucosome, but much younger than the zircon mantle ($17.3\pm 3.2\text{ Ma}$), these results indicate eclogite from the central Himalaya has undergone decompression melting during the middle Miocene. Two different types of titanite U-Pb dating limit the retrograde metamorphism time of granulite facies to high amphibolite facies at $15\sim 14\text{ Ma}$ and the partial melting age at about 12 Ma during the exhumation process.

Key words: metamorphic titanite; peritectic titanite; U-Pb dating; eclogite; the central Himalaya

Fund support: National Natural Science Foundation of China(42372061, 91755206, 41972056, 41622202)

榍石(CaTiSiO_5)是中高级变质岩、钙碱性岩浆岩中常见的副矿物,具有高的 U、Th 含量和 U-Pb 封闭温度,是一种重要的定年矿物(Kohn, 2017; Walters *et al.*, 2022)。另外,榍石高的 Nb、Ta、Sr、Y 和 REE 微量元素特征及其 Sm-Nd 同位素组成,在示踪岩浆和变质过程中具有重要的应用前景(Hammerli *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2021)。按照成因类型,榍石可划分为岩浆型、变质型、转熔型、重熔型以及热液型。岩浆型榍石一般出现在岩浆演化晚期,其结晶习性很大程度受控于岩浆体系的氧逸度(f_{O_2})和水活度($f_{\text{H}_2\text{O}}$),低温、高 $f_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 f_{O_2} 的条件更有利于榍石结晶,而反之则会抑制榍石形成,促进钛铁矿结晶(Kohn, 2017)。在岩浆体系中,榍石是 REE 等元素的重要载体矿物,实验岩石学研究表明, MREE (Gd、Eu、Sm) 相比于 HREE (Dy、Y、Lu、Er、Yb) 和 LREE (La、Ce、Pr、Nd) 更倾向于进入榍石当中,并且随着岩浆演化,榍石中轻-中-重稀土元素的分馏现象会愈加明显(Green & Pearson, 1986; Tiepolo *et al.*, 2002; Prowatke & Klemme, 2005)。

在变质岩中,榍石的稳定域取决于变质温压条件、原岩成分和体系的 H_2O 含量,一般情况下,榍石主要稳定存在于中低温、中低压以及高 $f_{\text{H}_2\text{O}}$ 条件下,

并且其稳定的温压范围随着体系 CaO 和 TiO_2 活度的升高而增大。在变基性岩或者钙质硅酸岩中,常可见榍石围绕着早期金红石的边缘生长,指示了退变质升温或降压过程(Lucassen *et al.*, 2010)。另外,榍石中 Zr 含量可以有效指示变质温度,但该温度计很大程度受控于变质压力和体系 TiO_2 活度(Hayden *et al.*, 2008)。Kapp 等(2009)基于榍石和金红石的转化反应($\text{An} + \text{Zr}/\text{Czo} + \text{Rt} + \text{Qz} = \text{An} + \text{Ttn} + \text{H}_2\text{O}$),提出了 TZARS 变质压力计,该压力计可以有效估计体系的变质压力条件,与榍石 Zr 温度计结合,可以恢复体系的变质温压条件。转熔型和重熔型榍石常见于高级变质岩(麻粒岩、混合岩)中,并且均伴随着深熔作用,转熔型榍石是在固相线以上经转熔反应形成,例如黑云母和角闪石经水致熔融可以形成转熔榍石(Weinberg & Hasalová, 2015; Wang *et al.*, 2021b; Zhou *et al.*, 2021)。而重熔型榍石则是从重熔熔体中结晶形成,与岩浆型榍石结晶环境不同,重熔熔体一般未与其深熔源区分离,并且演化程度低(Xia *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021b)。热液型榍石常见于夕卡岩型矿床中,其化学成分往往受控于成矿流体的性质。由于 LREE 在流体中易迁移,热液型榍石往往呈右倾型 REE 分布特征,并且具有高的 Eu/Eu^* 和 Ce/Ce^* 值(Song *et al.*, 2019;

Lei *et al.*, 2021)。

由于榍石在各类岩石中普遍存在,其 U-Pb 年代学研究也是探索岩浆形成、变质演化以及成矿时代等过程的有利工具。与锆石不同,榍石在流熔体中的活动性更强,因此往往可以记录后期变质冷却以及热改造事件的时间 (Aleinikoff *et al.*, 2002; Spencer *et al.*, 2013; Walters *et al.*, 2022)。在高级变质岩中,榍石往往呈现出多期次生长的特征,不同阶段生长的榍石可以很好地约束变质深熔时代,并且其地球化学特征也可以反映其形成的温压条件、矿物共生组合及变质流体性质 (Chen *et al.*, 2016; Walters *et al.*, 2022)。例如 Zhou 等 (2021) 在苏鲁造山带威海地区的混合岩中识别出 3 期生长的榍石,核部榍石为变质成因,幔部和边部榍石为转熔成因,3 期榍石均给出约 210 Ma 的年龄,但转熔型榍石较变质成因榍石具有高的 Th、REE 和 HFSE 含量以及 Th/U 值,指示了部分熔融过程中副矿物(如褐帘石)分解,并且从核到边,Al₂O₃ 和 F 含量逐渐升高,代表了一个减压熔融的构造环境。然而,榍石 U-Pb 定年的难点在于其常含有较高的非放射性成因铅,榍石中高的普通铅与放射性成因铅比值易造成测试年龄值不确定度明显偏高 (Walters *et al.*, 2022)。另外,不同类型的榍石的 U-Pb 体系往往不同,岩浆型榍石通常具有高的 U 含量(可达 $n \times 10^{-4}$)和低的普通铅,而变质榍石则具有较低的 U 含量(小于 100×10^{-6})和高的普通铅,因此变质成因榍石的年代学研究往往难度更大,并且对于揭示变质 *P-T-t* 演化轨迹具有重要意义 (Aleinikoff *et al.*, 2002)。

基于此,本文利用激光剥蚀四极杆等离子体质谱仪(LA-Q-ICP-MS),以 32 或 44 μm 束斑,评估了榍石 U-Pb 定年方法,确定了适合本实验室的最佳仪器条件。另外,我们选择了喜马拉雅造山带麻粒岩化榴辉岩及深熔浅色体中的两类榍石(变质榍石、转熔榍石)作为研究对象,以期了解榍石在变质深熔过程中的地球化学行为,并对喜马拉雅造山带的变质演化历史进行限定。

1 实验过程

1.1 样品准备与仪器调试

榍石 U-Pb 定年依托于北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化重点实验室的 ThermoFisher Scientific iCapRQ 四级杆等离子体质谱仪(LA-Q-

ICP-MS),配套激光型号为 GeoLas HD 193 nm 准分子激光剥蚀系统。实验过程中以 He 为载气,N₂ 用于增强测试过程中的灵敏度。在测试之前,先对四极杆质谱仪进行 Pulse/Analogy 校正,并用调谐液对仪器参数进行优化。另外,在激光剥蚀模式下,利用标准玻璃 NIST SRM 610 对仪器进行优化,确保其氧化物种产率(ThO⁺/Th⁺)小于 0.2 和同位素信号比值(²³⁸U/²³²Th)近似为 1。

本研究选择了 3 种国际榍石标样 BLR-1、Ontario 和 Pakistan 进行榍石 U-Pb 定年方法建立。BLR-1 是目前应用最为广泛的榍石定年校正标样,产于加拿大安大略省的 Bear Lake 矿区 (Ma *et al.*, 2019), U、Th、Pb 的平均含量为 $(334 \pm 20) \times 10^{-6}$ 、 $(219 \pm 15) \times 10^{-6}$ 以及 $(67 \pm 3) \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.65 ± 0.01 。ID-TIMS 测试结果给出 BLR-1 榍石标样 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄为 $1\,047.1 \pm 0.4$ Ma,而 LA-ICP-MS 多次测试给出 BLR-1 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄为 $1\,046 \pm 5$ Ma (Sun *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2019)。

Ontario 榍石标样与 BLR-1 的产地一致,均来源于加拿大安大略省, U、Th、Pb 的平均含量为 $(267 \pm 25) \times 10^{-6}$ 、 $(179 \pm 19) \times 10^{-6}$ 以及 $(55 \pm 6) \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.67 ± 0.03 。Sun 等 (2012) 利用 LA-ICP-MS 测试得到 Ontario 榍石标样 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄为 $1\,056 \pm 5$ Ma,而 Spencer 等 (2013) 基于 ID-TIMS 分析得到其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄为 $1\,053.3 \pm 3.1$ Ma。

Pakistan 榍石标样为浅绿色的宝石矿物,其 U、Th、Pb 的平均含量为 $(86 \pm 29) \times 10^{-6}$ 、 $(257 \pm 59) \times 10^{-6}$ 以及 $(0.49 \pm 0.16) \times 10^{-6}$, Th/U 值为 3.1 ± 1.1 。Ma 等 (2019) 利用 LA-ICP-MS 给出其下交点年龄和 ²⁰⁷Pb 校正的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 平均年龄分别为 21.5 ± 0.4 Ma 和 21.4 ± 0.4 Ma。

1.2 仪器测量条件及分析方法

榍石 U-Pb 定年分析之前,先对锆石标样 91500、GJ-1 以及 PLE 和玻璃标样 NIST SRM 610 及 NIST SRM 612 进行了年代学及微量元素分析,监控仪器状态。锆石和榍石 U-Pb 分析检测了 ²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和 ²³⁸U 这 7 种同位素,其中 ²³⁸U、²⁰²Hg、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb 的驻留时间为 20 ms, ²³²Th 分析检测时间为 10 ms,而 ²⁰⁷Pb 为 30 ms。LA-ICP-MS 激光剥蚀系统采用单点分析,其中预剥蚀时间为 1 s,背景采集时间为 30 s,样品测试时间为 50 s,每 5 到 10 个样品之间插入一组标样。对 91500、GJ-1 以及 Plešovice (以下图文中简称 PLE) 这 3 种锆石标样进

行年代学分析,获得其谐和年龄分别为 $1\,062\pm 4\text{ Ma}$ ($n=13$, $\text{MSWD}=0.52$)、 $603\pm 2\text{ Ma}$ ($n=14$, $\text{MSWD}=1.16$)和 $335\pm 1\text{ Ma}$ ($n=22$, $\text{MSWD}=3.4$),与参考年龄基本一致(图 1)(Wiedenbeck *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 2004; Sláma *et al.*, 2008)。另外,以 NIST SRM 610 做内标,分析得到 NIST SRM 612 的元

素含量与参考值近乎一致,大多数元素的不确定度小于 5 %。因此,在保证仪器稳定的前提下,紧接着我们探讨了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的最佳仪器条件。年代学和微量元素数据处理采用 Iolite 软件进行(Paton *et al.*, 2011),年龄计算则通过 Isoplot 4.15 完成(Ludwig, 2012)。

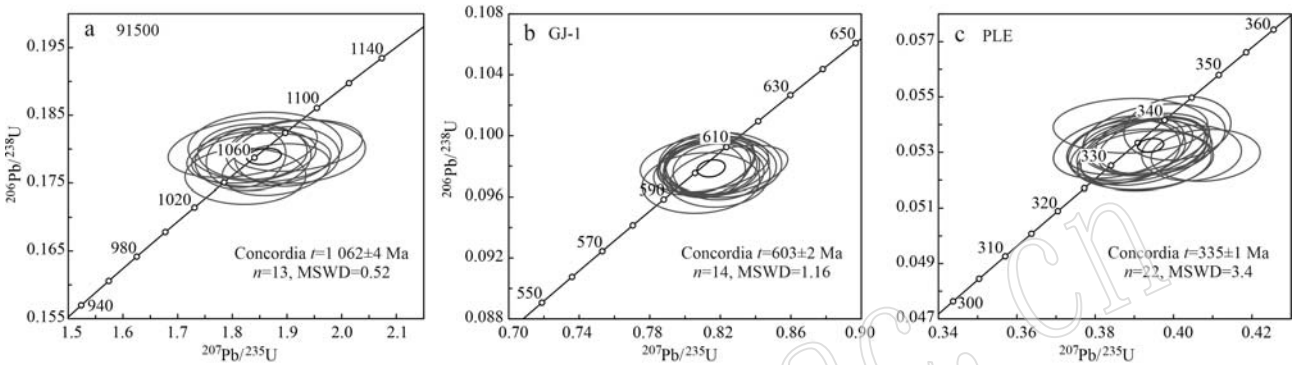


图 1 锆石标样 91500、GJ-1 以及 PLE 年代学分析结果

Fig. 1 U-Pb concordia diagrams of analyses for three zircon reference materials

为探究不同的激光能量密度、剥蚀频率、束斑直径对于锆石 U-Pb 定年分析的影响,在固定束斑为 32 和 44 μm 、频率为 5 Hz 下,我们采用了 5 组不同的激光条件(3、5、8、10 和 13 J/cm^2)来探讨激光能量对于锆石 U-Pb 体系分馏的影响。另外在激光能量密度固定为 8 J/cm^2 以及束斑直径为 32 和 44 μm 下,探究了 3、5、8 以及 10 Hz 下的不同剥蚀频率对于锆石 U-Pb 定年体系的影响。除此以外,为了解基体匹配效应对于锆石定年的影响,在测试 BLR-1、Ontario 和 Pakistan 锆石标样的前提下,同时分析了不同仪器条件下锆石标样 91500 和 GJ-1 的 U-Pb 年龄。各个平行实验参数设定如表 1 所示。

2 实验结果

2.1 锆石 U-Pb 定年影响因素分析

年龄测试过程中 U-Pb 体系元素分馏效应是影响 LA-ICP-MS 定年准确度和精确度的一个主要因素,由于 Pb 和 U 两种元素的活动性不同,Pb 相对于 U 更易于挥发,在激光剥蚀和传输过程中可能造成显著的 U-Pb 同位素分馏效应(胡欢等, 2020)。对比不同能量密度、剥蚀频率以及束斑直径对于 U-Pb

表 1 不同激光剥蚀条件下锆石标样 BLR-1 和 Ontario 的 U-Pb 元素分馏指数

Table 1 Titanite standards BLR-1 and Ontario U-Pb element fractional index for different laser ablation conditions

束斑直径 / μm	剥蚀频率 /Hz	能量密度 / $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	元素分馏指数 FI/%	
			BLR-1	Ontario
32	5	3	10.9	10
		5	7.7	8.7
		8	8.7	8.3
		10	9.4	11.3
		13	8.5	8.1
44	5	3	10.5	10.2
		5	9.3	9.2
		8	8.8	9.2
		10	9.2	8.8
		13	9	7.3
32	5	3	12.7	12.3
		5	6.3	7.2
		8	5.7	5.5
		10	8.8	10.4
44	5	3	14.8	11.8
		5	9.3	9.2
		8	8.3	7.6
		10	9	8.6

体系分馏的影响,我们发现榍石标样 BLR-1 和 Ontario 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值随激光剥蚀能量密度的升高而增大(图 2a、2b,图 3a、3b),而在剥蚀时间区间内,元素分馏指数 $[\text{FI} = (\text{Ratio}_2/\text{Ratio}_1 - 1) \times 100\%$,其中 Ratio_1 为剥蚀积分时间区间内前 1/2 的同位素比值,而 Ratio_2 为后半段剥蚀积分区间内的同位素比值]在 5~8 J/cm² 内最小。另外随着束斑增大, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值随着剥蚀时间更趋于稳定(图 2、图 3)。不同剥

蚀频率对于榍石 U-Pb 体系的影响不同,固定能量为 5 J/cm² 时,U-Pb 元素分馏效应在 5 Hz 时最小,而在 3 Hz 和 10 Hz 时更大(图 2c、2d,图 3c、3d)。因此,综合能量密度、激光剥蚀频率以及束斑大小,我们确定本实验室 LA-ICP-MS 榍石定年的最佳分析测试条件为 5~8 J/cm²、5~8 Hz、44 μm 。该仪器条件与实验室锆石分析测试条件类似,基于此条件我们对榍石标样和未知样品进行了榍石 U-Pb 定年。

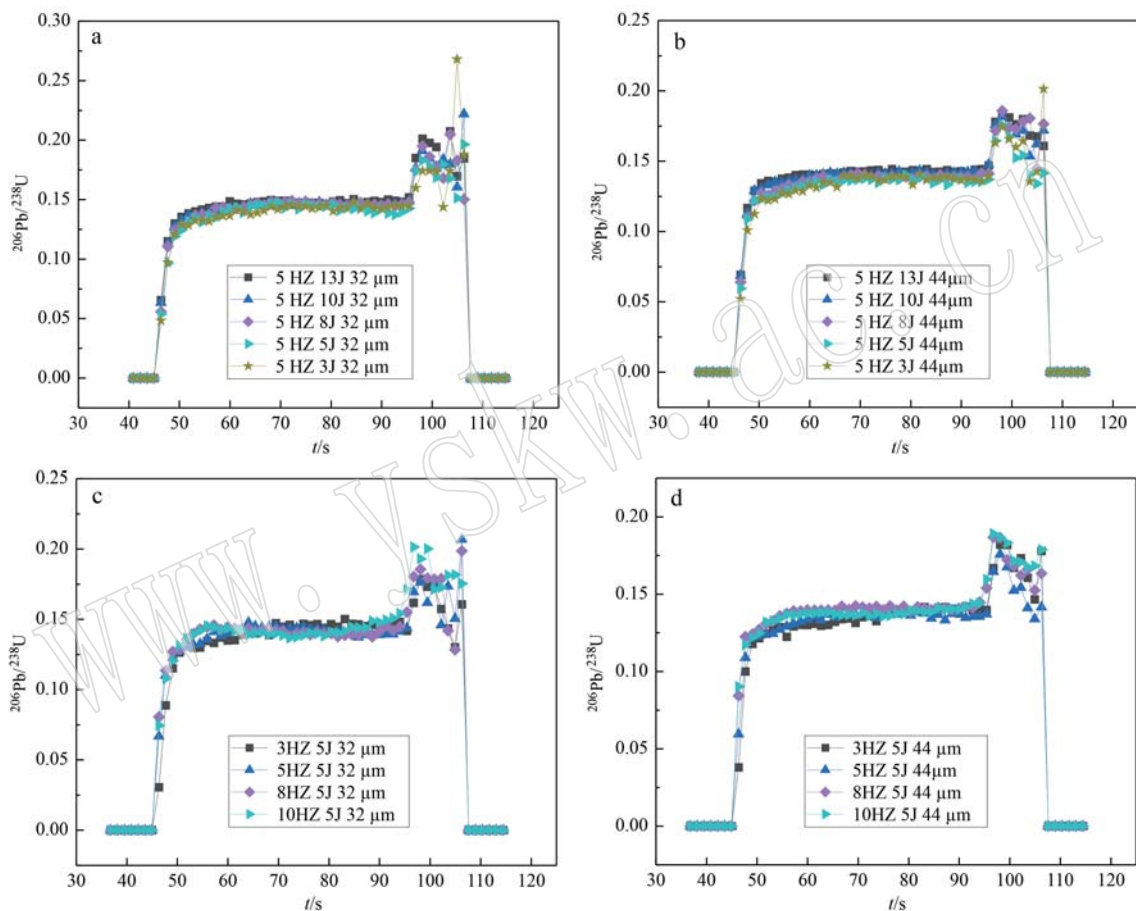


图 2 不同激光能量、剥蚀频率和束斑大小条件下榍石标样 BLR-1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 分馏行为

Fig. 2 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ fractionation of titanite standard BLR-1 under different laser energy, repetition rates and beam diameters

2.2 基体效应

基体不匹配问题一直是定年工作开展的一个难题,由于榍石国际标样稀缺,前人有关榍石定年的研究中往往采用锆石作为定年的外部标样。Sun 等(2012)利用单点分析模式和线扫描分析模式探讨了不同外部校正标样对于榍石定年的影响,结果表明以锆石作为外部校正标样,所获得的榍石标样的年龄结果相比其推荐值要低 130~120 Ma,并且 LA-ICP-MS 在单点分析和线扫描两种模式下均存在显著的基体

效应。本研究也对比了以锆石国际标样 91500 和榍石标样 BLR-1 作为榍石定年的外部校正标样,探讨其对于 LA-ICP-MS 定年的影响(图 4a、4b)。测试结果表明,当以锆石 91500 作为标样时,获得榍石标样 BLR-1 以及 Ontario 的年龄分别为 981 Ma 和 980 Ma,明显低于其推荐年龄(BLR-1: 1 047 Ma, Ontario: 1 050 Ma)(图 4c~4f),因此榍石和锆石之间存在显著的基体效应,并且该基体效应与能量密度、激光频率以及束斑大小等仪器参数无关。LA-ICP-MS 榍石定年必须

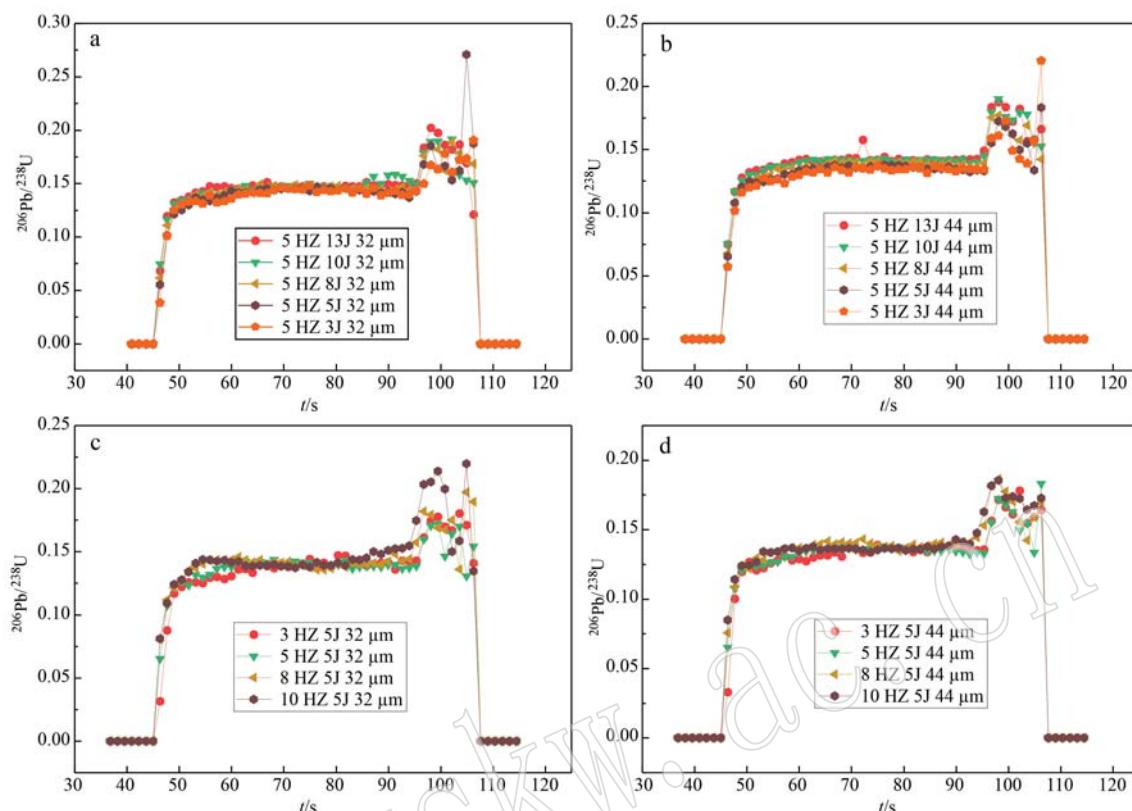


图3 不同激光能量、剥蚀频率和束斑大小条件下榍石标样 Ontario 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 分馏行为

Fig. 3 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ fractionation of titanite standard Ontario under different laser energy, repetition rates and beam diameters

采用与基体匹配的外部校正标样。

2.3 标样测试结果

对榍石标样 BLR-1 重复测量获得其谐和年龄为 $1\,047.6 \pm 6.0\text{ Ma}$ (2σ , $n=21$, $\text{MSWD}=0.001\,2$), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄 $1\,047.3 \pm 6.4\text{ Ma}$ (2σ , $n=21$, $\text{MSWD}=0.58$) (图 5a、5b)。以 BLR-1 为外标标样进行年龄校正, 得到 Ontario 的谐和年龄 $1\,054.6 \pm 6.0\text{ Ma}$ (2σ , $n=22$, $\text{MSWD}=5.7$) 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄 $1\,051.3 \pm 6.3\text{ Ma}$ (2σ , $n=22$, $\text{MSWD}=0.83$) (图 5c、5d)。该测试结果与 Spencer 等 (2013) 基于 ID-TIMS 分析得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄 $1\,053.3 \pm 3.1\text{ Ma}$ 和 Sun 等 (2012) 利用 LA-ICP-MS 测试得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄 $1\,056 \pm 5\text{ Ma}$ 在误差范围内一致。另外, 对 Pakistan 榍石标样测试获得下交点年龄为 $21.0 \pm 0.6\text{ Ma}$ (2σ , $n=17$, $\text{MSWD}=1.5$), 去掉 1 个普通铅过高的测试点, 得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 $21.7 \pm 0.5\text{ Ma}$ (2σ , $n=17$, $\text{MSWD}=1.5$) (图 5e、5f), 该结果与 Ma 等 (2019) 一致。榍石标样测试结果见表 2。

3 中喜马拉雅退变榴辉岩榍石年代学

榴辉岩是研究俯冲带深部变质的有力工具, 对于我们认识洋-陆俯冲、陆-陆汇聚等过程具有重要的大地构造意义。榍石是榴辉岩中常见的副矿物, 常形成于后期退变质过程, 因此榴辉岩中的榍石往往可以记录退变质的时限。基于此, 我们选择了中喜马拉雅麻粒岩化榴辉岩及深熔浅色体中的榍石样品作为研究对象。由于榍石标样 BLR-1 具有低的普通 Pb 含量和高的 Th、U 含量, 是目前常用的榍石定年外部校正标样, 我们选择 BLR-1 作为测试外标; 同时喜马拉雅变质时代较为年轻, 为监控榍石定年数据的准确性, 故选择榍石标样 Pakistan 作为监控标样。榍石定年及微量元素测试数据见表 3、表 4。

3.1 应用 1: 喜马拉雅变质榍石 U-Pb 定年限定退变榴辉岩的变质时代

喜马拉雅造山带是印度和欧亚大陆在始新世 (约 55 Ma) 早期碰撞的产物, 有关喜马拉雅造山带的

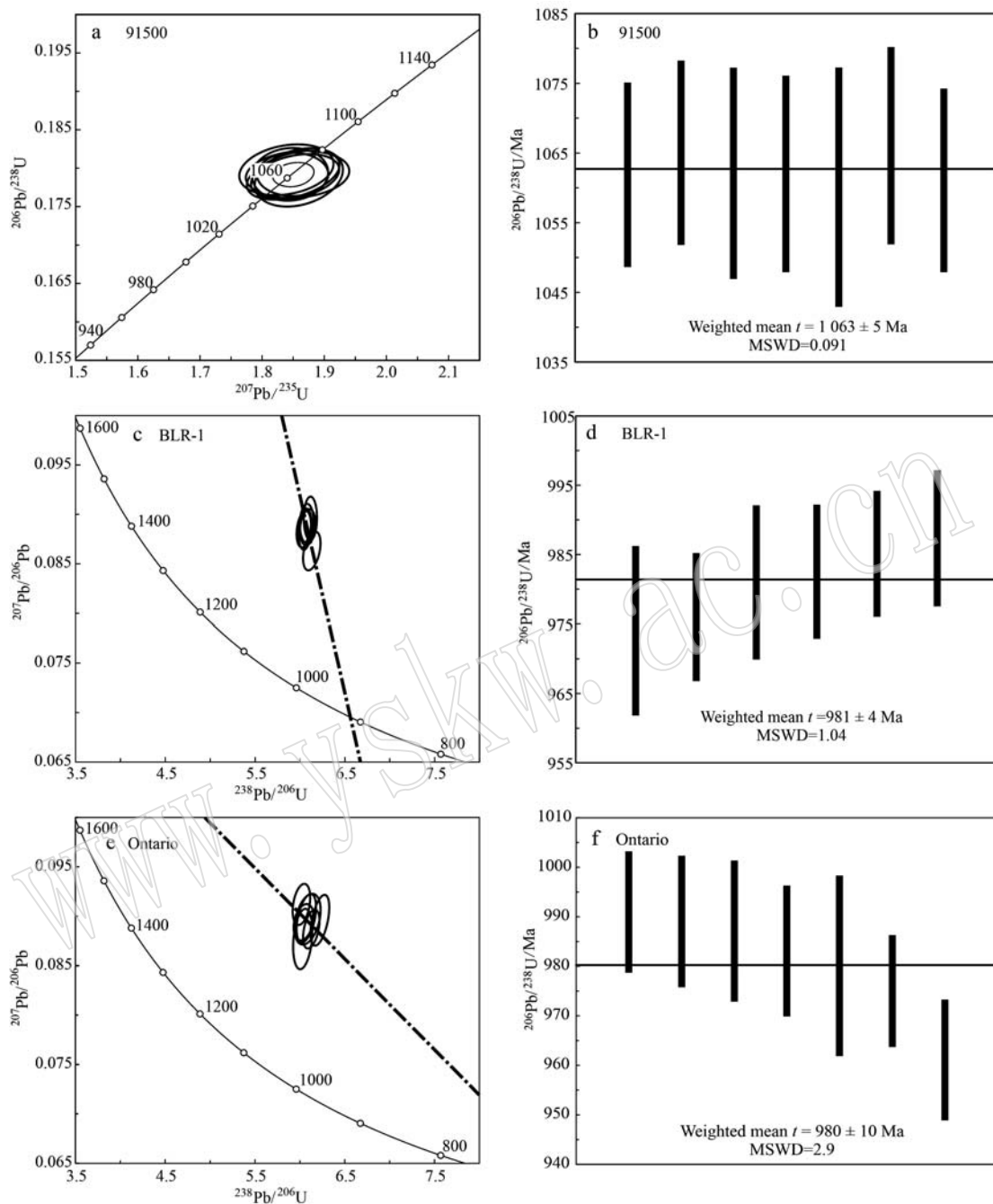


图4 非基体匹配 LA-ICP-Q-MS 榍石定年分析结果 (锆石 91500 做内标)

Fig. 4 Results of non matrix matched LA-ICP-Q-MS titanite dating analysis (zircon 91500 as internal standard)

榴辉岩目前主要出露在两个区域,一是位于西构造结巴基斯坦境内的 Kaghan valley、Tso Morari、Stak 以及 Naran 地区的高压-超高压榴辉岩 (Mukherjee and Sachan, 2001; Kaneko *et al.*, 2003; Donaldson *et al.*, 2013; Lanari *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2022), 而另一类型则是出露于中喜马拉雅 Ama Drime、尼泊尔东部 Arun Valley、锡金、不丹西北部以及藏南亚东地区的麻粒岩化榴辉岩 (Corrie *et al.*,

2010; Faak *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2021a; Wang *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022)。与西构造结超高压榴辉岩不同,中喜马拉雅榴辉岩在折返过程中普遍叠加了高温-超高温麻粒岩相变质作用,并触发了显著的部分熔融。目前关于中喜马拉雅榴辉岩的峰期榴辉岩相的变质时代争议较大,存在以下 4 种观点: 38~30 Ma (Kellett *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2021a)、约 23 Ma (Corrie *et al.*, 2010)、17 Ma

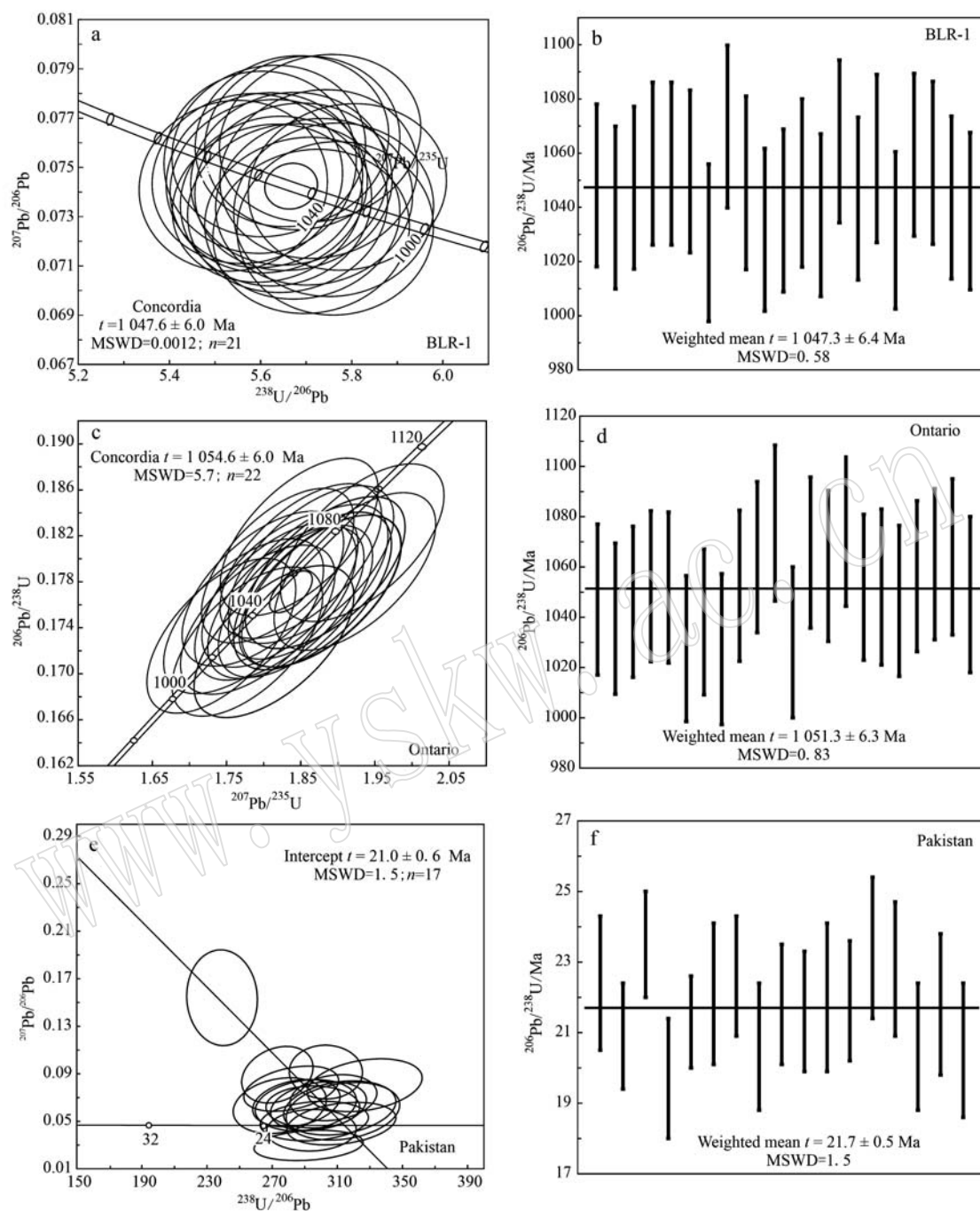


图5 LA-ICP-Q-MS 榍石标样 U-Pb 年龄分析结果

Fig. 5 LA-ICP-Q-MS titanite standards U-Pb ages

(Li *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2022) 和 15 ~ 14 Ma (Grujic *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017)。Dong 等 (2022) 和 Wang 等 (2021a) 分别对中喜马拉雅 Ama Drime 地区榴辉岩中的榍石进行了 U-Pb 定年, 分别给出了 15.4 ± 0.2 Ma 和 14.3 ± 0.8 Ma 的退变质年龄, 这也证明榴辉岩相的变质时代至少发生在 15 Ma 之前。

为厘定中喜马拉雅退变榴辉岩的变质时代, 我们对 Arun Valley 地区出露的退变榴辉岩 (NP-21、NP-24、NP-74) 中的榍石进行 U-Pb 年代学分析。Arun Valley 退变榴辉岩主要由石榴石、单斜辉石、角闪石、斜方辉石、长石、石英等矿物组成, 峰期绿辉石发生显著退变, 在基质中没有保留, 但辉石和斜长石后成合晶的矿物组合证实其早期经历了榴辉岩相变

表 2 榴石标样 BLR-1、Ontario 和 Pakistan 年龄测试结果

Table 2 Titanite U-Pb age data for standards BLR-1, Ontario and Pakistan

测点号	同位素比值								同位素年龄/Ma			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
BLR-1												
Z-BLR-1-1	1.815	0.044	0.176 6	0.002 8	5.663	0.088	0.074 7	0.001 6	1 056	16	1 048	15
Z-BLR-1-2	1.748	0.041	0.175 1	0.002 7	5.711	0.088	0.072 0	0.001 5	1 026	15	1 040	15
Z-BLR-1-3	1.850	0.043	0.176 4	0.002 7	5.669	0.087	0.075 8	0.001 6	1 063	16	1 047	15
Z-BLR-1-4	1.822	0.044	0.178 0	0.002 8	5.618	0.088	0.073 5	0.001 5	1 053	16	1 056	15
Z-BLR-1-5	1.857	0.044	0.178 0	0.002 8	5.618	0.087	0.075 3	0.001 6	1 068	17	1 056	15
Z-BLR-1-6	1.802	0.043	0.177 5	0.002 7	5.634	0.086	0.073 8	0.001 5	1 045	16	1 053	15
Z-BLR-1-7	1.767	0.041	0.172 7	0.002 7	5.790	0.089	0.073 8	0.001 5	1 033	15	1 027	15
Z-BLR-1-8	1.848	0.044	0.180 5	0.002 8	5.540	0.084	0.074 3	0.001 6	1 067	15	1 070	15
Z-BLR-1-9	1.804	0.042	0.176 3	0.002 8	5.672	0.088	0.074 5	0.001 5	1 047	15	1 049	16
Z-BLR-1-10	1.754	0.043	0.173 6	0.002 7	5.760	0.090	0.074 7	0.001 6	1 031	17	1 032	15
Z-BLR-1-11	1.775	0.042	0.174 9	0.002 7	5.718	0.088	0.075 1	0.001 5	1 036	15	1 039	15
Z-BLR-1-12	1.787	0.043	0.176 7	0.002 8	5.659	0.090	0.074 9	0.001 6	1 040	16	1 049	16
Z-BLR-1-13	1.799	0.042	0.174 6	0.002 7	5.727	0.089	0.075 9	0.001 5	1 045	16	1 037	15
Z-BLR-1-14	1.845	0.044	0.179 5	0.002 8	5.571	0.085	0.074 3	0.001 5	1 061	16	1 064	15
Z-BLR-1-15	1.841	0.044	0.175 7	0.002 7	5.692	0.087	0.076 4	0.001 5	1 060	16	1 043	15
Z-BLR-1-16	1.831	0.045	0.178 3	0.002 8	5.609	0.088	0.074 7	0.001 5	1 056	16	1 058	16
Z-BLR-1-17	1.735	0.043	0.173 5	0.002 7	5.764	0.088	0.072 0	0.001 5	1 021	16	1 032	15
Z-BLR-1-18	1.852	0.047	0.178 6	0.002 8	5.599	0.086	0.074 9	0.001 6	1 066	17	1 059	15
Z-BLR-1-19	1.806	0.040	0.178 1	0.002 7	5.615	0.085	0.072 6	0.001 4	1 047	15	1 056	15
Z-BLR-1-20	1.767	0.041	0.175 7	0.002 7	5.692	0.087	0.072 2	0.001 5	1 033	15	1 044	15
Z-BLR-1-21	1.833	0.042	0.174 5	0.002 8	5.731	0.090	0.076 2	0.001 5	1 057	15	1 039	15
Ontario												
Z-Ontario-1	1.816	0.045	0.176 3	0.002 8	5.672	0.090	0.074 2	0.001 6	1 051	16	1 047	15
Z-Ontario-2	1.773	0.044	0.175 0	0.002 8	5.714	0.090	0.073 1	0.001 6	1 035	16	1 039	15
Z-Ontario-3	1.830	0.043	0.176 2	0.002 7	5.675	0.087	0.073 9	0.001 5	1 056	16	1 046	15
Z-Ontario-4	1.822	0.043	0.177 3	0.002 8	5.640	0.087	0.073 7	0.001 6	1 053	16	1 052	15
Z-Ontario-5	1.876	0.045	0.177 2	0.002 7	5.643	0.086	0.076 5	0.001 6	1 072	16	1 052	15
Z-Ontario-6	1.778	0.042	0.172 8	0.002 7	5.787	0.089	0.074 5	0.001 5	1 037	15	1 028	15
Z-Ontario-7	1.792	0.043	0.174 7	0.002 7	5.724	0.087	0.074 8	0.001 6	1 042	16	1 038	15
Z-Ontario-8	1.814	0.044	0.172 8	0.002 7	5.787	0.090	0.075 0	0.001 6	1 050	16	1 027	15
Z-Ontario-9	1.799	0.045	0.177 4	0.002 8	5.637	0.087	0.073 7	0.001 6	1 044	16	1 053	15
Z-Ontario-10	1.819	0.042	0.179 4	0.002 8	5.574	0.085	0.074 8	0.001 5	1 054	15	1 064	15
Z-Ontario-11	1.848	0.044	0.181 9	0.002 8	5.498	0.085	0.075 6	0.001 5	1 062	16	1 077	16
Z-Ontario-12	1.743	0.041	0.173 3	0.002 8	5.770	0.092	0.074 0	0.001 5	1 024	15	1 030	15
Z-Ontario-13	1.850	0.045	0.179 8	0.002 8	5.562	0.085	0.075 0	0.001 6	1 063	16	1 066	15
Z-Ontario-14	1.883	0.044	0.178 8	0.002 7	5.593	0.084	0.077 1	0.001 5	1 075	16	1 060	15
Z-Ontario-15	1.933	0.045	0.181 4	0.002 8	5.513	0.085	0.077 3	0.001 6	1 092	16	1 074	15
Z-Ontario-16	1.878	0.044	0.177 2	0.002 7	5.643	0.086	0.077 5	0.001 6	1 075	17	1 052	15
Z-Ontario-17	1.866	0.044	0.177 2	0.002 8	5.643	0.089	0.076 3	0.001 6	1 073	16	1 052	16
Z-Ontario-18	1.843	0.043	0.176 3	0.002 7	5.672	0.087	0.076 0	0.001 6	1 060	15	1 047	15
Z-Ontario-19	1.860	0.044	0.178 0	0.002 8	5.618	0.087	0.075 0	0.001 5	1 072	16	1 056	15
Z-Ontario-20	1.923	0.045	0.178 9	0.002 8	5.590	0.087	0.076 8	0.001 6	1 089	16	1 061	15
Z-Ontario-21	1.864	0.046	0.179 5	0.002 8	5.571	0.087	0.075 8	0.001 6	1 068	16	1 064	16
Z-Ontario-22	2.164	0.065	0.176 8	0.002 9	5.656	0.091	0.088 2	0.002 1	1 167	21	1 049	16
Pakistan												
Z-pakistan-2	0.031	0.004	0.003 3	0.000 1	307.692	10.888	0.073 0	0.008 5	31.1	3.5	20.9	0.8
Z-pakistan-3	0.045	0.005	0.003 7	0.000 1	273.224	8.958	0.098 0	0.011 0	44.4	4.6	23.5	0.8
Z-pakistan-4	0.034	0.004	0.0031	0.000 1	326.797	14.418	0.081 0	0.009 0	33.7	3.6	19.7	0.9
Z-pakistan-5	0.042	0.004	0.003 3	0.000 1	303.030	9.183	0.086 0	0.009 0	41.1	4.3	21.3	0.7
Z-pakistan-6	0.030	0.004	0.003 4	0.000 2	290.698	12.676	0.064 0	0.009 0	29.8	4.0	22.1	1.0
Z-pakistan-7	0.032	0.004	0.003 5	0.000 1	284.900	10.958	0.071 0	0.009 0	31.4	3.7	22.6	0.9
Z-pakistan-8	0.021	0.003	0.003 2	0.000 1	312.500	13.672	0.048 0	0.007 5	21.2	3.1	20.6	0.9
Z-pakistan-9	0.029	0.004	0.003 4	0.000 1	294.985	11.747	0.061 0	0.007 0	28.9	3.5	21.8	0.9
Z-pakistan-10	0.029	0.004	0.003 4	0.000 1	298.508	12.029	0.066 0	0.009 0	28.9	3.7	21.6	0.9
Z-pakistan-11	0.014	0.002	0.003 4	0.000 2	292.398	13.679	0.031 0	0.005 5	14.1	2.4	22.0	1.1
Z-pakistan-12	0.020	0.003	0.003 4	0.000 1	294.118	11.246	0.044 0	0.007 5	19.9	3.4	21.9	0.9
Z-pakistan-13	0.086	0.009	0.004 2	0.000 2	239.234	9.443	0.154 0	0.016 0	83.0	8.5	26.9	1.1
Z-pakistan-14	0.032	0.005	0.003 6	0.000 2	274.725	11.698	0.068 0	0.010 5	31.4	4.6	23.4	1.0
Z-pakistan-15	0.038	0.004	0.003 6	0.000 2	281.690	11.902	0.088 0	0.009 0	37.6	3.5	22.8	1.0
Z-pakistan-16	0.027	0.004	0.003 2	0.000 1	311.527	14.072	0.070 0	0.011 0	26.9	4.0	20.6	0.9
Z-pakistan-17	0.023	0.003	0.003 4	0.000 2	295.858	13.567	0.049 0	0.006 5	23.3	3.1	21.8	1.0
Z-pakistan-18	0.026	0.004	0.003 2	0.000 1	313.480	14.249	0.058 0	0.010 0	25.5	4.2	20.5	1.0

表 3 Arun Valley 地区退变榴辉岩和浅色体中榍石 U-Pb 定年数据

Table 3 Titanite U-Pb age data for retrograded eclogites and leucosome from the Arun Valley area of the central Himalaya

点位	同位素比值										同位素年龄/Ma			
	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	ρ	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	ρ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ
浅色体 (NP-36L)														
NP-36L. 1	0.123	0.009	0.003 7	0.000 2	0.29	268.82	16.62	0.233	0.017	0.59	119	8	23.9	1.5
NP-36L. 2	0.152	0.015	0.004 1	0.000 3	0.51	245.70	16.30	0.256	0.020	0.32	145	13	26.2	1.7
NP-36L. 3	0.145	0.014	0.004 1	0.000 2	0.24	243.31	13.62	0.265	0.026	0.37	140	13	26.4	1.5
NP-36L. 4	0.200	0.020	0.005 1	0.000 3	0.32	197.63	12.11	0.270	0.025	0.30	184	17	32.5	2.0
NP-36L. 5	0.089	0.008	0.003 0	0.000 1	0.21	338.98	16.09	0.224	0.020	0.16	87	7	19.0	0.9
NP-36L. 6	1.920	0.250	0.033 6	0.003 5	0.09	29.76	3.10	0.399	0.066	0.58	1 103	81	217	23
NP-36L. 8	0.094	0.008	0.002 9	0.000 2	0.19	346.02	19.16	0.232	0.020	0.41	91	7	18.6	1.0
NP-36L. 9	0.142	0.013	0.004 0	0.000 2	0.05	251.26	13.26	0.251	0.023	0.58	134	11	25.6	1.4
NP-36L. 10	0.149	0.012	0.003 9	0.000 2	0.25	257.07	15.86	0.275	0.023	0.42	143	11	25.0	1.5
NP-36L. 11	0.149	0.012	0.004 4	0.000 3	0.24	229.36	13.15	0.251	0.023	0.44	141	11	28.1	1.6
NP-36L. 12	0.119	0.010	0.003 7	0.000 2	0.22	272.48	15.59	0.245	0.026	0.58	116	10	23.6	1.3
NP-36L. 13	0.158	0.011	0.004 3	0.000 3	0.05	232.02	13.46	0.267	0.022	0.49	149	9	27.7	1.6
NP-36L. 14	0.216	0.017	0.005 7	0.000 3	0.23	176.06	9.92	0.285	0.025	0.45	198	14	36.5	2.1
NP-36L. 15	0.189	0.018	0.004 9	0.000 4	0.08	204.08	15.41	0.281	0.030	0.62	175	15	31.5	2.4
NP-36L. 16	0.122	0.009	0.003 7	0.000 2	0.18	268.10	13.66	0.240	0.020	0.64	118	9	24.0	1.3
NP-36L. 18	0.202	0.015	0.005 7	0.000 3	0.11	176.99	10.65	0.279	0.027	0.42	187	13	36.3	2.2
NP-36L. 19	0.086	0.009	0.003 0	0.000 1	0.26	338.98	16.09	0.216	0.019	0.08	84	8	19.0	0.9
NP-36L. 20	0.089	0.008	0.003 3	0.000 1	0.31	305.25	13.04	0.200	0.019	0.61	86	7	21.1	0.9
NP-36L. 21	0.119	0.010	0.003 7	0.000 2	0.10	268.82	15.18	0.239	0.024	0.65	114	9	23.9	1.3
NP-36L. 22	0.156	0.012	0.005 3	0.000 5	0.37	189.39	17.22	0.223	0.021	0.70	147	11	34.0	3.1
NP-36L. 23	0.159	0.014	0.004 5	0.000 3	0.17	220.75	14.13	0.249	0.024	0.54	149	12	29.1	1.8
NP-36L. 24	0.189	0.016	0.005 1	0.000 3	0.22	194.93	9.50	0.270	0.027	0.67	178	15	33.0	1.6
NP-36L. 25	0.230	0.021	0.006 3	0.000 4	0.25	158.48	10.05	0.272	0.025	0.52	212	18	40.5	2.5
NP-36L. 26	0.193	0.015	0.004 9	0.000 3	0.10	202.84	11.52	0.292	0.026	0.67	179	13	31.7	1.8
NP-36L. 27	0.140	0.010	0.003 8	0.000 2	0.14	263.85	13.92	0.275	0.024	0.54	133	9	24.4	1.3
NP-36L. 28	0.098	0.011	0.003 8	0.000 2	0.19	265.25	12.66	0.194	0.021	0.21	95	10	24.2	1.2
NP-36L. 29	0.138	0.012	0.004 9	0.000 3	0.18	202.84	10.29	0.209	0.023	0.66	131	11	31.7	1.6
NP-36L. 31	0.110	0.008	0.003 4	0.000 2	0.04	294.12	12.98	0.236	0.015	0.54	106	7	21.9	1.0
NP-36L. 32	0.097	0.008	0.003 2	0.000 2	0.04	315.46	14.93	0.215	0.018	0.44	93	7	20.4	1.0
NP-36L. 33	0.171	0.018	0.004 7	0.000 4	0.69	214.59	16.58	0.271	0.025	0.22	160	15	30.0	2.3
NP-36L. 34	0.189	0.018	0.004 9	0.000 3	0.18	203.25	12.81	0.277	0.027	0.44	178	15	31.7	2.0
NP-36L. 35	0.207	0.015	0.005 2	0.000 2	0.21	191.20	8.77	0.287	0.024	0.66	191	13	33.6	1.6
NP-36L. 37	0.144	0.012	0.004 7	0.000 3	0.27	211.42	13.86	0.214	0.020	0.42	136	11	30.4	2.0
NP-36L. 39	0.176	0.012	0.004 9	0.000 3	0.08	206.19	11.05	0.255	0.020	0.74	164	11	31.2	1.7
NP-36L. 41	0.297	0.027	0.007 0	0.000 5	0.43	143.06	10.44	0.300	0.021	0.39	263	21	44.9	3.3
NP-36L. 42	0.267	0.016	0.006 5	0.000 3	0.13	152.91	7.72	0.287	0.020	0.80	242	13	42.0	2.1
NP-36L. 43	0.133	0.013	0.004 2	0.000 3	0.48	238.66	15.95	0.229	0.019	0.35	127	11	26.9	1.8
NP-36L. 44	0.168	0.020	0.004 9	0.000 4	0.34	203.25	14.46	0.243	0.026	0.24	156	17	31.6	2.2
NP-36L. 45	0.154	0.012	0.004 6	0.000 3	0.16	218.34	11.92	0.243	0.019	0.50	146	11	29.4	1.6
NP-36L. 46	0.316	0.025	0.006 6	0.000 4	0.25	152.67	10.02	0.345	0.028	0.58	282	20	42.1	2.8
退变榴辉岩 (NP-21)														
NP-21-1. 1	4.920	0.700	0.065 8	0.006 6	0.66	15.20	1.52	0.549	0.062	0.60	1 791	120	410	40
NP-21-1. 3	8.310	1.300	0.110 4	0.009 3	0.70	9.06	0.76	0.550	0.061	0.25	2 247	140	674	54
NP-21-1. 4	11.62	1.600	0.149 9	0.011 0	0.58	6.67	0.49	0.558	0.064	0.39	2 567	140	899	62
NP-21-1. 5	34.40	4.700	0.463 0	0.032 0	0.59	2.16	0.15	0.551	0.058	0.58	3 629	120	2 470	150
NP-21-1. 6	0.086	0.013	0.002 9	0.000 2	0.47	340.14	25.45	0.210	0.027	0.17	83	12	18.9	1.4
NP-21-1. 7	1.530	0.230	0.021 2	0.001 9	0.25	47.17	4.23	0.537	0.078	0.50	932	94	135	12
NP-21-1. 8	2.430	0.350	0.034 4	0.002 2	0.31	29.07	1.86	0.506	0.061	0.56	1 238	100	218	14
NP-21-1. 9	2.200	0.380	0.031 0	0.004 0	0.74	32.26	4.16	0.527	0.065	0.35	1 162	130	196	25
NP-21-1. 10	0.755	0.110	0.011 9	0.001 1	0.38	84.03	7.77	0.450	0.057	0.62	567	62	76.5	7.1
NP-21-1. 11	3.280	0.480	0.046 0	0.004 2	0.57	21.74	1.98	0.545	0.066	0.52	1 471	120	289	26
NP-21-1. 12	2.550	0.360	0.035 4	0.002 6	0.04	28.25	2.07	0.529	0.070	0.67	1 284	110	224	16
NP-21-1. 13	4.960	0.760	0.061 7	0.005 4	0.57	16.21	1.42	0.603	0.074	0.47	1 803	120	385	33
NP-21-1. 14	0.966	0.140	0.014 1	0.001 3	0.24	70.92	6.54	0.507	0.071	0.72	681	72	90.2	8.3

续表 3-1

Continued Table 3-1

点位	同位素比值										同位素年龄/Ma			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	ρ	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ
NP-21-1.15	1.670	0.250	0.023 0	0.002 0	0.63	43.48	3.78	0.539	0.062	0.49	985	93	146	12
NP-21-1.16	1.100	0.240	0.015 4	0.002 5	0.73	64.94	10.54	0.505	0.085	0.19	710	130	98	16
NP-21-1.18	10.30	2.300	0.128 0	0.024 0	0.91	7.81	1.46	0.561	0.066	0.28	2 340	220	760	130
NP-21-1.19	0.822	0.076	0.010 9	0.000 8	0.47	92.00	6.77	0.537	0.038	0.37	605	42	69.7	5.1
NP-21-1.20	13.80	1.400	0.181 0	0.017 0	0.73	5.52	0.52	0.557	0.033	0.43	2 739	96	1 082	89
NP-21-1.21	6.540	0.640	0.079 8	0.006 3	0.56	12.53	0.99	0.594	0.043	0.53	2 041	91	494	38
NP-21-1.22	0.915	0.084	0.014 0	0.001 2	0.53	71.43	6.12	0.506	0.035	0.47	662	47	89.5	7.9
NP-21-1.23	40.20	6.900	0.508 0	0.081 0	0.93	1.97	0.31	0.569	0.031	0.21	3 670	180	2 560	350
NP-21-1.24	19.00	2.600	0.230 0	0.026 0	0.88	4.35	0.49	0.560	0.041	0.40	2 980	130	1 320	140
NP-21-1.25	7.300	1.300	0.093 0	0.016 0	0.93	10.75	1.85	0.562	0.042	0.20	2 110	160	565	92
NP-21-1.26	33.50	2.600	0.431 0	0.028 0	0.41	2.32	0.15	0.575	0.036	0.69	3 587	79	2 300	130
NP-21-1.27	0.271	0.024	0.005 2	0.000 4	0.13	193.42	14.22	0.388	0.033	0.61	243	19	33.2	2.4
NP-21-1.28	3.780	0.320	0.051 3	0.003 6	0.53	19.49	1.37	0.562	0.037	0.73	1 580	69	322	22
NP-21-1.29	5.470	0.620	0.075 6	0.007 2	0.65	13.23	1.26	0.529	0.032	0.26	1 911	100	468	43
NP-21-1.30	2.370	0.330	0.034 5	0.004 7	0.83	28.99	3.95	0.509	0.039	0.46	1 219	100	218	29
NP-21-1.31	2.250	0.230	0.030 7	0.003 5	0.42	32.57	3.71	0.549	0.056	0.73	1 202	72	194	22
NP-21-1.32	12.70	1.600	0.168 0	0.021 0	0.87	5.95	0.74	0.561	0.037	0.39	2 630	130	990	110
NP-21-1.33	6.600	0.960	0.092 0	0.013 0	0.94	10.87	1.54	0.542	0.026	0.14	2 070	130	561	73
NP-21-1.35	3.290	0.330	0.048 3	0.004 8	0.45	20.70	2.06	0.523	0.051	0.76	1 486	78	304	29
NP-21-2.1	12.80	1.300	0.142 0	0.013 0	0.61	7.04	0.64	0.673	0.044	0.46	2 669	100	850	71
NP-21-2.2	10.95	1.200	0.132 0	0.015 0	0.80	7.58	0.86	0.581	0.038	0.42	2 489	100	794	84
NP-21-2.3	6.650	0.660	0.080 9	0.006 9	0.21	12.36	1.05	0.636	0.066	0.73	2 060	82	507	43
NP-21-2.4	4.440	0.470	0.060 1	0.005 5	0.70	16.64	1.52	0.543	0.044	0.39	1 699	88	376	33
NP-21-2.5	4.310	0.480	0.056 5	0.005 2	0.44	17.70	1.63	0.554	0.060	0.54	1 671	91	354	31
NP-21-2.6	5.800	0.550	0.080 8	0.005 6	0.56	12.38	0.86	0.513	0.029	0.33	1 963	77	500	33
NP-21-2.7	17.90	1.900	0.236 0	0.021 0	0.61	4.24	0.38	0.518	0.037	0.38	2 965	110	1 360	110
NP-21-2.8	5.700	0.500	0.083 7	0.004 5	0.18	11.95	0.64	0.507	0.035	0.43	1 919	77	518	27
NP-21-2.9	1.360	0.200	0.020 1	0.002 9	0.74	49.75	7.18	0.488	0.037	0.36	860	85	128	18
NP-21-2.10	38.40	4.300	0.501 0	0.043 0	0.85	2.00	0.17	0.579	0.029	0.22	3 760	100	2 600	190
NP-21-2.11	19.70	2.400	0.253 0	0.028 0	0.71	3.95	0.44	0.574	0.042	0.27	3 030	120	1 440	140
NP-21-2.12	2.740	0.330	0.035 2	0.003 7	0.43	28.41	2.99	0.559	0.062	0.62	1 351	87	223	23
NP-21-2.13	10.40	1.200	0.127 0	0.014 0	0.63	7.87	0.87	0.592	0.046	0.28	2 470	100	779	84
NP-21-2.14	12.84	1.100	0.173 0	0.013 0	0.42	5.78	0.43	0.556	0.036	0.65	2 658	78	1 023	72
NP-21-2.15	8.380	0.820	0.112 0	0.009 5	0.52	8.93	0.76	0.545	0.041	0.45	2 268	86	682	55
NP-21-2.16	32.00	2.800	0.390 0	0.028 0	0.51	2.56	0.18	0.574	0.035	0.30	3 546	88	2 110	130
NP-21-2.18	7.360	0.650	0.095 7	0.006 7	0.28	10.45	0.73	0.578	0.044	0.65	2 144	80	588	40
NP-21-2.19	4.260	0.530	0.061 0	0.007 9	0.73	16.39	2.12	0.521	0.042	0.58	1 700	110	380	48
NP-21-2.20	29.00	3.000	0.367 0	0.029 0	0.84	2.72	0.22	0.573	0.028	0.16	3 435	110	2 000	140
NP-21-2.21	9.270	0.970	0.120 8	0.011 0	0.39	8.28	0.75	0.552	0.047	0.57	2 338	99	733	61
NP-21-2.22	43.00	5.800	0.551 0	0.067 0	0.89	1.81	0.22	0.580	0.032	0.18	3 800	150	2 780	280
NP-21-2.23	3.210	0.330	0.046 6	0.004 9	0.33	21.46	2.26	0.537	0.062	0.75	1 476	87	293	30
NP-21-2.24	11.90	2.400	0.143 0	0.030 0	0.94	6.99	1.47	0.628	0.044	0.23	2 510	190	850	160
NP-21-2.25	22.80	3.600	0.294 0	0.047 0	0.87	3.40	0.54	0.584	0.043	0.24	3 160	160	1 620	230
NP-21-2.26	1.630	0.130	0.022 9	0.001 5	0.26	43.67	2.86	0.519	0.035	0.65	978	51	146	9
NP-21-2.27	3.240	0.370	0.043 0	0.003 9	0.24	23.26	2.11	0.569	0.061	0.52	1 472	86	271	24
NP-21-2.28	0.771	0.073	0.012 0	0.000 8	0.26	83.40	5.70	0.475	0.038	0.58	587	45	77	5
NP-21-2.29	10.54	1.000	0.131 9	0.008 8	0.28	7.58	0.51	0.583	0.043	0.51	2 465	88	798	50
NP-21-2.30	20.70	2.000	0.255 0	0.017 0	0.43	3.92	0.26	0.594	0.033	0.39	3 102	92	1 459	86
NP-21-2.31	20.80	1.800	0.264 0	0.019 0	0.52	3.79	0.27	0.571	0.035	0.49	3 113	87	1 504	97
NP-21-2.32	5.010	0.510	0.065 8	0.005 9	0.25	15.20	1.36	0.542	0.050	0.68	1 825	86	410	35
NP-21-2.33	9.500	1.400	0.123 0	0.017 0	0.80	8.13	1.12	0.579	0.045	0.35	2 360	140	740	97
退变榴辉岩 (NP-24)														
NP-24-2	0.174	0.015	0.003 9	0.000 2	0.54	258.40	14.69	0.313	0.017	0.07	162	13	24.9	1.4
NP-24-3	0.185	0.015	0.003 9	0.000 2	0.14	259.07	14.77	0.339	0.020	0.65	172	12	24.8	1.4
NP-24-4	8.700	0.760	0.085 8	0.005 0	0.33	11.66	0.68	0.676	0.036	0.40	2 294	81	530	30
NP-24-5	18.40	4.400	0.177 0	0.041 0	0.96	5.65	1.31	0.709	0.032	0.13	2 600	350	1 020	230
NP-24-6	0.233	0.018	0.004 4	0.000 2	0.24	226.76	12.34	0.380	0.019	0.58	212	15	28.4	1.6

续表 3-2

Continued Table 3-2

点位	同位素比值										同位素年龄/Ma			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	ρ	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ
NP-24-7	0.246	0.020	0.004 7	0.000 3	0.09	215.05	12.49	0.383	0.027	0.69	223	16	29.9	1.7
NP-24-8	0.780	0.063	0.009 8	0.000 6	0.32	101.73	5.90	0.560	0.039	0.55	588	38	63.1	3.6
NP-24-9	0.158	0.015	0.003 7	0.000 2	0.51	273.97	15.76	0.318	0.021	0.14	149	13	23.5	1.4
NP-24-10	0.244	0.019	0.004 5	0.000 3	0.19	223.71	12.51	0.389	0.023	0.43	222	16	28.8	1.6
NP-24-11	0.153	0.012	0.003 6	0.000 2	0.13	275.48	14.42	0.298	0.015	0.41	144	10	23.3	1.2
NP-24-12	5.410	0.770	0.056 1	0.006 9	0.89	17.83	2.19	0.674	0.034	0.05	1 890	120	351	42
NP-24-13	0.110	0.009	0.003 2	0.000 2	0.37	309.69	15.35	0.247	0.013	0.27	106	8	20.8	1.0
NP-24-14	0.585	0.058	0.007 6	0.000 6	0.64	130.89	9.94	0.551	0.036	0.44	465	36	49.0	3.7
NP-24-15	0.110	0.012	0.003 3	0.000 2	0.72	304.88	16.73	0.235	0.018	0.33	106	11	21.1	1.1
NP-24-17	0.247	0.021	0.004 5	0.000 3	0.08	222.72	12.40	0.391	0.028	0.53	223	17	28.9	1.6
NP-24-20	0.058	0.005	0.002 6	0.000 2	0.04	387.60	22.53	0.165	0.013	0.53	58	5	16.6	0.9
NP-24-22	0.198	0.015	0.004 1	0.000 2	0.12	246.91	12.80	0.342	0.018	0.51	183	13	26.0	1.4
NP-24-24	0.750	0.060	0.009 8	0.000 7	0.06	102.15	6.99	0.546	0.037	0.74	566	35	62.8	4.3
NP-24-25	0.599	0.048	0.008 4	0.000 6	0.15	118.62	8.16	0.501	0.037	0.69	475	31	54.1	3.7
NP-24-26	0.159	0.014	0.003 6	0.000 2	0.05	275.48	15.18	0.315	0.022	0.48	151	12	23.3	1.3
NP-24-27	0.462	0.049	0.006 7	0.000 5	0.54	149.03	11.99	0.483	0.034	0.35	383	34	43.1	3.4
NP-24-28	0.085	0.008	0.002 8	0.000 1	0.29	356.25	17.77	0.211	0.015	0.17	83	7	18.1	0.9
NP-24-29	0.361	0.034	0.006 1	0.000 4	0.29	162.87	11.41	0.433	0.033	0.65	311	25	39.5	2.8
NP-24-30	0.152	0.013	0.003 6	0.000 2	0.08	280.11	17.26	0.301	0.026	0.61	144	12	22.9	1.4
退变榴辉岩 (NP-74)														
NP-74-1	5.390	0.720	0.092 4	0.005 9	0.46	10.82	0.69	0.434	0.045	0.53	1 881	110	569	35
NP-74-2	3.370	0.450	0.061 0	0.004 0	0.24	16.39	1.07	0.409	0.043	0.49	1 499	100	385	23
NP-74-3	1.530	0.220	0.027 4	0.002 1	0.41	36.50	2.80	0.412	0.050	0.52	933	87	174	13
NP-74-5	2.500	0.330	0.042 8	0.002 3	0.05	23.36	1.26	0.420	0.046	0.54	1 274	93	270	14
NP-74-6	1.850	0.270	0.034 4	0.002 4	0.47	29.07	2.03	0.397	0.047	0.36	1 061	91	218	15
NP-74-7	5.870	0.780	0.110 0	0.008 3	0.17	9.09	0.69	0.374	0.047	0.80	1 950	110	671	48
NP-74-8	2.290	0.320	0.041 7	0.003 1	0.48	23.98	1.78	0.415	0.045	0.41	1 219	87	263	19
NP-74-9	0.769	0.100	0.014 1	0.001 0	0.33	71.17	5.02	0.388	0.046	0.51	576	61	89.9	6.3
NP-74-10	4.780	0.630	0.083 0	0.004 7	0.53	12.05	0.68	0.415	0.043	0.38	1 781	120	513	28
NP-74-11	0.912	0.140	0.017 6	0.001 8	0.63	56.82	5.81	0.369	0.047	0.42	650	72	113	11
NP-74-12	5.680	0.770	0.098 9	0.006 3	0.53	10.11	0.64	0.416	0.043	0.29	1 926	110	607	37
NP-74-13	1.325	0.180	0.025 6	0.001 7	0.01	39.06	2.59	0.365	0.045	0.63	851	80	163	11
NP-74-14	2.180	0.290	0.040 9	0.002 5	0.22	24.45	1.49	0.389	0.042	0.53	1 175	92	258	15
NP-74-15	3.390	0.480	0.058 7	0.004 4	0.68	17.04	1.28	0.420	0.046	0.34	1 486	120	367	27
NP-74-16	3.920	0.530	0.070 8	0.004 3	0.22	14.12	0.86	0.394	0.045	0.45	1 608	110	441	26
NP-74-17	5.730	0.770	0.104 4	0.006 4	0.46	9.58	0.59	0.394	0.041	0.49	1 936	120	639	37
NP-74-18	9.730	1.300	0.170 0	0.012 0	0.68	5.88	0.42	0.425	0.046	0.31	2 417	140	1 009	67
NP-74-20	4.040	0.820	0.069 0	0.011 0	0.91	14.49	2.31	0.404	0.044	0.17	1 560	160	429	67
NP-74-21	3.500	0.480	0.059 6	0.004 2	0.45	16.78	1.18	0.422	0.044	0.49	1 525	110	373	25
NP-74-22	1.846	0.240	0.033 9	0.002 0	0.13	29.50	1.74	0.413	0.048	0.64	1 071	96	215	12
NP-74-23	3.910	0.540	0.067 8	0.005 8	0.64	14.75	1.26	0.432	0.047	0.62	1 614	110	422	35
NP-74-24	1.720	0.330	0.031 1	0.004 6	0.89	32.15	4.76	0.391	0.042	0.18	978	120	197	28
NP-74-25	8.830	1.200	0.144 3	0.008 8	0.37	6.93	0.42	0.436	0.046	0.56	2 329	120	868	50
NP-74-26	0.181	0.029	0.005 1	0.000 3	0.46	195.31	12.97	0.265	0.035	0.07	167	25	32.9	2.2
NP-74-27	6.750	0.870	0.109 9	0.005 7	0.09	9.10	0.47	0.446	0.046	0.62	2 074	110	672	33
NP-74-28	2.440	0.330	0.046 7	0.002 9	0.22	21.41	1.33	0.376	0.042	0.59	1 253	100	294	18
NP-74-29	1.621	0.220	0.033 8	0.001 8	0.09	29.59	1.58	0.343	0.038	0.61	980	81	214	11
NP-74-30	1.010	0.200	0.018 2	0.002 9	0.89	54.95	8.75	0.402	0.046	0.40	682	97	116	18
NP-74-31	8.270	1.100	0.152 1	0.007 7	0.16	6.57	0.33	0.411	0.042	0.49	2 262	110	912	43
NP-74-32	0.474	0.077	0.011 1	0.001 2	0.81	90.09	9.74	0.325	0.038	0.08	389	52	71.1	7.5
NP-74-33	4.260	0.560	0.076 1	0.004 5	0.48	13.14	0.78	0.392	0.042	0.64	1 694	110	472	27
NP-74-34	3.630	0.750	0.066 0	0.011 0	0.91	15.15	2.53	0.395	0.044	0.11	1 490	180	408	66
NP-74-35	3.230	0.510	0.057 9	0.005 4	0.74	17.27	1.61	0.417	0.045	0.29	1 448	130	362	33
NP-74-36	5.510	0.710	0.099 9	0.005 8	0.22	10.01	0.58	0.407	0.045	0.81	1 897	110	613	34
NP-74-37	4.300	0.610	0.079 1	0.005 3	0.72	12.64	0.85	0.397	0.042	0.18	1 679	110	490	32
NP-74-38	0.217	0.032	0.006 1	0.000 4	0.21	164.47	10.55	0.258	0.031	0.42	201	26	39.1	2.5
NP-74-39	1.160	0.200	0.023 0	0.002 4	0.79	43.48	4.54	0.357	0.041	0.13	771	95	147	15
NP-74-40	4.600	1.200	0.078 0	0.017 0	0.95	12.82	2.79	0.422	0.045	0.19	1 540	270	480	100

表 4 Arun Valley 地区退变榴辉岩和浅色体中榴石微量元素数据
Table 4 Titanite trace element contents for leucosome and retrograded eclogites from the Arun Valley area of the central Himalaya

样品	P	Sc	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Th/U	Nb/Ta	REE
浅色体 (NP-36L)																										
NP-36L-T1	435	2.70	1 717	186	555	148	488	79.6	435	179	68.4	240	49.9	330	63.4	166	22.4	142	15.4	12.5	165	230	297	0.77	3.36	2 427
NP-36L-T2	668	2.99	2 567	281	1 149	454	1 209	172	914	351	164	483	89.1	549	104	249	31.0	173	16.8	24.6	208	684	428	1.60	5.52	4 959
NP-36L-T3	465	3.14	1 729	125	436	62.0	202	35.8	209	107	39.1	162	37.8	288	60.8	168	25.5	159	16.4	9.95	161	73	128	0.57	2.71	1 572
NP-36L-T4	326	3.45	3 147	174	962	160	546	100	605	298	110	432	92.0	621	121	299	39.4	219	21.6	15.4	282	189	318	0.59	3.41	3 663
NP-36L-T5	565	3.47	2 062	257	721	362	1 197	195	1 117	423	125	536	92.7	512	83.8	175	19.4	93.1	8.97	17.3	225	490	488	1.00	3.20	4 940
NP-36L-T6	172	3.11	1 590	193	498	196	572	89.3	499	214	90.2	292	54.1	342	62.6	147	18.9	107	11.0	11.4	70.8	319	405	0.79	7.03	2 695
NP-36L-T7	585	3.18	1 148	170	436	121	329	49.2	260	106	52.3	152	32.9	222	43.4	118	15.9	95.9	10.8	12.5	100	147	144	1.02	4.37	1 608
NP-36L-T8	171	2.53	2 024	121	388	154	513	85.3	478	209	60.4	293	61.6	384	72.5	176	23.5	141	16.6	17.5	107	157	349	0.45	3.62	2 668
NP-36L-T9	323	2.52	2 630	246	589	235	705	111	621	268	139	385	79.0	524	97.7	234	30.3	162	16.5	15.2	65.6	345	521	0.66	8.98	3 607
NP-36L-T10	579	2.46	1 351	163	420	109	341	53.8	286	117	58.9	168	35.6	249	49.3	126	17.6	106	11.6	10.9	88.1	122	197	0.62	4.77	1 729
NP-36L-T11	395	2.81	1 596	200	477	114	333	55.3	298	142	81.0	206	43.7	303	61.0	159	21.2	120	13.1	11.4	71.9	156	297	0.52	6.63	1 950
NP-36L-T12	664	2.53	1 793	249	582	297	838	126	661	256	113	354	66.5	400	72.2	163	18.7	105	10.4	16.3	137	406	363	1.12	4.25	3 480
NP-36L-T13	623	3.10	1 912	170	654	158	473	78.3	425	179	72.4	249	51.2	357	71.3	181	26.1	165	18.3	13.1	211	225	238	0.95	3.10	2 505
NP-36L-T14	589	3.19	2 040	185	590	174	513	82.1	446	188	75.5	263	53.9	370	72.8	193	28.0	177	19.8	14.2	213	230	251	0.92	2.77	2 655
NP-36L-T15	182	2.90	2 860	264	646	136	450	80.4	463	233	146	339	71.9	503	102	274	39.7	255	28.6	19.2	106	209	460	0.45	6.09	3 121
NP-36L-T16	718	3.07	1 969	241	611	337	1 068	176	943	345	146	443	78.4	455	80.5	175	20.4	108	10.2	15.7	117	475	437	1.09	5.24	4 385
NP-36L-T17	730	3.16	2 057	275	703	399	1 136	175	931	336	140	429	78.0	470	84.0	190	21.8	114	11.1	18.5	135	619	457	1.35	5.20	4 514
NP-36L-T18	702	3.42	2 034	251	597	365	1 108	178	947	343	148	458	81.5	475	82.9	182	20.7	109	10.5	17.3	115	513	459	1.12	5.21	4 508
退变榴辉岩 (NP-36M)																										
NP-36M-T1	599	11.7	793	202	226	243	733	118	661	220	78.3	257	38.8	206	33.2	65.1	7.49	38.7	4.80	12.5	17.9	52.0	35.5	1.46	12.7	2 703
NP-36M-T2	537	4.35	424	89.7	190	60.9	172	25.9	138	50.3	19.9	69.2	13.2	87	17.1	39.8	5.02	30.8	3.85	6.03	17.0	13.5	7.49	1.80	11.2	732
NP-36M-T3	695	5.00	730	178	223	136	530	95.0	550	193	68.0	234	35.3	188	30.6	61.9	6.95	38.3	4.68	11.6	17.1	23.4	28.2	0.83	13.1	2 172
NP-36M-T4	397	5.21	518	30.9	148	9.2	40.1	9.6	72.3	45.1	22.9	78.8	15.2	100	20.6	54.2	7.42	48.7	6.89	2.87	10.7	1.43	3.92	0.36	13.9	531
NP-36M-T5	570	5.20	619	145	185	149	494	79.3	426	140	55.4	170	27.0	152	25.5	55.1	6.65	39.4	5.20	9.24	13.7	30.5	23.7	1.29	13.5	1 824
NP-36M-T6	642	4.75	714	295	249	458	1 151	158	774	202	69.3	217	32.4	177	30.3	64.1	7.64	44.3	5.41	16.5	18.4	106	36.9	2.87	13.5	3 390
NP-36M-T7	693	5.90	808	246	238	380	1 072	157	798	229	87.3	256	38.2	203	34.0	67.9	7.36	43.5	5.48	15.0	18.6	83.7	42.0	1.99	12.8	3 378
NP-36M-T8	574	5.64	639	1 790	202	132	427	70.0	385	135	56.8	171	28.1	159	26.7	55.2	6.01	34.0	4.15	49.0	15.7	26.6	25.6	1.04	12.9	1 690
NP-36M-T9	480	4.38	410	108	147	51.0	213	36.6	215	76.6	32.5	91.6	15.3	90.8	16.2	36.6	4.56	27.5	3.44	7.03	11.4	7.50	13.0	0.58	12.9	911
NP-36M-T10	400	4.38	545	99.0	156	102	340	53.0	279	88.0	37.9	108	17.1	112	21.1	52.0	6.90	46.7	6.25	5.30	16.5	22.8	15.3	1.49	9.50	1 270
退变榴辉岩 (NP-21)																										
NP-21-1.1	1 300	2.44	602	120	130	114	616	130	791	269	101	260	34.3	183	25.7	55.4	6.21	33.6	3.64	7.69	13.6	8.02	17.7	0.45	9.55	2 623
NP-21-1.3	980	2.23	347	90.7	184	24.5	155	37.6	272	157	59.7	198	27.8	127	14.3	25.9	2.91	16.5	1.59	5.64	12.8	2.48	18.5	0.13	14.4	1 120
NP-21-1.4	1 180	2.93	368	112	218	106	415	81.2	493	194	66.9	210	27.3	129	15.9	29.7	3.07	16.2	1.59	7.49	18.0	18.0	13.1	1.37	12.1	1 788

续表 4-1
Continued Table 4-1

样品	P	Sc	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Th/U	Nb/Ta	REE
NP-21-1.5	1 190	2.56	241	80.7	178	8.9	52.7	13.2	98.4	58.8	25.0	87.5	14.4	78.1	10.3	19.1	1.81	8.50	0.81	5.47	12.5	1.05	4.76	0.22	14.3	478
NP-21-1.6	1 100	3.23	1 896	265	555	650	2 913	505	2 731	859	188	775	111	595	83.2	171	17.9	86.2	8.12	16.4	116	148	521	0.28	4.78	9 694
NP-21-1.7	1 080	5.30	1 306	710	184	68.8	310	62.7	374	169	62.3	201	39.5	270	46.9	119	16.6	97.2	10.6	17.4	12.0	10.6	25.6	0.41	15.3	1 848
NP-21-1.8	910	2.73	533	75.9	203	32.9	153	30.5	181	84.4	38.4	116	21.2	137	20.9	46.7	5.40	29.9	3.27	5.31	17.1	4.82	33.3	0.14	11.9	900
NP-21-1.9	930	2.23	352	94.7	175	45.6	243	50.6	307	128	54.3	139	20.1	104	13.7	27.2	3.06	16.0	1.60	6.09	10.7	7.17	36.8	0.19	16.4	1 153
NP-21-1.10	930	4.80	509	330	71.0	209	708	101	451	105	34.2	92.6	15.3	107	18.7	42.8	4.81	24.8	2.28	13.6	9.15	16.3	75.1	0.22	7.76	1 916
NP-21-1.11	1 000	2.13	835	109	210	60.4	299	63.0	403	182	66.7	220	36.2	211	31.4	72.6	9.38	55.6	5.83	6.64	16.2	9.70	19.1	0.51	12.9	1 715
NP-21-1.12	830	4.09	380	181	97.4	282	883	115	471	85.4	75.0	72.7	11.3	77	14.6	38.2	4.91	28.7	3.28	9.07	7.01	27.8	22.3	1.25	13.9	2 162
NP-21-1.13	700	3.42	731	69.9	337	53.7	286	62.3	400	160	48.5	177	28.3	174	30.4	75.3	9.62	52.1	5.71	4.84	39.4	4.73	13.4	0.35	8.55	1 562
NP-21-1.14	710	2.52	910	102	234	71.2	334	67.9	409	176	72.8	204	35.7	223	35.0	81.9	9.71	54.7	6.00	5.65	17.4	13.0	67.2	0.19	13.4	1 781
NP-21-1.15	840	2.83	732	85.3	262	40.7	204	44.6	279	139	50.6	176	30.7	185	28.8	66.3	8.21	45.9	4.97	5.62	23.0	8.41	52.5	0.16	11.4	1 304
NP-21-1.16	3 420	2.07	830	110	214	72.0	352	72.0	429	176	64.8	210	35.2	206	29.9	71.9	9.55	59.2	6.54	7.16	20.5	14.0	58.0	0.24	10.4	1 794
NP-21-1.18	1 690	2.40	648	104	265	74.0	290	56.2	340	142	42.1	180	29.9	174	26.7	57.0	6.76	38.1	4.07	6.79	26.4	16.5	13.0	0.27	10.0	1 461
NP-21-1.19	383	2.10	1 342	92.1	249	65.8	311	64.4	398	190	69.7	251	47.6	290	50.8	119	16.2	99.4	10.3	6.70	20.8	11.1	81.8	0.14	12.0	1 983
NP-21-1.20	700	3.24	320	109	195	42.1	228	53.0	382	175	66.8	205	27.0	111	12.7	22.8	2.55	15.5	1.75	8.02	15.7	3.88	12.5	0.31	12.4	1 345
NP-21-1.21	750	2.84	503	107	201	44.6	165	32.1	207	100	44.7	143	24.2	131	19.4	39.2	4.82	28.6	2.98	7.63	15.9	6.46	19.3	0.33	12.6	987
NP-21-1.22	460	2.25	757	81.7	114	55.8	252	50.8	307	131	43.4	164	30.8	177	27.8	61.2	7.46	46.4	4.84	4.99	11.8	13.2	92.8	0.14	9.64	1 359
NP-21-1.23	483	2.73	315	104	172	17.3	91.2	21.8	163	88.6	40.5	131	21.0	102	13.0	21.6	2.16	11.8	1.18	7.34	12.9	2.79	6.12	0.46	13.4	725
NP-21-1.24	373	3.03	668	121	165	19.0	91.3	20.5	140	80.0	36.5	126	24.2	151	26.9	60.6	7.13	39.2	4.31	6.30	11.9	3.38	5.60	0.60	13.9	826
NP-21-1.25	440	6.30	691	96	237	65.8	246	46.3	286	124	55.2	173	30.3	167	28.5	63.1	7.93	46.0	5.40	6.75	25.0	11.9	14.9	0.80	9.46	1 345
NP-21-1.26	810	4.05	235	280	197	19.3	114	28.1	215	111	46.9	148	20.3	87.3	9.53	15.2	1.33	7.00	0.81	12.6	15.6	1.83	5.99	0.31	12.6	824
NP-21-1.27	1 100	4.42	1 256	240	140	397	1 790	344	1 891	541	196	507	70.3	357	51.7	97.3	9.57	47.7	4.57	14.9	23.7	42.4	264	0.16	5.90	6 303
NP-21-1.28	1 040	1.87	542	121	180	42.4	218	51.7	364	182	73.2	232	34.1	158	20.9	40.0	4.87	28.3	3.02	8.50	14.1	5.08	26.8	0.19	12.7	1 452
NP-21-1.29	600	2.86	548	146	186	151	549	95.2	530	177	87.9	205	29.6	148	22.1	44.1	5.12	29.7	3.37	9.72	15.6	17.6	20.9	0.84	11.9	2 078
NP-21-1.30	1 310	3.01	735	144	165	184	797	154	912	291	139	304	41.5	202	29.7	59.4	6.82	38.1	4.08	9.75	14.8	21.4	36.9	0.58	11.1	3 162
NP-21-1.31	570	2.71	963	129	179	82.7	354	70.1	431	182	80.7	234	39.2	222	36.3	80.9	10.2	60.3	6.78	7.32	14.2	12.7	26.9	0.47	12.6	1 891
NP-21-1.32	710	3.05	395	116	190	34.7	167	38.1	269	132	60.2	172	25.2	124	16.3	29.4	3.14	17.7	1.93	8.35	14.1	5.38	11.2	0.48	13.5	1 091
NP-21-1.33	490	2.77	532	138	199	31.6	158	34.5	240	123	50.4	173	27.1	147	21.7	42.7	4.74	26.8	2.88	8.09	14.4	4.64	24.5	0.19	13.8	1 083
NP-21-1.35	510	5.29	883	114	214	56.4	254	52.0	334	167	70.4	228	38.2	211	34.0	75.7	9.53	59.5	6.49	7.65	19.6	9.20	19.6	0.47	10.9	1 596
NP-21-2.1	326	2.06	739	104	206	70.6	258	46.4	266	105	48.7	140	25.2	158	28.6	70.2	8.72	51.8	6.12	4.85	9.5	9.56	10.7	0.90	21.7	1 282
NP-21-2.2	510	2.47	685	102	231	46.3	198	41.3	268	128	55.0	175	28.9	164	26.3	56.4	6.86	39.5	4.54	6.72	17.9	7.84	11.5	0.68	12.9	1 238
NP-21-2.3	580	2.19	667	111	145	103	345	55.2	297	111	55.0	141	24.9	149	26.6	62.4	7.51	44.6	5.02	5.58	9.9	13.9	11.3	1.23	14.7	1 428
NP-21-2.4	1 050	1.95	431	130	189	85.7	353	69.0	436	172	69.9	199	27.2	121	16.6	34.6	4.42	27.6	3.39	8.19	15.4	11.9	15.1	0.79	12.3	1 619
NP-21-2.5	740	2.21	521	151	200	102	437	86.4	532	194	72.8	213	29.7	143	20.5	42.3	5.20	32.5	3.93	9.11	15.6	12.3	14.2	0.87	12.8	1 914
NP-21-2.6	940	2.40	394	139	177	159	750	150	893	262	92.5	251	29.9	128	16.1	30.2	3.30	18.9	2.11	9.44	15.8	12.7	16.6	0.76	11.2	2 786
NP-21-2.7	570	3.40	577	222	187	34.6	151	32.7	218	107	44.1	148	26.8	149	23.2	48.3	5.80	33.2	3.60	10.3	17.2	4.70	6.93	0.68	10.8	1 024

续表 4-2
Continued Table 4-2

样品	P	Sc	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Th/U	Nb/Ta	REE	
NP-21-2.8	990	2.39	595	140	198	162	732	149	899	292	102	293	37.4	170	24.4	51.3	6.09	36.6	4.13	9.75	19.4	15.2	17.6	0.86	10.2	2 959	
NP-21-2.9	710	3.82	880	302	487	642	1 966	280	1 409	347	146	347	48.2	242	37.5	74.3	8.03	42.2	4.54	19.2	49.6	110	48.1	2.29	9.82	5 594	
NP-21-2.10	620	2.92	282	71.2	112	16.3	73.5	16.8	120	66.0	27.3	94	14.8	76.4	11.5	22.3	2.56	15.0	1.67	4.49	12.7	2.62	4.60	0.57	8.82	558	
NP-21-2.11	810	2.41	249	113	199	51.2	269	63.5	414	161	60.8	179	23.0	93.9	10.5	15.7	1.68	8.75	0.98	8.83	14.4	4.07	9.77	0.42	13.7	1 353	
NP-21-2.12	530	2.58	958	113	146	84.0	357	69.4	407	158	64.3	194	34.0	205	35.3	83.0	10.7	65.0	7.24	6.19	10.2	11.13	15.9	0.70	14.4	1 774	
NP-21-2.13	530	2.22	588	106	196	41.6	153	27.8	161	73.4	35.3	111	22.3	138	22.4	47.4	5.66	33.6	3.63	7.29	15.9	8.36	8.63	0.97	12.3	877	
NP-21-2.14	600	4.20	674	110	197	49.4	214	44.0	290	143	55.3	193	31.7	167	26.1	56.8	6.96	41.7	4.65	7.20	18.1	7.07	10.1	0.70	10.9	1 323	
NP-21-2.15	660	2.72	499	122	180	75.4	335	67.5	429	172	66.4	202	29.4	142	20.4	39.7	4.68	28.2	3.19	8.13	14.7	9.31	12.0	0.78	12.2	1 614	
NP-21-2.16	630	3.17	307	106	195	23.5	118	28.4	212	117	48.3	165	24.3	107	13.5	23.1	2.27	13.0	1.31	7.34	16.6	2.89	6.14	0.47	11.8	897	
NP-21-2.18	750	2.26	471	191	256	252	788	125	678	201	83.5	219	30.5	145	19.9	36.6	3.84	21.3	2.29	12.3	20.1	41.0	16.4	2.50	12.7	2 605	
NP-21-2.19	590	2.91	893	116	203	76.5	337	68.6	435	181	68.2	218	36.6	207	34.8	76.1	9.89	63.6	6.75	7.20	16.7	9.61	16.0	0.60	12.2	1 819	
NP-21-2.20	490	3.74	338	129	182	65.9	269	52.1	324	137	55.3	170	24.2	114	14.7	25.6	2.41	12.4	1.16	8.68	13.9	6.54	6.96	0.94	13.1	1 268	
NP-21-2.21	510	2.66	596	127	216	64.2	252	49.6	330	156	63.5	209	33.1	168	24.3	48.3	5.89	35.7	3.88	8.60	18.6	8.40	10.1	0.83	11.6	1 443	
NP-21-2.22	510	3.00	424	112	212	21.0	110	26.9	206	126	54.3	190	30.6	147	19.2	31.3	2.91	14.1	1.16	8.19	17.7	2.30	6.17	0.37	12.0	980	
NP-21-2.23	390	2.26	840	123	180	72.8	282	52.3	314	142	58.4	190	33.6	195	32.5	71.4	9.08	53.0	5.88	6.59	12.2	11.7	14.3	0.82	14.7	1 511	
NP-21-2.24	670	2.11	442	130	175	69.9	337	72.2	466	189	72.1	214	29.4	132	17.4	33.8	3.97	23.8	2.51	8.73	15.0	7.21	13.0	0.55	11.7	1 663	
NP-21-2.25	580	2.41	421	87.7	127	26.6	126	27.1	176	79.0	35.9	103	17.4	102	16.7	37.2	4.41	24.8	2.54	5.93	11.2	3.81	6.86	0.56	11.4	779	
NP-21-2.26	960	3.77	662	247	227	587	1 906	265	1 193	238	131	220	30.9	171	27.3	56.5	5.85	30.1	2.98	17.2	26.3	67.9	70.8	0.96	8.65	4 865	
NP-21-2.27	800	2.43	896	126	192	92.3	420	86.7	556	223	78.7	257	39.1	217	34.0	74.1	9.94	61.5	7.27	7.89	14.8	10.9	17.7	0.62	12.9	2 156	
NP-21-2.28	830	3.20	672	227	155	447	1 593	244	1 191	268	113	238	33.7	178	26.9	52.5	5.59	29.6	3.06	13.5	18.5	53.5	110	0.49	8.37	4 424	
NP-21-2.29	540	2.38	471	112	187	45.1	182	34.4	212	100	48.0	132	22.6	125	18.6	37.9	4.31	23.2	2.61	7.24	13.1	6.55	9.31	0.70	14.3	987	
NP-21-2.30	560	2.62	253	110	193	34.5	200	48.4	340	150	58.2	173	22.9	95	11.0	17.0	1.69	9.10	1.01	8.51	14.3	2.83	9.77	0.29	13.5	1 163	
NP-21-2.31	560	2.24	441	108	184	34.5	156	33.5	232	114	50.0	154	25.3	127	18.0	34.5	3.97	22.3	2.66	7.69	13.4	4.51	7.05	0.64	13.7	1 006	
NP-21-2.32	610	2.73	541	126	202	77.4	368	78.6	516	208	78.3	230	32.6	150	20.6	42.5	5.46	35.8	4.06	8.58	15.1	8.92	15.2	0.59	13.4	1 847	
NP-21-2.33	920	3.31	438	153	202	61.9	309	68.2	464	193	73.0	217	30.0	137	18.0	34.1	4.18	25.7	2.99	8.90	14.5	6.26	11.4	0.55	13.9	1 638	
退变榴辉岩(NP-24)																											
NP-24-2	1 670	6.40	867	730	412	845	1 687	152	519	108	84.9	162	31.8	194	35.1	85.5	11.4	67.1	8.26	32.8	45.1	884	740	1.19	9.14	3 990	
NP-24-3	1 140	6.55	687	533	231	279	523	52.2	205	83.3	57.4	143	25.1	147	27.0	67.6	9.44	56.7	6.67	22.5	9.20	583	643	0.91	25.1	1 682	
NP-24-4	1 210	6.57	203	412	189	61.6	106	10.9	45.9	22.7	20.7	47.3	8.0	43.6	8.05	18.7	2.46	14.8	1.80	17.9	6.19	12.7	15.7	0.81	30.5	412	
NP-24-5	693	5.70	170	340	179	104	139	11.4	45.1	16.6	11.5	31.2	5.7	33.9	6.31	15.2	2.14	13.1	1.64	16.2	15.1	34.0	33.0	1.03	11.9	437	
NP-24-6	1 160	10.9	393	422	166	359	853	96.3	394	87.9	31.4	101	17.0	93.2	16.2	36.2	4.87	28.0	3.63	19.5	23.4	469	600	0.78	7.11	2 122	
NP-24-7	1 480	10.6	432	516	220	436	1 120	138	585	119	43.1	100	16.3	95.6	18.1	45.1	6.03	37.4	4.81	22.8	28.3	510	546	0.93	7.79	2 764	
NP-24-8	1 230	10.2	213	406	126	250	466	47.1	173	37.3	17.7	46.6	8.0	48.4	8.83	20.9	2.66	15.1	1.78	19.0	16.3	192	166	1.16	7.74	1 143	
NP-24-9	1 380	12.5	521	587	176	464	1 181	137	549	109	43.2	110	18.8	113	21.6	53.2	6.94	40.1	5.23	25.0	21.8	652	831	0.78	8.08	2 853	

续表 4-3
Continued Table 4-3

样品	P	Sc	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Th/U	Nb/Ta	REE
NP-24-10	1 390	12.4	397	512	200	343	808	89.6	356	70.5	28.5	72.4	12.7	82.2	16.2	41.4	5.61	34.8	4.54	22.2	26.3	429	522	0.82	7.60	1 965
NP-24-11	1 340	5.84	198	300	107	398	1 030	125	549	130	48.4	93.1	10.6	47.9	7.43	16.7	2.23	15.3	2.18	12.3	12.3	427	787	0.54	8.73	2 476
NP-24-12	1 018	4.66	277	356	229	81.0	150	16.2	72.3	33.1	21.7	67.8	11.8	62.0	10.0	23.4	2.93	17.8	2.15	16.6	23.5	27.5	34.1	0.81	9.75	572
NP-24-13	3 060	6.70	1064	714	599	800	2 256	275	1 197	281	93.9	332	54.2	286	45.6	93.5	10.5	55.2	6.03	41.0	120	2 140	1 532	1.40	5.01	5 786
NP-24-14	1 500	13.4	448	408	180	152	216	18.9	74.3	34.9	15.8	76.0	14.9	92.8	17.4	45.3	5.97	38.6	4.84	20.3	21.8	154	183	0.84	8.27	808
NP-24-15	1 360	4.46	250	359	48.9	322	900	135	728	241	107	175	17.9	68.8	9.28	19.5	2.61	17.9	2.51	12.9	3.00	300	774	0.39	16.3	2 746
NP-24-17	1 380	5.83	416	451	194	273	629	76.1	348	88.6	26.6	95.9	15.8	93.8	17.0	43.1	5.57	34.2	4.30	23.1	25.6	399	486	0.82	7.56	1 752
NP-24-20	1 560	5.59	584	426	50.0	339	879	120	609	198	71.2	187	24.7	124	20.8	54.1	7.74	57.9	7.87	15.3	4.20	491	910	0.54	11.9	2 701
NP-24-22	1 590	10.2	401	496	205	684	1 843	226	970	175	42.9	110	14.2	84.9	16.8	42.1	5.68	35.2	4.75	21.0	24.1	679	671	1.01	8.52	4 254
NP-24-24	820	5.56	313	368	89.7	83.3	107	10.8	59.6	39.4	25.4	64.8	10.5	63.9	11.9	30.8	4.25	30.7	4.03	15.1	7.34	51.4	144	0.36	12.2	547
NP-24-25	754	5.49	158	359	242	171	300	29.1	111	32.1	19.5	49.1	7.51	38.0	6.05	13.8	1.68	10.6	1.35	16.7	17.9	115	190	0.61	13.5	791
NP-24-26	1 470	6.82	159	311	79.4	257	594	72.6	327	84.1	31.0	69.3	8.52	39.4	6.28	13.5	1.58	10.2	1.29	13.3	8.67	305	563	0.54	9.16	1 516
NP-24-27	1 130	5.90	600	471	108	165	273	30.9	166	103	58.3	167	25.2	143	24.7	54.6	6.69	38.9	4.56	19.4	12.3	134	194	0.69	8.83	1 260
NP-24-28	1 290	5.96	382	414	137	492	1 251	161	737	189	64.4	145	18.2	89.0	15.0	35.0	4.46	30.7	4.03	18.1	18.2	503	1 032	0.49	7.54	3 236
NP-24-29	1 300	3.69	84	217	84.4	228	545	70.7	342	85.1	27.1	58.7	5.73	23.6	3.05	5.6	0.66	3.98	0.53	9.89	10.0	178	226	0.79	8.45	1 400
NP-24-30	920	17.4	843	459	97.3	261	561	63.1	266	92.4	37.2	161	30.3	182	32.6	81.2	11.0	66.0	8.77	20.9	7.97	367	587	0.62	12.2	1 854
退变榴辉岩(NP-74)																										
NP-74-1	690	2.32	339	53.0	195	22.4	139	34.3	243	139	40.1	180	25.8	122	14.7	24.1	2.19	9.56	0.96	3.81	23.7	3.16	25.7	0.12	8.24	997
NP-74-2	770	2.85	453	66.6	220	25.3	147	36.0	246	138	42.4	181	27.3	145	19.4	35.2	3.33	15.3	1.56	4.11	22.6	3.61	28.4	0.13	9.70	1 063
NP-74-3	620	4.09	864	85.0	72.1	30.6	127	22.3	124	56.5	21.1	95.2	22.7	181	37.3	101	13.5	75.0	8.39	4.35	10.6	6.87	50.4	0.14	6.80	916
NP-74-5	570	3.59	401	70.8	216	36.2	208	48.7	328	154	42.5	179	24.7	128	17.1	32.4	3.48	18.7	2.19	4.46	22.0	6.01	42.9	0.14	9.79	1 223
NP-74-6	720	2.55	506	63.3	229	35.1	209	49.5	339	172	47.0	203	29.4	149	20.2	40.3	4.65	28.0	3.23	4.38	26.0	5.28	47.9	0.11	8.83	1 329
NP-74-7	620	8.20	461	460	133	12.2	65.8	15.3	105	73.0	26.7	130	25.1	148	20.9	37.8	3.52	14.4	1.43	22.0	16.5	2.52	21.0	0.12	8.09	678
NP-74-8	570	3.29	533	57.0	104	26.8	114	21.5	120	66.6	25.8	111	22.0	141	22.9	51.2	5.61	28.3	3.07	3.75	15.1	9.75	35.9	0.27	6.90	760
NP-74-9	350	10.5	1293	65.8	113	43.1	214	45.2	274	146	43.3	215	42.9	296	53.5	134	17.7	102	11.60	3.80	17.2	11.4	80.5	0.14	6.54	1 639
NP-74-10	640	2.22	407	56.9	167	16.2	88.3	20.4	140	90.5	29.6	145	25.4	135	18.2	31.2	2.77	11.6	1.16	3.92	20.1	2.83	23.7	0.12	8.31	755
NP-74-11	850	2.72	437	78.3	114	36.9	174	34.3	208	111	38.1	162	27.4	145	18.5	32.1	2.97	13.6	1.67	4.16	13.7	7.29	57.9	0.13	8.34	1 004
NP-74-12	770	3.02	484	50.4	131	12.9	65.7	14.9	101	69.1	25.1	128	25.4	154	21.7	40.6	3.74	16.3	1.57	3.53	16.9	2.42	20.2	0.12	7.74	680
NP-74-13	540	4.59	513	200	117	37.0	162	30.3	172	85.5	27.2	137	26.0	155	22.3	44.1	4.51	22.0	2.68	6.10	13.0	9.79	59.0	0.17	9.02	927
NP-74-14	740	2.40	484	59.0	210	27.1	161	38.7	262	148	42.4	192	29.0	149	19.8	38.2	4.39	25.1	2.92	4.18	23.0	4.34	40.1	0.11	9.13	1 139
NP-74-15	740	1.90	376	62.0	179	27.4	152	35.0	243	145	42.6	202	30.9	143	16.9	26.0	2.08	8.59	0.84	4.17	20.3	4.77	34.1	0.14	8.83	1 075
NP-74-16	780	1.62	301	65.0	246	39.2	233	55.2	363	159	42.6	176	23.3	109	12.9	21.0	2.01	8.70	0.89	4.47	24.7	4.79	29.0	0.16	9.97	1 245

续表 4-4
Continued Table 4-4

样品	P	Sc	Y	Zr	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Th/U	Nb/Ta	REE
NP-74-17	730	1.38	456	58.3	222	22.4	141	35.9	260	154	45.8	206	30.5	158	21.2	36.4	3.18	12.6	1.05	4.23	23.8	2.73	22.5	0.12	9.31	1 127
NP-74-18	640	2.59	448	52.7	211	12.1	75.5	19.4	144	89.7	31.1	138	23.2	133	19.6	37.7	3.71	17.0	1.77	3.58	26.6	1.57	14.4	0.11	7.93	745
NP-74-20	700	2.01	618	67.1	225	40.0	234	55.7	379	197	52.3	250	37.4	195	27.0	52.8	5.50	25.6	2.62	4.42	37.6	5.51	33.4	0.16	5.98	1 554
NP-74-21	670	2.30	464	55.4	115	18.8	87.2	18.2	121	81.2	26.8	144	27.1	153	20.4	37.7	3.70	16.3	1.72	3.69	14.0	4.01	28.6	0.14	8.24	757
NP-74-22	710	2.57	591	56.9	147	24.0	121	25.6	162	92.1	30.5	148	29.1	170	26.3	53.6	5.73	28.4	3.02	3.79	18.8	5.44	43.4	0.13	7.82	920
NP-74-23	720	2.58	644	56.6	165	19.8	116	27.8	189	118	38.4	196	35.8	202	28.5	54.6	5.61	27.2	2.81	4.02	19.7	4.20	30.2	0.14	8.38	1 063
NP-74-24	650	2.62	535	61.1	120	34.7	161	31.5	181	88.7	26.7	140	26.4	155	22.3	45.0	4.76	25.3	2.90	3.90	12.3	9.70	53.4	0.18	9.76	946
NP-74-25	760	2.35	415	55.9	186	13.0	81.2	21.2	159	105	33.0	161	26.8	141	18.2	31.7	2.87	12.1	1.01	3.92	19.0	1.73	16.1	0.11	9.78	808
NP-74-26	640	2.50	1 730	92.2	193	76.8	400	82.0	482	217	60.6	280	55.5	377	68.2	179	24.1	139.0	16.70	4.63	26.7	17.7	158	0.11	7.23	2 456
NP-74-27	760	2.46	455	53.7	168	16.7	100	24.7	174	105	33.8	155	26.0	143	20.0	36.2	3.21	13.8	1.24	3.77	20.3	2.32	18.5	0.13	8.29	852
NP-74-28	830	1.99	425	63.2	213	35.6	211	51.5	346	169	45.6	196	27.7	137	17.9	33.6	3.58	20.0	2.21	4.40	22.2	5.30	38.4	0.14	9.56	1 297
NP-74-29	1 190	3.51	337	175	219	56.8	334	79.5	525	234	61.2	251	31.6	138	14.8	21.1	1.57	6.51	0.65	7.50	20.2	7.90	46.9	0.17	10.9	1 755
NP-74-30	540	3.42	885	94.0	144	36.5	194	41.8	256	129	37.0	176	32.8	209	33.2	80.0	10.4	61.1	7.26	4.70	22.0	8.09	80.1	0.10	6.54	1 304
NP-74-31	1 010	1.85	464	56.0	242	15.4	97.3	25.5	186	124	40.0	188	30.6	159	20.4	33.6	2.70	10.0	0.81	4.21	31.5	1.58	16.7	0.09	7.68	933
NP-74-32	820	3.12	861	116	259	62.5	349	81.4	536	260	62.8	306	46.0	242	34.2	73.1	9.31	56.2	6.54	5.65	35.2	13.2	93.9	0.14	7.34	2 124
NP-74-33	1 060	1.63	265	65.0	276	40.4	241	57.7	378	160	42.8	170	21.7	99.2	11.7	18.4	1.54	5.98	0.48	4.53	28.4	4.87	28.8	0.17	9.74	1 248
NP-74-34	700	2.99	860	54.8	92.2	13.9	71.0	15.5	101	64.8	22.6	116	27.2	203	38.4	98.0	12.2	65.9	6.88	3.73	12.0	3.02	24.4	0.12	7.70	857
NP-74-35	750	2.05	458	50.6	136	19.2	101	22.6	149	87.0	28.6	133	23.9	136	20.0	39.3	4.18	20.6	2.11	3.36	19.0	4.37	30.0	0.15	7.15	787
NP-74-36	850	1.87	221	60.6	235	31.8	187	45.0	296	133	34.6	141	18.3	80.7	9.40	14.5	1.29	6.57	0.68	4.12	23.0	3.38	23.7	0.14	10.2	999
NP-74-37	820	2.66	458	57.5	205	20.1	121	30.2	214	132	42.7	189	29.5	152	19.3	33.7	3.48	18.6	2.05	4.08	22.4	3.01	24.2	0.12	9.17	1 008
NP-74-38	1 010	4.24	1 344	192	180	258.2	1 360	282	1 678	568	142	540	72.0	375	56.1	121	13.8	71.5	7.89	12.4	18.4	63.3	176	0.36	9.76	5 544
NP-74-39	33 400	1.79	544	45.9	111	43.2	200	41.5	260	123	35.9	160	26.1	147	22.2	47.8	5.79	33.2	3.89	2.75	13.0	5.80	50.4	0.12	8.54	1 150
NP-74-40	890	2.13	732	59.0	214	21.7	128	31.2	211	127	41.6	199	34.5	209	31.4	65.3	7.90	46.0	5.10	4.05	26.2	3.16	32.9	0.10	8.17	1 159

质作用(图 6b)。Corrie 等 (2010)首次报道了 Arun Valley 地区的榴辉岩,并将榴辉岩的变质演化划分为

3 个阶段,峰期榴辉岩相的变质条件为约 670℃、 ≥ 1.5 GPa,石榴石 Lu-Hf 定年给出峰期榴辉岩相的变

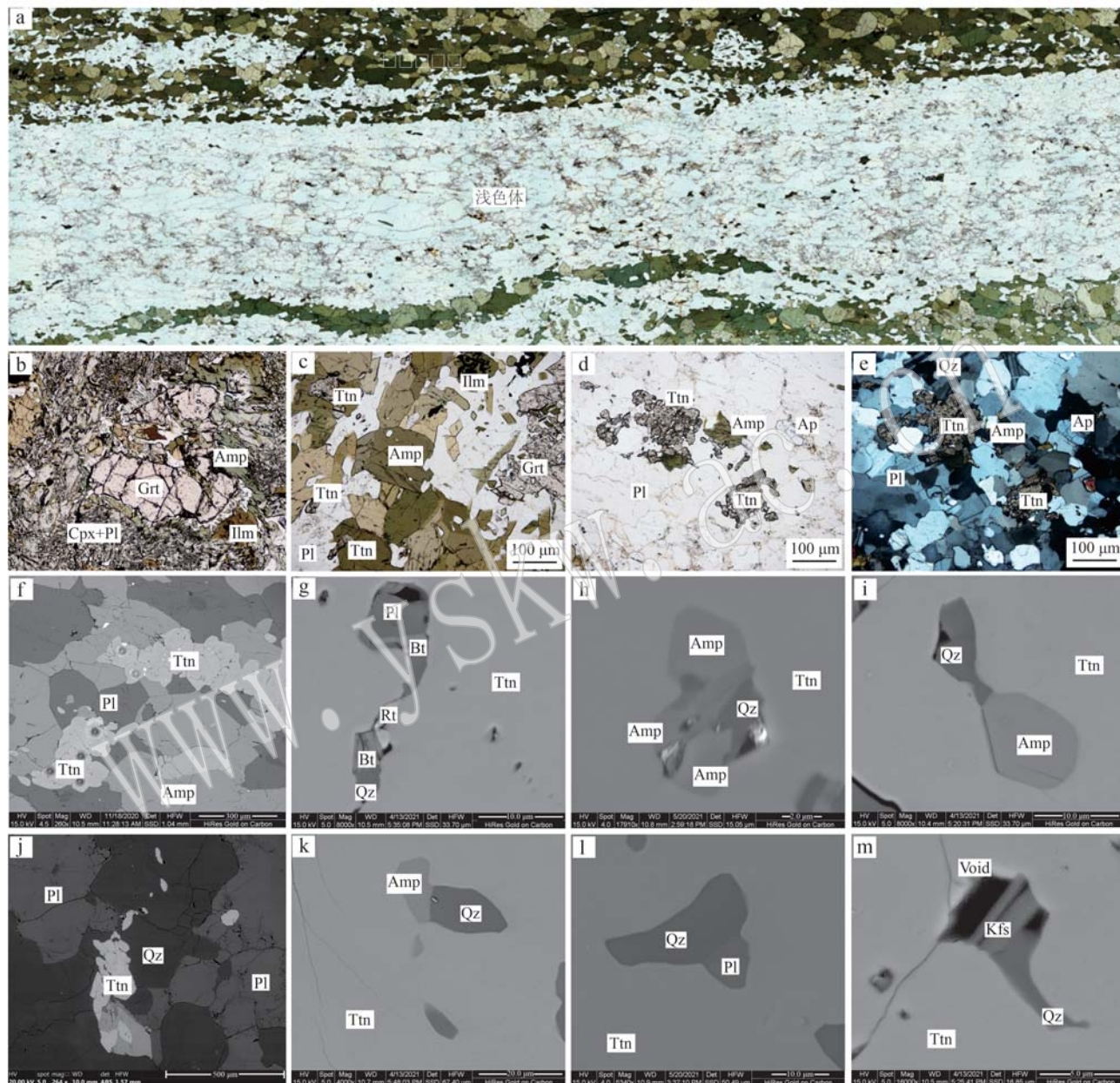


图 6 Arun Valley 地区退变榴辉岩样品显微照片及浅色体榴石中包裹体照片

Fig. 6 Microphotos of retrograde eclogites and titanite inclusions in the leucosome from Arun Valley area

a—退变榴辉岩样品 NP-36 存在明显退变榴辉岩和浅色体分界; b—退变榴辉岩显微照片, 主要矿物组合为 Grt-Cpx-Opx-Amp-Pl-Qz; c, f—退变榴辉岩中变质榴石; d, e, j—浅色体中转熔榴石; g, h, i, k, l, m—转熔榴石中熔体包裹体 Bt-Pl-Rt-Qz, Amp-Qz, Pl-Qz, Kfs-Qz; 矿物缩写据 Whitney 和 Evans (2010): Grt—石榴子石; Cpx—单斜辉石; Amp—角闪石; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Ilm—钛铁矿; Ttn—榴石; Kfs—钾长石; Qz—石英

a—retrograded eclogite sample NP-36 exhibits clear boundaries between retrograded eclogite and leucosome; b—mineral in the retrograded eclogite, consisting of Grt-Cpx-Opx-Amp-Pl-Qz; c, f—metamorphic titanite in retrograded eclogite; d, e, j—peritectic titanite in leucosome; g, h, i, k, l, m—the peritectic titanites with melt inclusions Bt-Pl-Rt-Qz, Amp-Qz, Pl-Qz, Kfs-Qz; Mineral abbreviations are after Whitney and Evans (2010): Grt—garnet; Cpx—clinopyroxene; Amp—amphibole; Bt—biotite; Pl—plagioclase; Ilm—ilmenite; Ttn—titanite; Kfs—K-feldspar; Qz—quartz

质时代为 23 ~ 16 Ma; 麻粒岩相的变质条件为约 780°C、1.2 GPa; 后期角闪岩相叠加的温压条件为约 675°C、0.6 GPa, 时代为约 14 Ma。

对退变榴辉岩样品 NP-21 的榴石进行 64 次详细分析, 激光分析点的 Th、U 含量变化同样较大, Th 含量在 $1.1 \times 10^{-6} \sim 148 \times 10^{-6}$ 之间, U 含量在 $4.8 \times 10^{-6} \sim 521 \times 10^{-6}$ 之间, Th、U 含量均比样品 NP-24 的榴石低, 但大部分 Th/U 值仍在 0.13 ~ 1.39 之间。根据 Th/U 值进行榴石成因的划分, 高 Th/U 值 (>1.5) 可能是岩浆型榴石, 而变质成因榴石的 Th/U 值较低 (<1.5 , Gao *et al.*, 2012)。由于榴石相较锆石具有较高普通 Pb 含量, 因此我们对样品点用 Tera-Wasserburg 图解进行做图, 所获得的下交点年龄为变质年龄, 可消除普通 Pb 的影响。64 个样品点的下交点年龄为 14.1 ± 1.6 Ma (2σ , MSWD = 1.4; 图 7c)。在稀土元素图解中, 样品 NP-21 的榴石具有富集 MREE 亏损 HREE 的特征, 部分存在 Eu 正异常 (图 7d)。样品 NP-21 的榴石 Zr 温度计限制在 725 ~ 805°C。对退变榴辉岩样品 NP-24 的榴石共进行 24 次详细分析, 样品点 Th、U 含量变化较大, Th 在 $12 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 之间, U 在 $15.1 \times 10^{-6} \sim 532 \times 10^{-6}$ 之间, 且 Th/U = 0.36 ~ 1.40。24 个激光分析点给出的样品下交点年龄为 14.2 ± 0.4 Ma (2σ , MSWD = 0.84; 图 7e)。在球粒陨石标准化图解中, 样品 NP-24 的榴石具有轻微富集 LREE, 亏损 HREE 特征, 多数无 Eu 负异常, 极少数有 Eu 的正异常 (图 7f)。样品 NP-24 的榴石 Zr 温度计限制在 785 ~ 860°C。我们分析了样品 NP-74 中 38 个榴石颗粒的 U-Pb 年龄, 在 Tera-Wasserburg 等时线图中, 该样品给出 15.3 ± 2.5 Ma (2σ , MSWD = 0.86) 的下交点年龄 (图 7g)。在球粒陨石标准化图解中, 呈现“凸”型 REE 特征, 富集 MREE 亏损 HREE, 且具有 Eu 负异常 (图 7h)。样品 NP-74 的榴石的 Zr 温度计限制在 705 ~ 780°C。3 个退变榴辉岩样品的榴石稀土元素配分模式均具有亏损 HREE 的特征 (图 7d、7f、7h)。Scibiorski 等 (2019) 提出 Dy/Yb 值可作为榴石结晶时体系中是否存在石榴子石的判断指标, 我们分析的所有榴石颗粒均具有 Dy/Yb >2 的特征, 结合其亏损的 HREE 特征, 指示变质榴石与石榴子石是共存的。在锆石中, Eu 异常通常与斜长石存在有关, 虽然有时 Eu 负异常也可能反映了原岩的继承特征 (Rubatto, 2002), 这些因素也可能影响榴石的 Eu 含量。榴石的微量元素含量在一定程度上取决于结晶

过程中局部元素的可用性 (Lucassen *et al.*, 2011)。在 3 个样品中, 榴石的 Eu 异常范围从负到正, 由于斜长石一直存在于麻粒岩相后期至角闪岩相中, 所以认为在该样品中 Eu 的异常与斜长石没有明显相关性。

近期, 我们对 Arun Valley 地区出露的榴辉岩利用原位激光微区小束斑 (5 和 10 μm) 定年方法, 对石榴子石中的锆石包裹体进行了 U-Pb 年代学分析, 获得了约 24 Ma 的年龄 (待发表数据), 认为其代表了榴辉岩相的变质时代, 同时也对退变榴辉岩样品 NP-24 的分选锆石进行年代学分析, 获得了约 17 Ma 的年龄 (待发表数据), 认为由于高温麻粒岩相叠加, 锆石 U-Pb 体系重置, 其为后期麻粒岩相叠加时代。同时, 在 Ama Drime 地区退变榴辉岩榴石给出 15.4 ± 0.2 Ma 和 14.3 ± 0.8 Ma 的年龄, 也被解释为退变质阶段中压麻粒岩相或角闪岩相的变质年龄 (Wang *et al.*, 2021a; Dong *et al.*, 2022)。结合稀土元素配分模式、榴石 Zr 温度计和前人研究, 我们认为 Arun Valley 地区的变质榴石定年结果可以说明退变榴辉岩在 15 ~ 14 Ma 退变至麻粒岩相至高角闪岩相。

3.2 应用 2: 中喜马拉雅转熔榴石 U-Pb 定年限定退变榴辉岩的深熔时代

中喜马拉雅经历超高温麻粒岩相叠加, 为厘定中喜马拉雅退变榴辉岩的深熔时限, 我们同样对 Arun Valley 地区出露的退变榴辉岩 (NP-36M) 及深熔浅色体 (NP-36L) 中的榴石进行了 U-Pb 年代学分析。Wang 等 (2021a) 和 Wu 等 (2022) 指出中喜马拉雅榴辉岩在中新世叠加了超高温变质作用 ($>900^\circ\text{C}$), 并发生了部分熔融。退变榴辉岩部分熔融产生的浅色体主要由长石、石英和少量的角闪石组成, 地球化学上具有高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 和 Sr/Y 值, 与埃达克岩特征一致 (Liu *et al.*, 2022)。Liu 等 (2023) 对退变榴辉岩 (NP-36M) 及浅色体 (NP-36L) 中的锆石进行了 10 μm 小束斑 U-Pb 定年, 退变榴辉岩锆石 U-Pb 定年给出 13.5 ± 0.9 Ma ($n=5$, MSWD = 0.36) 的变质年龄, 浅色体幔部锆石 U-Pb 年代学给出下交点年龄 17.3 ± 3.2 Ma ($n=6$, MSWD = 3.7), 而边部锆石年龄为 13.9 ± 0.2 Ma ($n=6$, MSWD = 1.3)。

我们对于退变榴辉岩和浅色体中的榴石进行了微量元素测试并对浅色体中分离的榴石进行 U-Pb 年代学分析。与退变榴辉岩中的榴石 (图 6c、6f) 相比, 浅色体中的榴石呈自形、半自形并且含有角闪

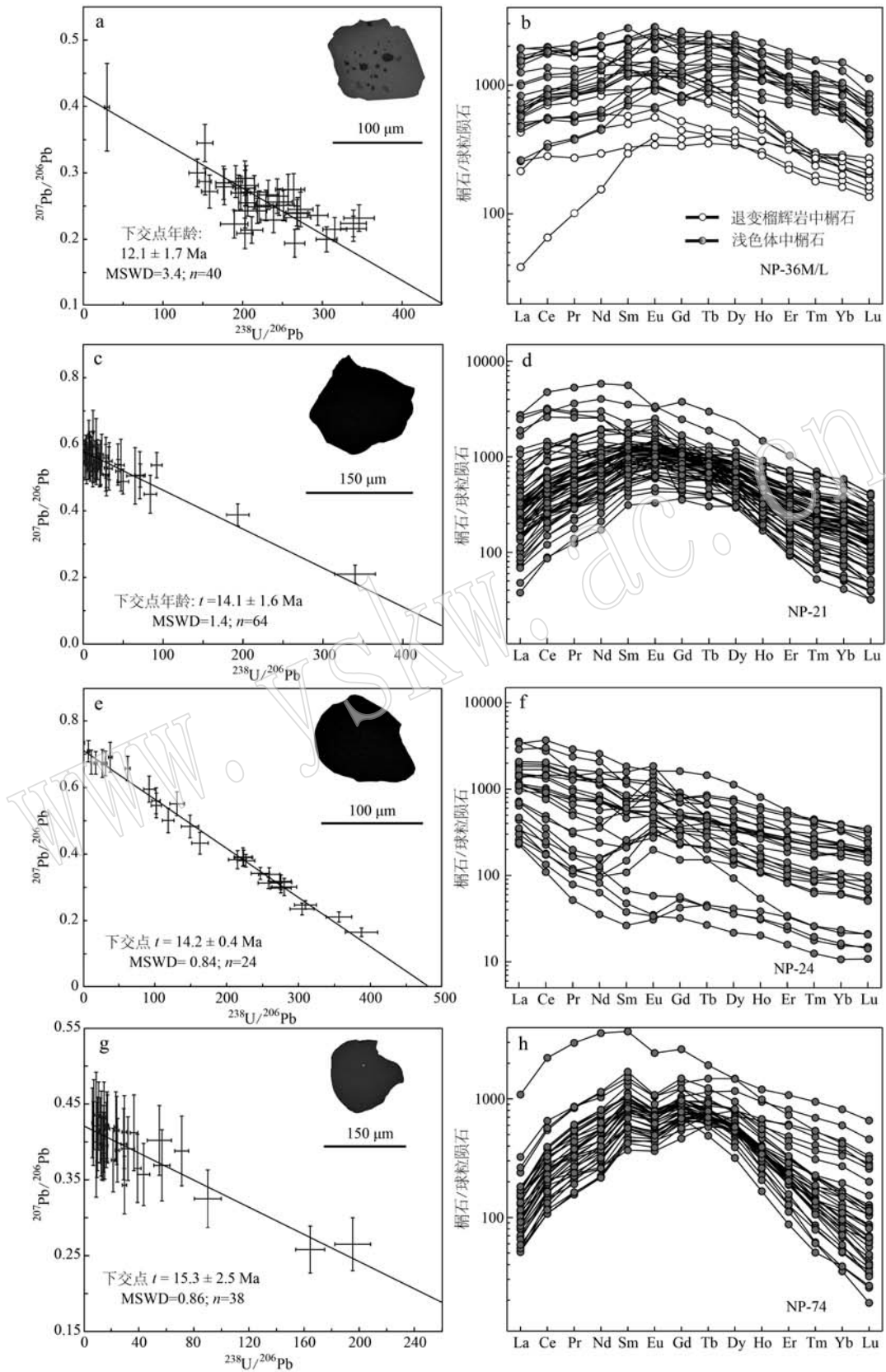


图7 Arun Valley 地区榍石 Tera-Wasserburg 图解(a、c、e、g)及稀土元素配分图解(b、d、f、h)
Fig. 7 Titanite Tera-Wasserburg diagrams and chondrite-normalized REE patterns from the Arun Valley area

石、长石、石英、金红石以及熔体包裹体(图 6d、6e、6j)。另外,两类型榍石均呈现出凸型的 REE 特征,但浅色体中的榍石具有更高的 REE、Nb、Ta、Th、U 含量和 Th/U 值及较低的 Sc 含量和 Nb/Ta 值,这些特征与部分熔融过程中角闪石和副矿物(如磷灰石、褐帘石)的分解是一致的(图 7b、图 8)。另外,部分熔融过程中 Nb 和 Ta 倾向于进入到榍石中,考虑到 $D_{\text{Nb}/\text{Ta}}(\text{榍石/熔体})$ 小于 1,与熔体平衡的榍石则具有较低的 Nb/Ta 值(Wang *et al.*, 2021b)。基于浅色体中榍石的地球化学特征及其中的熔体包裹体,我们认为浅色体中的榍石为部分熔融过程中产生的转熔榍石,而退变榴辉岩中的榍石则是退变质过程中早期金红石的分解产物。其次我们分析了浅色体中 40 个榍石颗粒的 U-Pb 年龄,在 Tera-Wasserburg 等时线图中,该样品给出 $12.1 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (2σ , $n=40$, MSWD

$=3.4$)的下交点年龄(图 7a)。样品 NP-36 中转熔榍石定年结果与榴辉岩中锆石以及浅色体边部锆石的 U-Pb 分析结果是一致的,代表了中喜马拉雅榴辉岩部分熔融的时代,而浅色体锆石幔部年龄(约 17 Ma)可能代表高压麻粒岩相的退变年龄。因此本研究认为中喜马拉雅榴辉岩在中中新世折返阶段发生了减压熔融,部分熔融的时间略晚于峰期变质的时间。

转熔榍石和变质榍石在退变榴辉岩部分熔融及变质演化过程中广泛存在。转熔榍石具有高的 Nb、Ta 含量,但 Nb/Ta 值较低,具有高的 Y 含量且 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} < 4$ 。变质榍石 Nb、Ta 含量均低于转熔榍石, Nb/Ta 值高于转熔榍石,具有相对较低的 Y 含量,且 $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} > 2$ (图 8、图 9)。因此, Nb/Ta 值可能成为区分转熔榍石与变质榍石的重要指示参数。

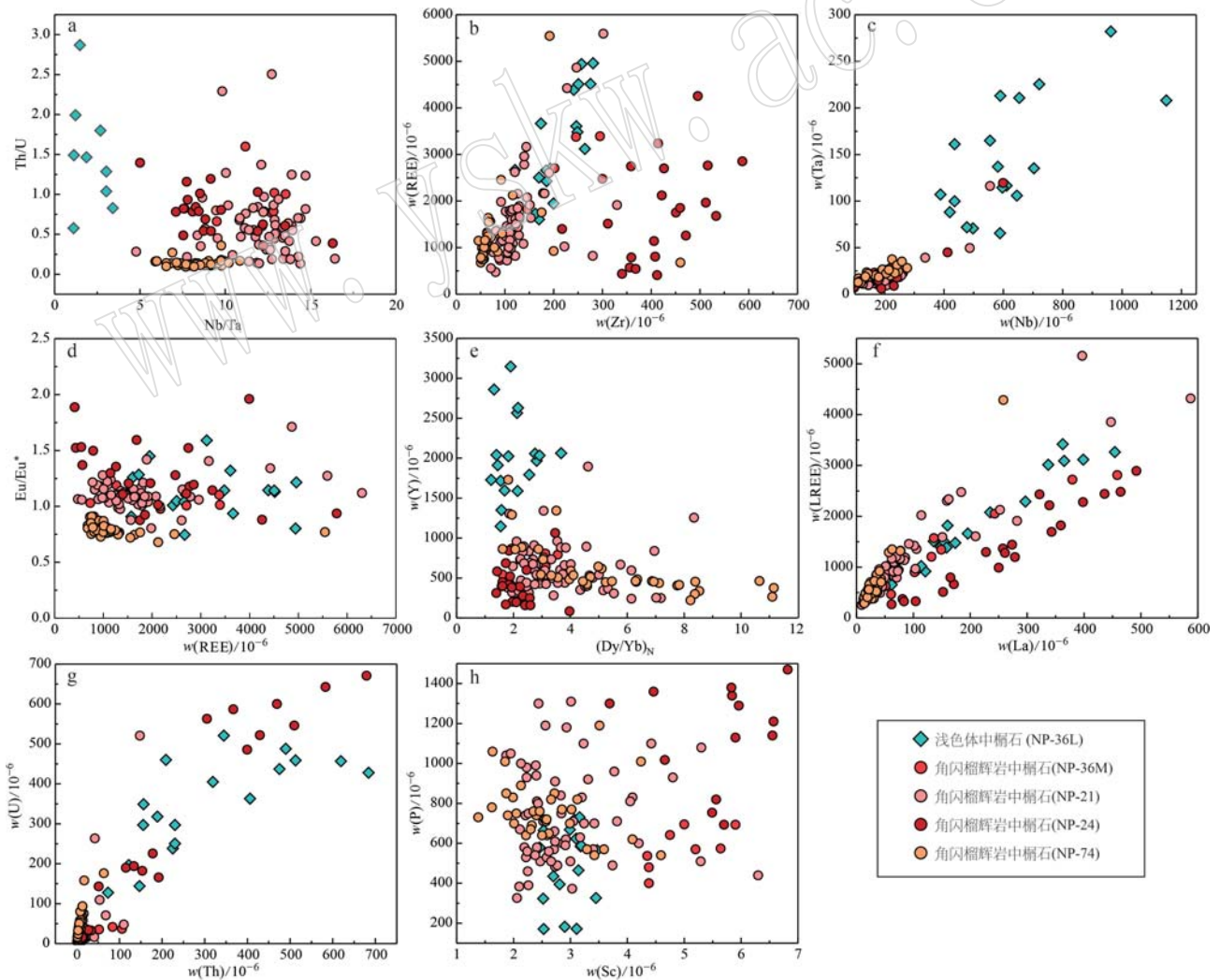


图 8 Arun Valley 地区转熔榍石与变质榍石微量元素图

Fig. 8 Diagrams of trace elements for metamorphic and peritectic titanites from Arun Valley area

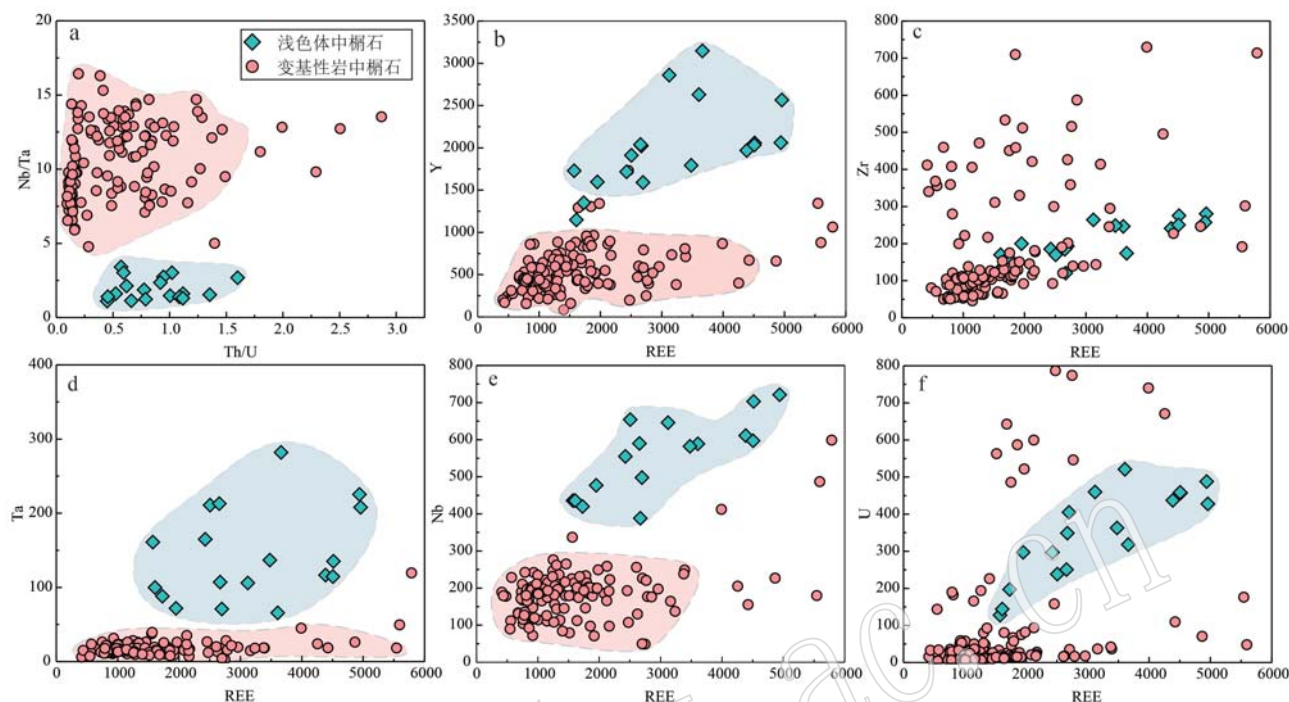


图9 转熔榍石与变质榍石地球化学特征

Fig. 9 Geochemical characteristics of metamorphic and peritectic titanites

样品退变榴辉岩和浅色体中发育两种榍石,与退变榴辉岩样品 NP-21、NP-24、NP-74 分别计算榍石/全岩稀土元素配分系数,结果如图 10。转熔榍石的稀土元素配分系数均高于变质榍石,因此在变基性岩部分熔融过程中,榍石与熔体的分离将导致熔体亏损 REE 元素,且相对于 LREE 和 HREE 来说,榍石更易富集 MREE,因此导致熔体的稀土元素配分呈现 MREE 亏损特征。榍石/全岩配分系数图解与

榍石稀土元素配分模式图趋势相近。

4 结论

(1) 本文利用 LA-Q-ICP-MS,通过设置剥蚀束斑、频率以及能量密度的实验条件,确定了适合本实验室榍石 U-Pb 定年的最佳实验条件为 $5 \sim 8 \text{ J/cm}^2$ 、 5 Hz 和 $44 \mu\text{m}$,并且准确测定了 3 种榍石标样 BLR-1 (1047 Ma)、Ontario (1051 Ma) 以及 Pakistan (21 Ma) 的年龄。

(2) 对中喜马拉雅榴辉岩中的变质榍石及深熔浅色体中的转熔榍石进行的 U-Pb 定年结果表明,中喜马拉雅榴辉岩在 $15 \sim 14 \text{ Ma}$ 退变质到麻粒岩相-高角闪岩相,随后在约 12 Ma 发生了部分熔融。

(3) 转熔榍石和变质榍石的地球化学特征表明,转熔榍石具有高的 Nb、Ta、Y 含量以及低的 Nb/Ta 值, $(\text{Dy}/\text{Yb})_N < 4$;变质榍石具有相对低的 Nb、Ta、Y 含量, Nb/Ta 值高于转熔榍石且 $(\text{Dy}/\text{Yb})_N > 2$ 。

References

Aleinkoff J N, Wintsch R P, Fanning C M, *et al.* 2002. U-Pb geochronology of zircon and polygenetic titanite from the Glastonbury com-

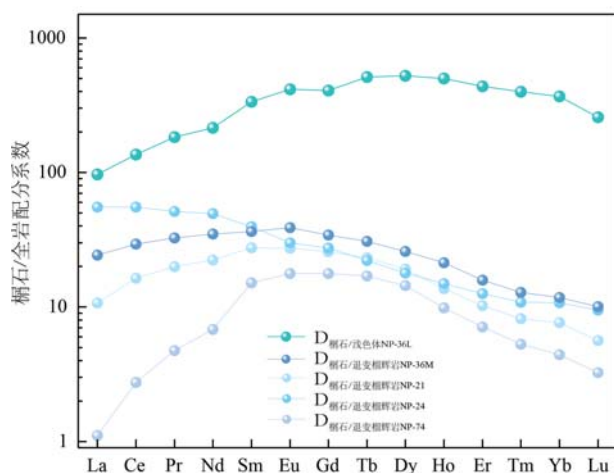


图10 榍石/全岩配分系数

Fig. 10 Titanite/whole rock partition coefficients

- plex, Connecticut, USA: An integrated SEM, EMPA, TIMS, and SHRIMP study[J]. *Chemical Geology*, 188(1~2): 125~147.
- Chen Y X, Zhou K, Zheng Y F, *et al.* 2016. Polygenetic titanite records the composition of metamorphic fluids during the exhumation of ultrahigh-pressure metagranite in the Sulu orogen[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(6): 573~594.
- Corrie S L, Kohn M J and Vervoort J D. 2010. Young eclogite from the greater Himalayan sequence, arun valley, eastern Nepal: *P-T-t* path and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3~4): 406~416.
- Donaldson D G, Webb A A G, Menold C A, *et al.* 2013. Petrochronology of Himalayan ultrahigh-pressure eclogite[J]. *Geology*, 41(8): 835~838.
- Dong X, Zhang Z M, Tian Z L, *et al.* 2022. Protoliths and metamorphism of the central Himalayan eclogites: Zircon/titanite U-Pb geochronology, Hf isotope and geochemistry[J]. *Gondwana Research*, 104: 39~53.
- Faak K, Chakraborty S and Dasgupta S. 2012. Petrology and tectonic significance of metabasite slivers in the Lesser and Higher Himalayan domains of Sikkim, India[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(6): 599~622.
- Gao X Y, Zheng Y F, Chen Y X, *et al.* 2012. Geochemical and U-Pb age constraints on the occurrence of polygenetic titanites in UHP metagranite in the Dabie orogen[J]. *Lithos*, 136: 93~108.
- Green T H and Pearson N J. 1986. Rare-earth element partitioning between sphene and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature[J]. *Chemical Geology*, 55(1~2): 105~119.
- Grujic D, Warren C J and Wooden J L. 2011. Rapid synconvergent exhumation of Miocene-aged lower orogenic crust in the eastern Himalaya[J]. *Lithosphere*, 3(5): 346~366.
- Hammerli J, Kemp A I S and Spandler C. 2014. Neodymium isotope equilibration during crustal metamorphism revealed by in situ microanalysis of REE-rich accessory minerals[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 392: 133~142.
- Hayden L A, Watson E B and Wark D A. 2008. A thermobarometer for sphene (titanite)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 529~540.
- Hu Huan, Wang Rucheng, Shao Chunjing, *et al.* 2020. In situ LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic dating of monazite based on the monazite standard Trebilcock[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 56(6): 763~773 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1~2): 47~69.
- Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, *et al.* 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: Sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6): 589~599.
- Kapp P, Manning C E and Tropper P. 2009. Phase-equilibrium constraints on titanite and rutile activities in mafic epidote amphibolites and geobarometry using titanite-rutile equilibria[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(7): 509~521.
- Kellett D A, Cottle J M and Smit M. 2014. Eocene deep crust at amadri, Tibet: Early evolution of the Himalayan Orogen[J]. *Lithosphere*, 6(4): 220~229.
- Kohn M J. 2017. Titanite petrochronology[J]. *Petrochronology: Methods and Applications*, 83: 419~441.
- Lanari P, Riel N, Guillot S, *et al.* 2013. Deciphering high-pressure metamorphism in collisional context using microprobe mapping methods: Application to the stak eclogitic massif (northwest Himalaya)[J]. *Geology*, 41(2): 111~114.
- Lei X F, Jiang S Y, Su H M, *et al.* 2021. Hydrothermal titanite U-Pb age and geochemistry as a reliable chronometer and genetic tracer for quartz vein-type tungsten deposit at Qipangou of Qinling orogenic belt, Central China[J]. *Ore Geology Reviews*, 135: 104246.
- Li Q Y, Zhang L F, Fu B, *et al.* 2019. Petrology and zircon U-Pb dating of well-preserved eclogites from the Thongm n area in central Himalaya and their tectonic implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 37(2): 203~226.
- Liu S Q, Zhang G B, Zhang L F, *et al.* 2022. Diverse anatexis in the main central thrust zone, eastern Nepal: Implications for melt evolution and exhumation process of the Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 63(3): egac003.
- Liu S Q, Zhang G B, Zhang L F, *et al.* 2023. Omphacite melting and the destruction of early high-pressure rock records[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(11): e2023JB027395.
- Lucassen F, Dulski P, Abart R, *et al.* 2010. Redistribution of HFSE elements during rutile replacement by titanite[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 279~295.
- Lucassen F, Franz G, Dulski P, *et al.* 2011. Element and Sr isotope signatures of titanite as indicator of variable fluid composition in hydrated eclogite[J]. *Lithos*, 121(1~4): 12~24.
- Ludwig K R. 2012. User's manual for isoplot 3.75: A geochronological

- toolkit for Microsoft Excel; California [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (5): 75.
- Ma Q, Evans N J, Ling X X, *et al.* 2019. Natural titanite reference materials for in situ U-Pb and Sm-Nd isotopic measurements by LA-(MC)-ICP-MS [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 43(3): 355~384.
- Mukherjee B K and Sachan H K. 2001. Discovery of coesite from Indian Himalaya: A record of ultra-high pressure metamorphism in Indian continental crust [J]. *Current Science*, 81(10): 1 358~1 361.
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, *et al.* 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2 508~2 518.
- Prowatke S and Klemme S. 2005. Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 695~709.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 184(1~2): 123~138.
- Scibiorski E, Kirkland C L, Kemp A I S, *et al.* 2019. Trace elements in titanite: A potential tool to constrain polygenetic growth processes and timing [J]. *Chemical Geology*, 509: 1~19.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plešovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249(1~2): 1~35.
- Song S W, Mao J W, Xie G Q, *et al.* 2019. In situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace element analysis of hydrothermal titanite from the giant Zhuxi W (Cu) skarn deposit, South China [J]. *Mineralium Deposita*, 54(4): 569~590.
- Spencer K J, Hacker B R, Kylander-Clark A R C, *et al.* 2013. Campaign-style titanite U-Pb dating by laser-ablation ICP: Implications for crustal flow, phase transformations and titanite closure [J]. *Chemical Geology*, 341: 84~101.
- Sun J F, Yang J H, Wu F Y, *et al.* 2012. In situ U-Pb dating of titanite by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 2 506~2 516.
- Tiepolo M, Oberti R and Vannucci R. 2002. Trace-element incorporation in titanite: Constraints from experimentally determined solid/liquid partition coefficients [J]. *Chemical Geology*, 191(1~3): 105~119.
- Walters J B, Cruz-Uribe A M, Song W J, *et al.* 2022. Strengths and limitations of in situ U-Pb titanite petrochronology in polymetamorphic rocks: An example from western Maine, USA [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 40(6): 1 043~1 066.
- Wang J M, Lanari P, Wu F Y, *et al.* 2021a. First evidence of eclogites overprinted by ultrahigh temperature metamorphism in Everest east, Himalaya: Implications for collisional tectonics on early earth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 558: 116760.
- Wang L, Gao X Y, Chen R X, *et al.* 2021b. Zircon and titanite behaviors during partial melting of metabasite in the post-collisional stage: Constraints from garnet pyroxenite in the Dabie Orogen, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 205: 104615.
- Wang Y H, Zhang L F, Zhang J J, *et al.* 2017. The youngest eclogite in central Himalaya: P-T path, U-Pb zircon age and its tectonic implication [J]. *Gondwana Research*, 41: 188~206.
- Weinberg R F and Hasalová P. 2015. Water-fluxed melting of the continental crust: A review [J]. *Lithos*, 212: 158~188.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for u-th-pb, lu-hf, trace element and ree analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Wu C G, Zhang L F, Li Q Y, *et al.* 2022. Tectonothermal transition from continental collision to post-collision: Insights from eclogites overprinted in the ultrahigh-temperature granulite facies (Yadong region, central Himalaya) [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 40(5): 955~981.
- Xia Q X, Gao P, Yang G, *et al.* 2019. The origin of garnets in anatectic rocks from the eastern Himalayan syntaxis, southeastern Tibet: Constraints from major and trace element zoning and phase equilibrium relationships [J]. *Journal of Petrology*, 60(11): 2 241~2 280.
- Zhang D D, Ding L, Chen Y, *et al.* 2022. Two contrasting exhumation scenarios of deeply subducted continental crust in North Pakistan [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(2): e2021GC010193.
- Zhou K, Chen Y X and Zheng Y F. 2021. Geochemistry of polygenetic titanite traces metamorphic and anatectic processes during the exhumation of deeply subducted continental crust [J]. *Lithos*, 398: 106314.

附中文参考文献

- 胡欢, 王汝成, 邵春景, 等. 2020. 基于独居石标样 Trebilcock 的激光剥蚀等离子体质谱微区原位 U-Th-Pb 同位素定年方法 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 56(6): 763~773.