

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.110>



亚东地区高喜马拉雅结晶岩系部分熔融的时限:来自乃堆拉混合岩锆石U-Pb年代学的约束

苟正彬, 刘函, 段瑶瑶, 李俊, 张士贞

中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081

摘要: 高喜马拉雅结晶岩系由中—高级变质岩和淡色花岗岩组成, 是研究喜马拉雅造山带形成与演化的天然实验室。高喜马拉雅结晶岩系混合岩和淡色花岗岩中锆石和独居石的定年结果往往是分散的, 对这些定年结果的解释还存在争议, 严重制约了对高喜马拉雅结晶岩系变质、部分熔融作用的起始时间和持续过程的理解。对造山带中段亚东地区高喜马拉雅结晶岩系上部构造层位的乃堆拉混合岩进行了锆石U-Pb年代学研究。研究结果显示, 乃堆拉混合岩暗色体给出了29.1~24.7 Ma的进变质和部分熔融的时间, 混合岩浅色体获得了25.0~13.7 Ma的退变质和熔体结晶的时间, 表明亚东地区高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融作用大约开始于30 Ma并持续到13 Ma, 暗示它是一个长期、持续的过程。亚东地区高喜马拉雅结晶岩系发生部分熔融的时间明显早于藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时间, 部分熔融可能在高喜马拉雅结晶岩系俯冲过程中就已经发生了。相关成果为建立造山带构造演化模型提供了新信息。

关键词: 高喜马拉雅结晶岩系; 部分熔融; 持续过程; 混合岩; 锆石U-Pb; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2020)08-2894-11

收稿日期: 2020-04-13

Timescales of Partial Melting in Yadong Region of Higher Himalayan Crystalline Sequence: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology of Naiduila Migmatites

Gou Zhengbin, Liu Han, Duan Yaoyao, Li Jun, Zhang Shizhen

Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: The Higher Himalayan Crystalline Sequence is composed mainly of middle-high grade metamorphic rocks and leucogranites, forming a natural laboratory for studying the formation and evolution of the Himalayan orogen. However, the geological significance of the U-Pb ages remains controversial because zircons and monazites of the migmatites and leucogranites from the Higher Himalayan Crystalline Sequence commonly have yielded variable U-Pb ages, which significantly restricts our understanding of timing and duration of metamorphism, partial melting and melt crystallization of the orogen. Here it presents zircon U-Pb geochronological study of the Naiduila migmatites in Yadong region from the upper structural level of the Higher Himalayan Crystalline Sequence, middle Himalaya. The results show that zircons from the melanosomes of the migmatites in Naiduila area have variable U-Pb ages ranging from 29.1 to 24.7 Ma, and zircons from the leucosomes of the migmatites yield various U-Pb ages of 25.0–13.7 Ma. The former may be interpreted as the timing and duration of prograde metamorphism and partial melting, and the latter represents timescales of retrogressive metamorphism and melt crystallization. Therefore, it is

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41802071, 41773026); 中国地质调查局项目(No. DD20190053)。

作者简介: 苟正彬(1986—), 男, 博士, 主要从事大陆造山带形成与构造演化研究。ORCID:0000-0002-0975-3557. E-mail: gzb3792@163.com

引用格式: 苟正彬, 刘函, 段瑶瑶, 等, 2020. 亚东地区高喜马拉雅结晶岩系部分熔融的时限: 来自乃堆拉混合岩锆石U-Pb年代学的约束. 地球科学, 45(8):2894–2904.

proposed that the partial melting of the Higher Himalayan Crystalline Sequence in the Yadong region initiated at ca. 30 Ma and lasted to ca. 13 Ma, indicating that it is a long-term and sustained process. The study also indicates that the timing of partial melting of the Higher Himalayan Crystalline Sequence is earlier than the starting activation of the South Tibetan detachment and the Main Central Thrust. This may further indicates that the partial melting occurred during subduction. The study provides new information on the structural evolution model of the orogen.

Key words: Higher Himalayan Crystalline Sequence; partial melting; duration; migmatite; zircon U-Pb; geochronology.

0 引言

喜马拉雅造山带是印度和亚洲大陆在新生代发生陆陆碰撞的产物,是建立碰撞造山理论和检验各种造山带构造演化模型的天然实验室(王立等,2000; Yin and Harrison, 2000; 潘桂棠等,2001)。位于造山带核部的高喜马拉雅结晶岩系,代表着俯冲后又折返上来的印度大陆地壳,普遍经历了变质、变形作用改造和深熔作用活动,形成了大量中一高级变质岩和淡色花岗岩,是研究喜马拉雅造山带部分熔融作用与混合岩成因的理想载体。

近年来关于喜马拉雅造山带的变质和部分熔融作用被深入研究,取得了大量重要进展(Patiño-Douce and Harris, 1998; Guilmette *et al.*, 2011; Groppe *et al.*, 2012; 李旺超等,2015; Gou *et al.*, 2016, 2019; 丁慧霞等,2017; Zhang *et al.*, 2017; 付建刚等,2018; 张林奎等,2018; 张泽明等,2018; 崔浩杰等,2019),为揭示喜马拉雅造山带的构造演化历史提供了重要限定。然而,有关高喜马拉雅结晶岩系部分熔融作用的机制、熔融程度及产生的熔体含量与成分,特别是部分熔融作用的起始时间和持续过程等研究均未得到很好的限定。

本文选择喜马拉雅造山带中段亚东地区乃堆拉口岸附近的混合岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究,明确了高喜马拉雅结晶岩系经历了长期持续的变质和部分熔融作用过程,而非多期、多阶段部分熔融的产物;并且提出高喜马拉雅结晶岩系发生部分熔融作用的起始时间可能显著早于藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时代。相关认识为进一步完善喜马拉雅造山带的形成与演化提供了重要信息。

1 地质背景及样品采集

号称“地球第三极”的喜马拉雅造山带位于青藏高原南部,是世界上最大且最年轻的碰撞造山带。其东西向延伸长达2 500 km,呈弧形展布,主要由4个

近平行的构造单元组成,从北到南依次为特提斯喜马拉雅系列、高喜马拉雅结晶岩系、低喜马拉雅岩系和次喜马拉雅单元,它们之间的界线分别为藏南拆离系(STD)、主中央逆冲断裂(MCT)和主边界逆冲断裂(MBT)(图1a; Yin and Harrison, 2000)。

特提斯喜马拉雅岩系主要由晚元古代—中生代的低级变质岩、未明显变质的沉积岩和淡色花岗岩组成,其下部经历了绿片岩相或绿帘角闪石相等变质作用,向上变质程度逐渐降低。高喜马拉雅结晶岩系是喜马拉雅造山带的核心,主要由元古代—古生代的高级变质岩、混合岩和不同类型的岩浆岩组成,经历了麻粒岩相甚至到榴辉岩相变质作用,混合岩化作用普遍发育。低喜马拉雅岩系主要由一系列浅变质—未变质的沉积岩组成,夹杂一定的岩浆岩,主要经历了绿片岩相变质作用。次喜马拉雅单元为一套磨拉石组合。位于特提斯喜马拉雅岩系和低喜马拉雅岩系之间的高喜马拉雅结晶岩系变质程度明显高于上、下两个构造单元,构成了典型的夹心(三明治)构造。

研究区位于西藏亚东县西南方向约30 km的乃堆拉口岸附近,构造上位于高喜马拉雅结晶岩系的上部构造层位(图1b)。主要由副片麻岩、正片麻岩、混合岩和淡色花岗岩组成。李旺超等(2015)和Zhang *et al.* (2017)对喜马拉雅造山带中段亚东地区泥质麻粒岩的研究表明,亚东地区高喜马拉雅结晶岩系经历了麻粒岩相变质作用和部分熔融,峰期矿物组合为石榴石+斜长石+钾长石+黑云母+蓝晶石+石英,峰期变质条件为800~835 °C和1 280~1 400 MPa。如此高的温度和压力必然导致高喜马拉雅结晶岩系中的各种岩石,包括泥质、长英质岩石甚至基性变质岩普遍发生不同程度的部分熔融和混合岩化,生成各种混合岩和淡色花岗质熔体。野外地质调查也证明,亚东地区高喜马拉雅结晶岩系中发育大量形态各异且分布不均匀的混合岩浅色体,其宽度可从几毫米至几十厘米。它们或近原地熔融呈团块状、布丁状;或平行于片(麻)理呈层状、条

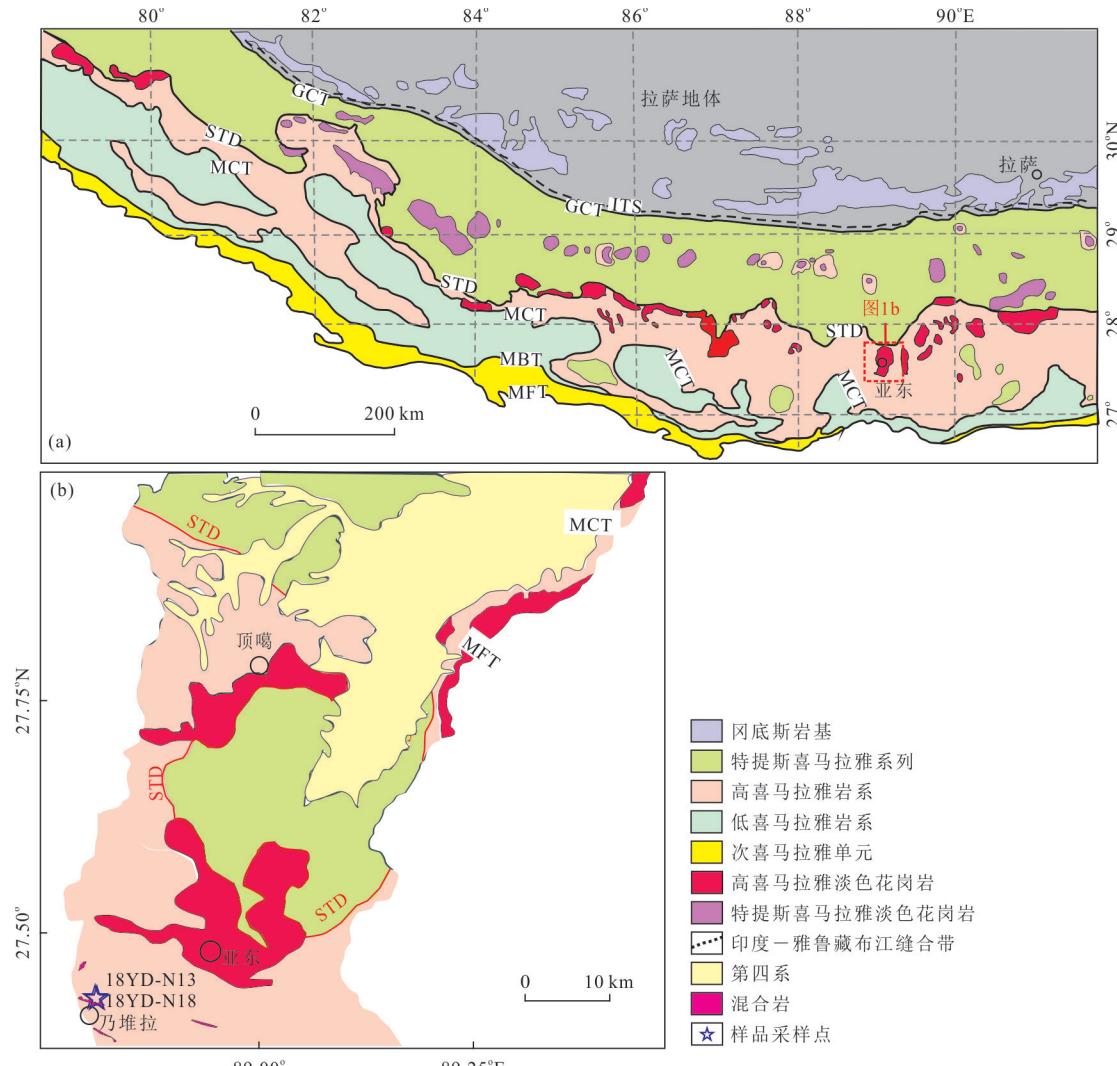


图 1 青藏高原地质简图(a)和研究区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified geological maps of the Tibetan Plateau (a) and the study area (b)

GCT. 大反向逆冲断裂; STD. 藏南拆离系; MCT. 主中央逆冲断裂; MBT. 主边界逆冲断裂; MFT. 主前缘逆冲断裂

带状;或切穿片(麻)理呈网脉状、囊状(图 2a~2d).本文用于锆石 U-Pb 年代学研究的乃堆拉混合岩样品采自于图 2a. 按照 Sawyer(2008) 的分类标准,该混合岩浅色体应为源区浅色体(in source leucosome). 乃堆拉混合岩暗色体呈斑状变晶结构,片状或条带状构造. 岩石主要由石榴石、黑云母、矽线石、堇青石、斜长石、石英和少量钾长石组成. 石榴石变斑晶幔部含有斜长石、黑云母和石英包体,边部被矽线石+黑云母+斜长石+石英组成的后成合晶替代. 基质中的斜长石的边缘常呈港湾状,部分斜长石中偶见蠕虫状石英(图 3a、3b). 混合岩浅色体呈不等粒花岗结构,块状构造(图 3c、3d),主要由斜长石和石英组成,含少量黑云母和石榴石. 斜长石多呈自形板状,相互接触形成框架结构. 石英呈他形粒状充填于斜长石颗粒间(图 3c、3d).

2 分析方法

锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成. 测试仪器为 LA-ICP-MS, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e. 激光束斑直径和频率分别为 $32 \mu\text{m}$ 和 5 Hz. 在实验操作过程中,选取 91500 和 NIST610 作为外标分别进行 U-Pb 同位素和微量元素分馏校正. 详细的仪器操作条件见 Liu *et al.* (2010). 利用 ICPMSDataCal 软件对原始分析数据进行离线处理,并用 ISOPLOT 软件绘制锆石样品 U-Pb 年龄谐和图和计算年龄加权平均值 (Ludwig, 2003).



图2 混合岩野外露头.

Fig. 2 Field outcrops of the studied migmatites

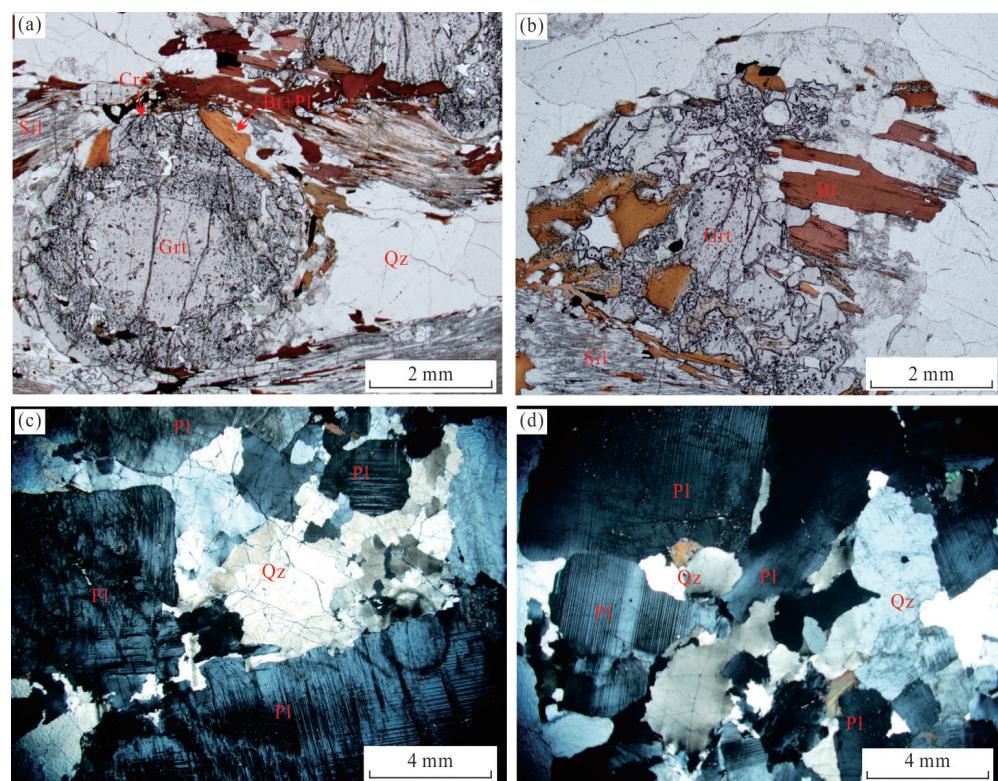


图3 混合岩暗色体(a,b)和浅色体(c,d)样品显微镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of the melanosomes (a, b) and leucosomes (c, d)

Qz.石英;Pl.斜长石;Bt.黑云母;Grt.石榴石;Crd.堇青石;Sil.矽线石

3 锆石 U-Pb 定年

亚东地区乃堆拉混合岩浅色体(18YD-N2)中的锆石多为半自形—自形长柱状或椭圆状,长轴粒径 100~220 μm , 短轴粒径 40~80 μm 。阴极发光图像显示锆石大致可分为两种类型。一类锆石具有核—幔一边结构(图 4a), 锆石核部阴极发光强度较强, 无分带—弱的振荡环带, 局部见溶蚀结构, 显示继承锆石的特征; 锆石幔部阴极发光强度较弱, 无明显分带一面状分带, 属典型的变质锆石; 锆石边部阴极发光相对较强, 展现出晶棱圆化、港湾状结构等外形特征, 无明显分带—弱环带, 推测为变质

重结晶锆石。另一类锆石未见核部继承锆石和幔部变质重结晶锆石, 整体呈卵圆—椭圆状, 无分带—弱分带, 推测为变质增生锆石(图 4a; 吴元保和郑永飞, 2004), 可能完全生长自熔体。乃堆拉混合岩暗色体(18YD-N13)中的锆石多呈半自形长柱状—椭圆状, 颗粒粒径多为 90~200 μm , 长宽比值为 1.0~2.5。阴极发光图像显示, 除少数锆石未见残留核外, 大部分锆石均表现出核—幔—窄边结构(图 4b)。锆石核部阴极发光强度较强, 有明显的残留岩浆环带, 常见溶蚀结构; 锆石幔部较宽, 阴极发光强度弱, 无明显分带一面状分带, 典型的变质锆石的特征; 锆石边部常出现较窄的白色蚀变边, 推测为受

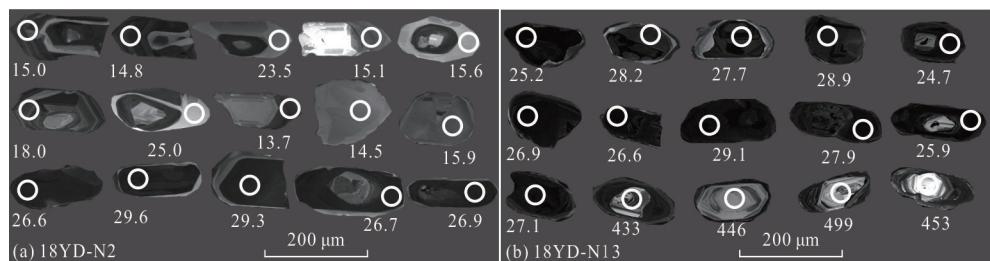


图 4 混合岩浅色体(a)和暗色体(b)中代表性锆石阴极发光图像及定年结果

Fig. 4 Cathodoluminescence images and ages of typical zircons in leucosomes (a) and melanosomes (b)
圆圈为 U-Pb 年龄(Ma)分析点

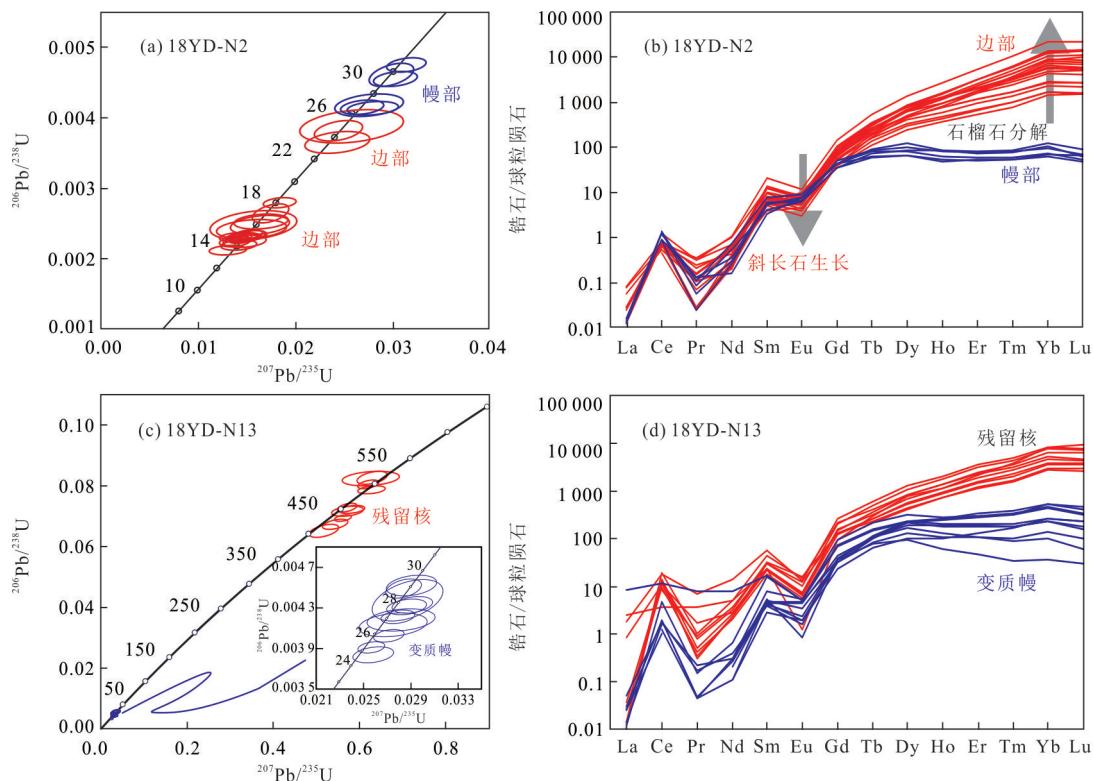


图 5 混合岩浅色体和暗色体的锆石 U-Pb 谱和图(a,c)和稀土元素配分模式(b,d)

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c) and chondrite-normalized REE patterns (b, d) of leucosomes and melanosomes

热液蚀变作用的结果。但由于边部太窄,现有技术条件下无法获得热液蚀变作用的准确年龄。

锆石U-Pb定年结果表明,乃堆拉混合岩浅色体锆石幔部微区具有较低的Th/U比值(0.006~0.017;附表1)和REE含量(60×10^{-6} ~ 94×10^{-6} ;附表2)。稀土配分模式图上表现为轻稀土严重亏损,重稀土相对富集,轻重稀土分馏相对较弱及Eu负异常。6个锆石幔部分析点显示出跨度较大的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,为30.6~26.6 Ma(图5a,附表1)。与混合岩浅色体幔部相比,其边部具有更低的Th/U比值(0.003~0.012,平均值仅为0.007;附表1)和更高的REE含量(523×10^{-6} ~ $6 090 \times 10^{-6}$;附表2),轻重稀土分馏程度和Eu负异常程度均更明显(图5b)。19个锆石边部微区的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为25.0~13.7 Ma。此外,锆石边部微区的年龄值与重稀土含量大致呈负相关,与 δEu 呈正相关(附表2)。乃堆拉混合岩暗色体锆石核部分析点具有变化的U含量(173×10^{-6} ~ $6 781 \times 10^{-6}$)和较高的Th/U比值(0.007~0.646,平均值为0.371;附表1),轻重稀土明显分馏,Eu元素负异常明显。10个锆石核部分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为408~512 Ma(图5c)。锆石幔部较核部具有更高的U含量($3 888 \times 10^{-6}$ ~ $10 301 \times 10^{-6}$)和更低的Th/U比值(0.004~0.046,平均值为0.014)、REE含量(70×10^{-6} ~ 372×10^{-6})(图5d,附表2)。11个锆石幔部分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为29.1~24.7 Ma(图5c)。

4 讨论

4.1 高喜马拉雅结晶岩系部分熔融的时间和持续时间

尽管关于高喜马拉雅结晶岩系已经有大量年代学研究,但其变质、部分熔融和熔体结晶的起始时间及持续过程还存在争议。传统上把喜马拉雅造山作用划分为始喜马拉雅期(33~28 Ma)和新喜马拉雅期(26 Ma至今)两阶段,前者代表造山带地壳加厚和进变质—峰期变质作用的时间,而后者代表俯冲大陆地壳的折返、退变质作用、部分熔融和熔体结晶的时间(Vannay and Hodges, 1996; Godin *et al.*, 2006)。现有的研究结果表明,利用独居石和锆石这些定年矿物对高喜马拉雅岩系进行年代学研究往往获得跨度较大的年龄范围,如43~7 Ma(Zhang *et al.*, 2017)、35~16 Ma(Streule *et al.*, 2010; Imayama *et al.*, 2012)、40~14 Ma(Wang

et al., 2013)、36~17 Ma(Rubatto *et al.*, 2013)和42~16 Ma(Ambrose *et al.*, 2015)。对于这些变化范围较大的定年结果,归纳起来有两种不同的解释:部分学者认为是多期多阶段变质和部分熔融作用的产物,而其他学者则认为是熔体长期、持续结晶过程的产物。

乃堆拉混合岩暗色体中的锆石大多具有核—幔—窄边结构,主要表现为等轴状、弱分带等特征(图4b)。锆石变质幔部较宽且Th/U比值极低,严重亏损重稀土及明显的负Eu异常,均属麻粒岩相变质和部分熔融作用中形成锆石的典型特征(Corfu *et al.*, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004; 李旺超等, 2015)。混合岩暗色体中的石榴石幔部常见由斜长石、钾长石和石英等不同类型矿物组成的多相包体(图3a、3b),而这些纳米级的多相包体常被认为由早期熔体结晶而成,暗示石榴石幔部是形成在部分熔融过程中的转熔相(Waters, 2001)。Rubatto *et al.*(2013)通过相平衡模拟及熔体含量与成分计算,认为锆石的微量元素含量与石榴石和长石类矿物的生长和分解行为密切相关;高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融主要发生在进变质—峰变质的过程中,先后以白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融为主要熔融方式(图6)。石榴石和钾长石在变质反应中作为生成物,其含量随部分熔融程度的增强而增加。体系中的重稀土元素更易分配在石榴石中,Eu更易赋存在长石类矿物中,导致同阶段形成的锆石在稀土配分模式上表现为重稀土严重亏损和明显的负Eu异常。乃堆拉混合岩暗色体中的变质幔部微区在稀土配分模式图上同样表现为重稀土严重亏损,Eu负异常明显(图5b)。因此,29.1~24.7 Ma年龄应代表进变质和部分熔融的时间。混合岩暗色体中的残留核部具有典型继承锆石的特征,408~512 Ma应代表原岩的年龄。

乃堆拉混合岩浅色体边部域重稀土含量随年龄变大而减少,且具有明显的负Eu异常(附表2),揭示锆石边部生长于石榴石体积减少和斜长石体积增加的退变质作用和熔体结晶过程中(图5a)(Bea *et al.*, 1994; Rubatto *et al.*, 2013)。该结论与岩相学观察到的石榴石边部被黑云母、矽线石和斜长石等矿物组成的后成合晶替代,斜长石含量高且呈堆晶框架结构相吻合(图3)。李旺超等(2015)和Zhang *et al.*(2017)通过相平衡模拟也证实,亚东地区混合岩化泥质麻粒岩中石榴石的分解通常发生

在退变质过程和熔体结晶过程中。因此,混合岩浅色体边部锆石所获得的 25.0~13.7 Ma 年龄应代表退变质和熔体结晶的时间。混合岩浅色体幔部锆石所获得的 30.6~26.6 Ma 年龄与混合岩暗色体变质幔部所获得的 29.1~24.7 Ma 基本一致,代表进变质和部分熔融的时间。综上所述,亚东地区乃堆拉混合岩暗色体和浅色体中的锆石幔部 U-Pb 定年结果均表明,该区域高喜马拉雅结晶岩系的变质及部分熔融作用大约开始于 30 Ma,并持续到 25 Ma 左右。而浅色体的锆石边部获得的退变质和熔体结晶年龄是分散的、跨度大,最年轻的结晶年龄为 13.7 Ma,暗示亚东地区高喜马拉雅结晶岩系从变质、部分熔融开始到最后熔体结晶至少持续了 17 Ma,是一个长期持续的过程。值得注意的是,在整理乃堆拉混合岩浅色体锆石边部的定年结果时,笔者发现存在 23.5~18 Ma 的时间间隔(图 5a)。对此认为可能有以下原因:(1)锆石边部微区分析点相对较少,并未完全覆盖所有信息。(2)高喜马拉雅结晶岩系经历变质和部分熔融作用产生熔体后,熔体可能会经历分异与积累、汇聚与混合、上升、侵位和最后结晶等阶段,在此过程中的每个阶段均可形成锆石;如果生成的熔体快速上升侵位,没经历某个(些)阶段,则往往得到多组间断的年龄值,这可能也是导致对锆石定年结果的地质意义具有不同认识的主要原因。(3)尽管对锆石的生长和分解行为还存在不同的认识,但不少研究表明,锆石在进变质和退变质过程中生长、在近峰期变质和部分熔融过程中分解(图 6)(Corrie 和 Kohn, 2011; Regis 等, 2016)。因此,这一时间间隔能否代表峰期变质作用的时间有待进一步确认。

越来越多的研究证实,高喜马拉雅结晶岩系经历了长期持续的变质、部分熔融和熔体结晶。比如,Zeiger 等(2015)在不丹地区获得了 36~28 Ma 的峰变质和部分熔融年龄、28~13 Ma 的退变质和熔体结晶年龄(图 6);Wang 等(2015)在聂拉木地区获得了 30~20 Ma 的进变质年龄、19~17 Ma 的深熔年龄、16~14 Ma 的退变质年龄;Imayama 等(2012)在珠峰地区获得了 35~16 Ma 的持续变质作用和熔体结晶过程;Rubatto 等(2013)在锡金地区获得了 35 Ma 的初始变质年龄并至少持续到 17 Ma;Wang 等(2016)研究认为,锡金地区高喜马拉雅结晶岩系的变质、部分熔融作用开始于 40 Ma,最小熔体结晶年龄为 13 Ma,尼泊尔地区变质作用开始于 45

Ma 并持续到 12 Ma;张泽明等(2018)认为高喜马拉雅岩系高温变质和部分熔融早在 45 Ma 就已经开始,在 45~25 Ma 岩石经历了进变质作用和近同时的部分熔融作用,在 25~15 Ma 发生近等温降压退变质作用和可能的持续部分熔融,在 15~7 Ma 遭受近等压降温退变质和熔体结晶过程(图 6)。此外,其他研究也表明,高喜马拉雅结晶岩系经历了持续的变质、深熔和熔体结晶过程(Searle 和 Godin., 2003; Cottle 等, 2009; Kali 等, 2010; Streule 等, 2010; Kohn 和 Corrie, 2011; Ambrose 等, 2015)。

4.2 高喜马拉雅结晶岩系部分熔融时限的地质意义

早期的研究表明(Cottle 等, 2009),高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融发生在新喜马拉雅期,其初始时间与藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时代(~25 Ma)近一致,即高喜马拉雅结晶岩系折返过程中的明显降压诱发了部分熔融。其主要依据是,作为高喜马拉雅结晶岩系部分熔融的产物,淡色花岗岩多获得小于 25 Ma 的结晶年龄。但越来越多的研究表明,高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融在藏南拆离系和主中央断裂活动(~25 Ma)之前就已经开始。证据如下:(1)如前所述,高喜马拉雅结晶岩系的变质和部分熔融很可能早在 45~30 Ma 就已经开始,并且至少持续了 20 Ma(Cottle 等, 2009; Rubatto 等, 2013; Wang 等, 2013; Iaccarino 等, 2015; Zhang 等, 2017)。(2)产出在高喜马拉雅结晶岩系中的含蓝晶石混合岩浅色体和淡色花岗岩中获得了 35~25 Ma 的结晶年龄,表明高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融在藏南拆离系开始活动之前就已经开始了(Viskupic 等, 2005; Groppo 等, 2010; Imayama 等, 2012)。(3)即使高喜马拉雅岩系中的混合岩浅色体和淡色花岗岩中获得了小于 25 Ma 的定年结果,也不能说明高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融时间与藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时代一致;因为这些定年结果仅能代表结晶年龄,它们应该不同程度地晚于部分熔融年龄,毕竟熔体形成后还可能经历分异与积累、汇聚、上升和侵位,最后才发生熔体结晶。(4)越来越多的精细定年结果表明,高喜马拉雅结晶岩系的部分熔融主要发生在俯冲过程中,即地壳加厚的进变质过程中,而熔体结晶主要发生在折返过程即退变质过程中(Carosi 等, 2015; Iaccarino 等, 2015; 张泽明等, 2017, 2018)。(5)本研究表明,亚东地区乃堆拉混合岩暗色体获得了约

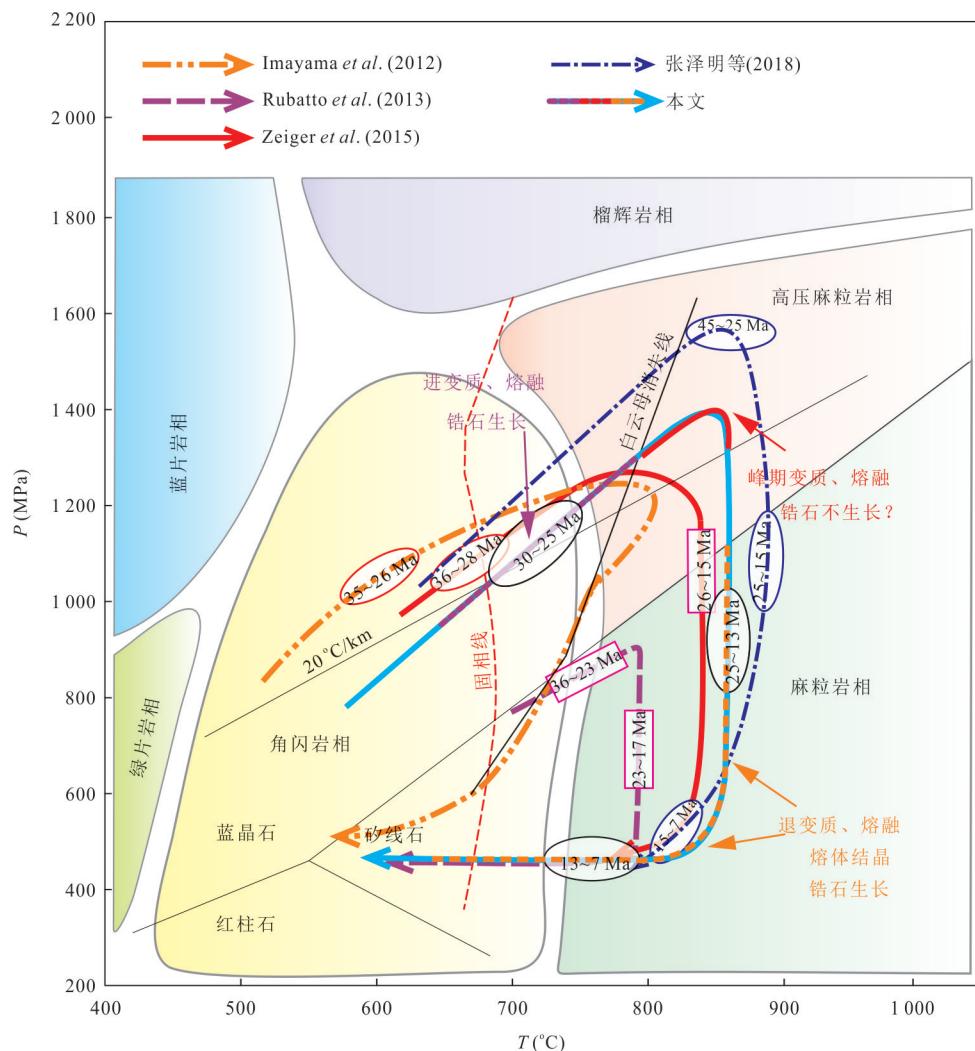
图6 高喜马拉雅结晶岩系变质作用 P - T - t 轨迹和部分熔融的时间及持续过程

Fig.6 Metamorphic P - T - t path of the Higher Himalayan crystalline sequence, showing the time and duration of partial melting
据Gou et al. (2016)和张泽明等(2017)修改

30 Ma 的峰变质和部分熔融年龄。综上所述,高喜马拉雅结晶岩系发生部分熔融作用的初始时间明显早于藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时代,高喜马拉雅结晶岩系可能在俯冲过程中由于增温增压已经发生了部分熔融,并非传统上所认为的在折返过程中的明显降压导致了部分熔融。相关认识对先前建立的众多造山带形成与演化模型提出了挑战,为进一步完善造山作用理论提供了重要信息。

5 结论

(1) 乃堆拉混合岩暗色体锆石幔部获得了29.1~24.7 Ma 的进变质和部分熔融的时间,混合岩浅色体锆石边部获得了25.0~13.7 Ma 的退变质和

熔体结晶的年龄,表明从开始部分熔融到最后熔体结晶至少持续了15 Ma。

(2) 高喜马拉雅结晶岩系发生变质、部分熔融作用和熔体结晶是一个长期、持续的过程,并非传统上所认为的多期多阶段过程,其持续时间至少可达15 Ma。

(3) 高喜马拉雅结晶岩系遭受部分熔融的时间明显早于藏南拆离系和主中央断裂开始活动的时间,并非传统上所认为的藏南拆离系的活动诱发了高喜马拉雅结晶岩系发生部分熔融。部分熔融可能在高喜马拉雅结晶岩系俯冲过程中就已经发生了。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

致谢:感谢审稿人提出的重要修改意见!

References

- Ambrose, T. K., Larson, K. P., Guilmette, C., et al., 2015. Lateral Extrusion, Underplating, and Out-of-Sequence Thrusting within the Himalayan Metamorphic Core, Kanchenjunga, Nepal. *Lithosphere*, 7(4): 441–464. <https://doi.org/10.1130/l437.1>
- Bea, F., Pereira, M. D., Stroh, A., 1994. Mineral/Leucosome Trace-Element Partitioning in a Peraluminous Migmatite (a Laser Ablation-ICP-MS Study). *Chemical Geology*, 117(1–4): 291–312. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90133-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90133-3)
- Carosi, R., Montomoli, C., Langone, A., et al., 2015. Eocene Partial Melting Recorded in Peritectic Garnets from Kyanite-Gneiss, Greater Himalayan Sequence, Central Nepal. *Geological Society, London, Special Publications*, 412(1): 111–129. <https://doi.org/10.1144/sp412.1>
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Corrie, S. L., Kohn, M. J., 2011. Metamorphic History of the Central Himalaya, Annapurna Region, Nepal, and Implications for Tectonic Models. *Geological Society of America Bulletin*, 123(9–10): 1863–1879. <https://doi.org/10.1130/b30376.1>
- Cottle, J. M., Searle, M. P., Horstwood, M. S. A., et al., 2009. Timing of Midcrustal Metamorphism, Melting, and Deformation in the Mount Everest Region of Southern Tibet Revealed by U(-Th)-Pb Geochronology. *The Journal of Geology*, 117(6): 643–664. <https://doi.org/10.1086/605994>
- Cui, H.J., Gou, Z.B., Liu, H., et al., 2019. The Petrogenesis and Tectonic Significance of the Late Early Cretaceous Granodiorites in the Nyixung Area, Western Lhasa Block, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Ding, H.X., Zhang, Z.M., Li, M.M., et al., 2017. Metamorphism and Tectonic Significance of the Greater Himalayan Crystalline Sequence in Cona Region, Eastern Himalaya. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2357–2376 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J.G., Li, G.M., Wang, G.H., et al., 2018. Timing of E-W Extension Deformation in North Himalaya: Evidences from Ar-Ar Age in the Cuonadong Dome, South Tibet. *Earth Science*, 43(8): 2638–2650 (in Chinese with English abstract).
- Godin, L., Grujic, D., Law, R. D., et al., 2006. Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones: An Introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1): 1–23. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2006.268.01.01>
- Gou, Z. B., Dong, X., Wang, B. D., 2019. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Paiku Leucogranites, Northern Himalaya. *Journal of Earth Science*, 30(3): 525–534. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1219-8>
- Gou, Z. B., Zhang, Z. M., Dong, X., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Yadong Leucogranites, Southern Himalaya. *Lithos*, 256–257: 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.04.009>
- Groppi, C., Rolfo, F., Indares, A., 2012. Partial Melting in the Higher Himalayan Crystallines of Eastern Nepal: The Effect of Decompression and Implications for the ‘Channel Flow’ Model. *Journal of Petrology*, 53(5): 1057–1088. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs009>
- Groppi, C., Rubatto, D., Rolfo, F., et al., 2010. Early Oligocene Partial Melting in the Main Central Thrust Zone (Arun Valley, Eastern Nepal Himalaya). *Lithos*, 118(3–4): 287–301. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.05.003>
- Guilmette, C., Indares, A., Hébert, R., 2011. High-Pressure Anatetic Paragneisses from the Namche Barwa, Eastern Himalayan Syntaxis: Textural Evidence for Partial Melting, Phase Equilibria Modeling and Tectonic Implications. *Lithos*, 124(1–2): 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.003>
- Iaccarino, S., Montomoli, C., Carosi, R., et al., 2015. Pressure-Temperature-Time-Deformation Path of Kyanite-Bearing Migmatitic Paragneiss in the Kali Gandaki Valley (Central Nepal): Investigation of Late Eocene-Early Oligocene Melting Processes. *Lithos*, 231: 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.005>
- Imayama, T., Takeshita, T., Yi, K., et al., 2012. Two-Stage Partial Melting and Contrasting Cooling History within the Higher Himalayan Crystalline Sequence in the Far-Eastern Nepal Himalaya. *Lithos*, 134–135: 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.004>
- Kali, E., Leloup, P. H., Arnaud, N., et al., 2010. Exhumation History of the Deepest Central Himalayan Rocks, Ama Drime Range: Key Pressure-Temperature-Deformation-Time Constraints on Orogenic Models. *Tectonics*, 29: TC2014. <https://doi.org/10.1029/2009tc002551>
- Kohn, M. J., Corrie, S. L., 2011. Preserved Zr-

- Temperatures and U-Pb Ages in High-Grade Metamorphic Titanite: Evidence for a Static Hot Channel in the Himalayan Orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 311(1–2): 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.008>
- Li, W.C., Zhang, Z.M., Xiang, H., et al., 2015. Metamorphism and Anatexis of the Himalayan Orogen: Petrology and Geochronology of HP Pelitic Granulites from the Yalong Area, Southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1219–1234 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K.R., 2003. ISOPLOT: A Geochronological Tool kit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Pan, G.T., Wang, L.Q., Li, X.Z., et al., 2001. The Tectonic Framework and Spatial Allocation of the Archipelagic Arc Basin Systems on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract).
- Patino Douce, A. E., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4): 689–710. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.4.689>
- Regis, D., Warren, C. J., Mottram, C. M., et al., 2016. Using Monazite and Zircon Petrochronology to Constrain the $P-T-t$ Evolution of the Middle Crust in the Bhutan Himalaya. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(6): 617–639. <https://doi.org/10.1111/jmg.12196>
- Rubatto, D., Chakraborty, S., Dasgupta, S., 2013. Timescales of Crustal Melting in the Higher Himalayan Crystallines (Sikkim, Eastern Himalaya) Inferred from Trace Element-Constrained Monazite and Zircon Chronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(2): 349–372. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0812-y>
- Sawyer, E. W., 2008. Atlas of Migmatites. NRC Research Press, Ottawa.
- Searle, M. P., Godin, L., 2003. The South Tibetan Detachment and the Manaslu Leucogranite: A Structural Reinterpretation and Restoration of the Annapurna-Manaslu Himalaya, Nepal. *The Journal of Geology*, 111(5): 505–523. <https://doi.org/10.1086/376763>
- Streule, M. J., Searle, M. P., Waters, D. J., et al., 2010. Metamorphism, Melting, and Channel Flow in the Greater Himalayan Sequence and Makalu Leucogranite: Constraints from Thermobarometry, Metamorphic Modeling, and U-Pb Geochronology. *Tectonics*, 29: TC5011. <https://doi.org/10.1029/2009tc002533>
- Wang, J. M., Zhang, J. J., Wang, X. X., 2013. Structural Kinematics, Metamorphic P-T Profiles and Zircon Geochronology across the Greater Himalayan Crystalline Complex in South-Central Tibet: Implication for a Revised Channel Flow. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(6): 607–628. <https://doi.org/10.1111/jmg.12036>
- Wang, J. M., Rubatto, D., Zhang, J. J., 2015. Timing of Partial Melting and Cooling across the Greater Himalayan Crystalline Complex (Nyalam, Central Himalaya): In-Sequence Thrusting and Its Implications. *Journal of Petrology*, 56(9): 1677–1702. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv050>
- Wang, J. M., Zhang, J. J., Liu, K., et al., 2016. Spatial and Temporal Evolution of Tectonometamorphic Discontinuities in the Central Himalaya: Constraints from P-T Paths and Geochronology. *Tectonophysics*, 679: 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.035>
- Wang, L.Q., Pan, G.T., Li, D.M., et al., 2000. The Evolution and Mineralization of the Jomda-Weixi Continental Marginal Volcanic Arc, Southwestern China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(2): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- Waters, D. J., 2001. The Significance of Prograde and Retrograde Quartz-bearing Intergrowth Microstructures in Partially Melted Granulite-Facies Rocks. *Lithos*, 56(1): 97–110. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00061-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00061-x)
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Vannay, J. C., Hodges, K. V., 1996. Tectonometamorphic Evolution of the Himalayan Metamorphic Core between the Annapurna and Dhaulagiri, Central Nepal. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(5): 635–656. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.1996.00426.x>
- Viskupic, K., Hodges, K. V., Bowring, S. A., 2005. Timescales of Melt Generation and the Thermal Evolution of the Himalayan Metamorphic Core, Everest Region, Eastern Nepal. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(1): 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0628-5>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>

- org/10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Zeiger, K., Gordon, S. M., Long, S. P., et al., 2015. Timing and Conditions of Metamorphism and Melt Crystallization in Greater Himalayan Rocks, Eastern and Central Bhutan: Insight from U-Pb Zircon and Monazite Geochronology and Trace-Element Analyses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169(5): 47. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1143-6>
- Zhang, L.K., Zhang, Z., Li, G.M., et al., 2018. Rock Assemblage, Structural Characteristics and Genesis Mechanism of the Cuonadong Dome, Tethys Himalaya. *Earth Science*, 43(8): 2664—2683 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.M., Dong, X., Ding, H.X., et al., 2017. Metamorphism and Partial Melting of the Himalayan Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2313—2341 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.M., Kang, D.Y., Ding, H.X., et al., 2018. Partial Melting of Himalayan Orogen and Formation Mechanism of Leucogranites. *Earth Science*, 43(1): 82—98 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 崔浩杰, 荀正彬, 刘函, 等, 2019. 拉萨地块西段尼雄地区早白垩世晚期花岗闪长岩的成因及构造意义. 沉积与特提斯地质, 39(1): 1—13.
- 丁慧霞, 张泽明, 李梦梅, 等, 2017. 喜马拉雅造山带东段错那地区高喜马拉雅结晶岩系的变质作用与构造意义. 岩石学报, 33(8): 2357—2376.
- 付建刚, 李光明, 王根厚, 等, 2018. 北喜马拉雅 E-W 向伸展变形时限: 来自藏南错那洞穹隆 Ar-Ar 年代学证据. 地球科学, 43(8): 2638—2650.
- 李旺超, 张泽明, 向华, 等, 2015. 喜马拉雅造山带核部的变质作用与部分熔融: 亚东地区高压泥质麻粒岩的岩石学与年代学研究. 岩石学报, 31(5): 1219—1234.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴旺, 等, 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. 沉积与特提斯地质, 21(3): 1—26.
- 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等, 2000. 江达—维西陆缘火山弧的形成演化及成矿作用. 沉积与特提斯地质, 20(2): 1—17.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1604.
- 张林奎, 张志, 李光明, 等, 2018. 特提斯喜马拉雅错那洞穹隆的岩石组合、构造特征与成因. 地球科学, 43(8): 2664—2683.
- 张泽明, 董昕, 丁慧霞, 等, 2017. 喜马拉雅造山带的变质作用与部分熔融. 岩石学报, 33(8): 2313—2341.
- 张泽明, 康东艳, 丁慧霞, 等, 2018. 喜马拉雅造山带的部分熔融与淡色花岗岩成因机制. 地球科学, 43(1): 82—98.