

研究发现喜马拉雅榴辉岩叠加超高温变质并揭示对地球早期碰撞构造的启示

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/12876.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

地球的表层由众多马赛克状、沿着汇聚、离散或转换边界相互运动的板块组成，该动力学过程即为板块构造。板块构造驱动了地球表层的基本地质过程，如大陆地壳的生长、地貌单元的形成、壳幔物质的循环。因此，地球科学研究的主要任务之一是探索以俯冲作用为标志的板块构造何时启动、地球不同地质历史时期的板块构造体制。

变质岩记录的地热梯度是甄别板块构造体制的重要指标之一，因为冷的地热梯度是大洋或大陆板片俯冲的标志。蓝片岩或榴辉岩等经历过冷的高压变质作用的岩石，是探索现代板块构造起源的重要载体，但该类岩石在古老地质体中鲜有保存或通常遭受强烈叠加改造。明确指示俯冲带环境的冷的高压变质岩石（地热梯度 $<10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 或 $<350^{\circ}\text{C}/\text{Gpa}$ ）只出现在7.5亿年前之后，并且绝大多数分布于显生宙（图1）。部分研究报道了古元古代（20-18亿年前）的榴辉岩（图1）或中古太古代（33-32亿年前）的高压石榴角闪岩（南非巴伯顿）。虽然前人认为这些岩石形成于地球早期的（冷）俯冲环境，但大多数这些高压岩石与典型冷俯冲环境形成的榴辉岩/蓝片岩不同：经历过高温变质作用叠加、具有更高的峰期地热梯度（ $10-15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）；绝大多数古老变质体由中压麻粒岩和少量高压麻粒岩组成（ $>15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，如华北恒山）。这些岩石可形成于碰撞带、岛弧、垂向构造等多种构造环境，因而不能指示现代板块构造。即使在显生宙的碰撞带，中高压麻粒岩相岩石占据造山带的主体，而榴辉岩相残留偶尔被保存（如欧洲华力西波希米亚杂岩），冷的榴辉岩只占据造山带不到1%的体积、甚至缺失。

这导致了3个基本问题：（1）为什么从古至今的造山带中榴辉岩经常被麻粒岩相变质作用叠加？（2）地球上最古老的榴辉岩指示了什么样的板块构造体制？（3）诸如弧岩浆作用、壳幔物质循环的同位素证据等表明，板块构造在27亿年前就已启动，为何太古宙地质体没有榴辉岩保存下来？这些问题对理解地球早期的构造体制具有重要意义。如果将地质过程更清楚的现今造山带中相似榴辉岩的埋藏和折返过程揭示清楚，对这些问题的认识才会更深刻。

中国科学院院士、中科院地质与地球物理研究所研究员吴福元、地质地球所副研究员王佳敏与北京大学教授张进江等合作，对喜马拉雅造山带中部珠峰东坡地区（通门村）的麻粒岩化榴辉岩及泥质麻粒岩进行了岩石学和年代学研究（图2），以揭示其埋藏和折返过程，探寻地球早期构造体制之谜。

该研究获取了榴辉岩中残留绿辉石和利用XMapTools软件从后成合晶恢复的绿辉石的成分（硬玉分子23%-29%），对榴辉岩和泥质麻粒岩中的高温矿物结构（堇青石-石英-尖晶石平衡结构、低Zn和Cr尖晶石，黑云母中金红石出溶、斜方辉石-斜长石后成合晶），结合多种地质温压计（石

榴石-斜方辉石Fe-Mg交换温度计、石榴石-黑云母Fe-Mg交换温度计、三元长石温度计、相平衡模拟, 图3), 配合锆石、独居石、榍石等多种U-Th-Pb岩石年代学方法, 建立了这些岩石的温度-压力-时间 (P - T - t) 轨迹 (图4)。结果表明, 喜马拉雅中部榴辉岩的榴辉岩相峰期变质时间为~30百万年前、温压条件为730-770°C和~20 kbar (11°C/km), 经历了降压升温的 P - T 轨迹 (升温幅度~150°C), 最终在20-15百万年前遭受了6-11 kbar和900-970°C (~40°C/km)的超高温变质作用叠加改造。该超高温变质作用叠加改造使其基本失去了榴辉岩相应该具有的矿物成分和变质年龄。

该研究发现了喜马拉雅首个超高温变质作用。研究人员进一步通过一维热模拟研究, 发现该超高温变质作用的产生是由喜马拉雅的酸性地壳加厚至~60 km后放射性生热 ($2 \mu\text{W}/\text{m}^3$), 进一步通过岩石圈减薄至<90 km共同导致的 (图5)。虽然超高温的岩石在前寒武纪及显生宙的变质带中广泛分布 (如南极东部超高温麻粒岩), 其热源一直存在争议。由于喜马拉雅是正在活跃的、世界上最典型的陆陆碰撞造山带, 在喜马拉雅首次发现超高温变质作用, 将为理解大陆碰撞过程中超高温变质作用的热源 (加厚地壳+岩石圈减薄)、时间尺度 (单个岩片持续时间<10-15百万年、初始碰撞后35-40百万年) 等提供重要的实例。

通过与喜马拉雅西部的超高压榴辉岩进行比较 (图4), 研究人员提出了冷榴辉岩vs.麻粒岩化榴辉岩折返的新模型 (图5)。该模型基于碰撞造山过程中的单纯地壳加厚, 而不需要板片断离或俯冲角度变换: 在印度-亚洲碰撞初期 (~50百万年前), 地壳较薄 (~30 km), 包裹榴辉岩的长英质岩片 (密度~2.8 g/cm³) 从深俯冲的印度大陆地壳拆离后, 进入上伏地幔 (密度~3.3 g/cm³), 能够通过浮力作用 (Buoyancy) 而近垂直上升、快速折返 (速率~30 mm/年), 形成近等温降压/冷却降压的 P - T 轨迹, 形成的榴辉岩大多沿缝合带分布、成穹窿状。在碰撞成熟期 (25 - 15百万年前), 喜马拉雅山根堆积了大量从印度大陆拆离下来的未能发生深俯冲的酸性地壳岩石 (~60 km、密度~2.8 g/cm³), 包裹榴辉岩的长英质岩片从地壳拆离后 (密度~2.8 g/cm³), 被圈入加厚山根中, 由于密度差不大, 此时折返受控于底垫作用 (Underplating), 比浮力折返要慢得多 (速率2~3 mm/年), 并因缓慢抬升而遭受高温/超高温变质作用叠加改造。当被物质不断填充的地壳应变积累到产生破裂后, 会沿着大型逆冲推覆构造 (i.e.主中央逆冲断层) 和被动顶板断层 (i.e.藏南拆离系) 形成侧向挤出。因此, 这类含榴辉岩的变质岩片大多出露于造山带核部, 规模较大、离缝合带较远。

喜马拉雅中部榴辉岩叠加超高温变质的现象和成因模型可解释为何地球早期的变质地体中榴辉岩鲜有保存、为何地球上最古老的榴辉岩普遍经历了高温/超高温变质叠加。目前发现的地球上最古老的榴辉岩, 诸如俄罗斯科拉半岛的Belomorian (~19亿年前)、非洲坦桑尼亚的Usagarian (~20亿年前) 和加拿大的Trans-Hudson (~18.3亿年前) 等散布在世界各地, 与喜马拉雅的榴辉岩经历的 P - T 轨迹、折返速率、叠加变质条件等相似, 代表了一次全球性事件 (Nuna超大陆聚合), 与喜马拉雅型的成熟大陆俯冲/碰撞过程并无差异。也就是说, 古元古代时期的构造体制可能与现代板块构造体制并无差异 (图1)。在晚太古宙时期 (~25亿年前), 碰撞构造过程可能已在地球部分地区启动 (阴山地块和印度南部保存的含蓝晶石高压泥质麻粒岩, 图1), 只不过由于成熟碰撞造山叠加的高温/超高温变质作用, 使这个时期的榴辉岩不易保存下来。

相关研究成果以*First evidence of eclogites overprinted by ultrahigh temperature metamorphism in Everest*

*East, Himalaya: Implications for collisional tectonics on early Earth*为题，发表在*Earth and Planetary Science Letters*

上。研究工作得到国家自然科学基金基础科学中心项目“大陆演化与季风系统演变”、国家自然科学基金面上项目、第二次青藏高原综合科学考察研究的支持。

[论文链接](#)

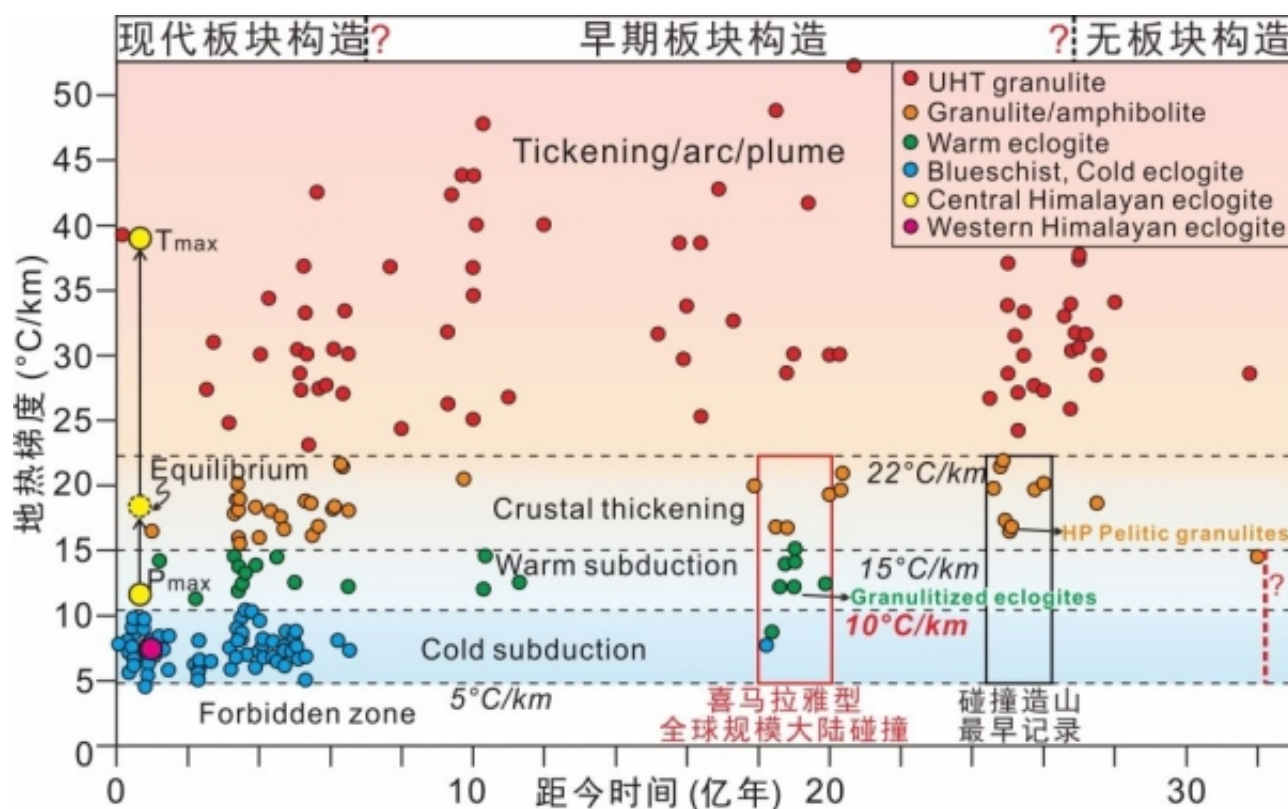


图1 地球33亿年以来代表性变质岩记录的地热梯度及不同板块构造体制

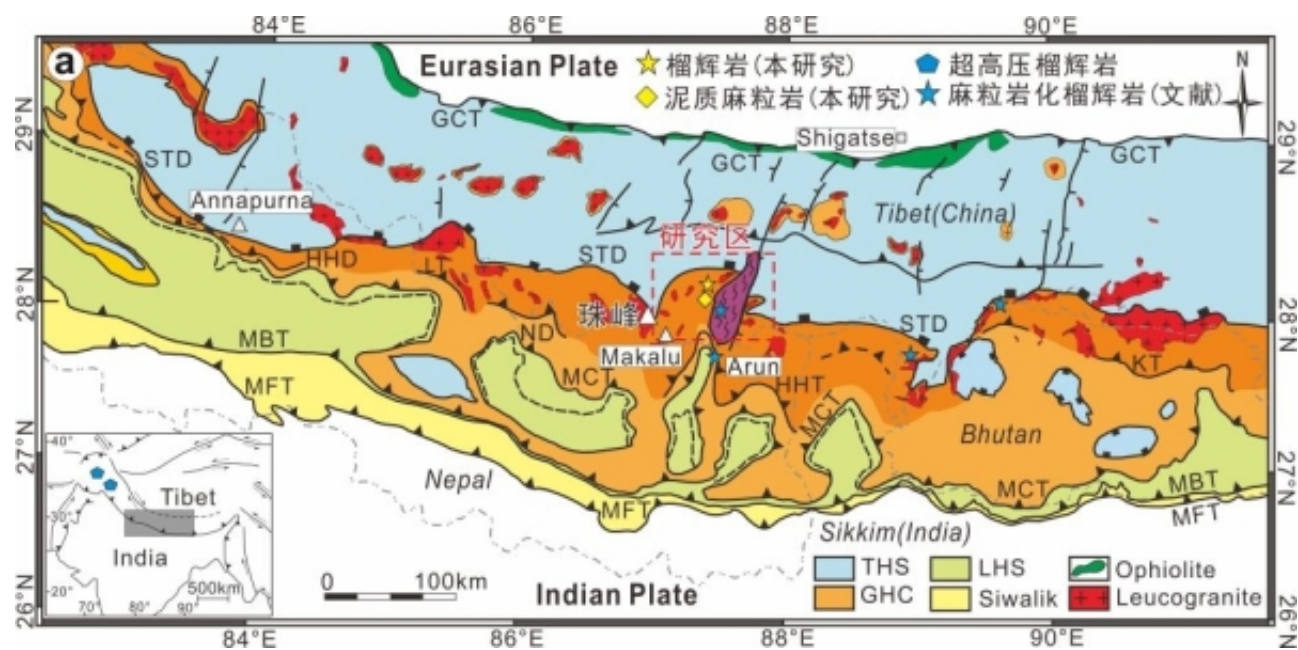


图2 喜马拉雅中部地质简图及研究区（珠峰东坡）位置

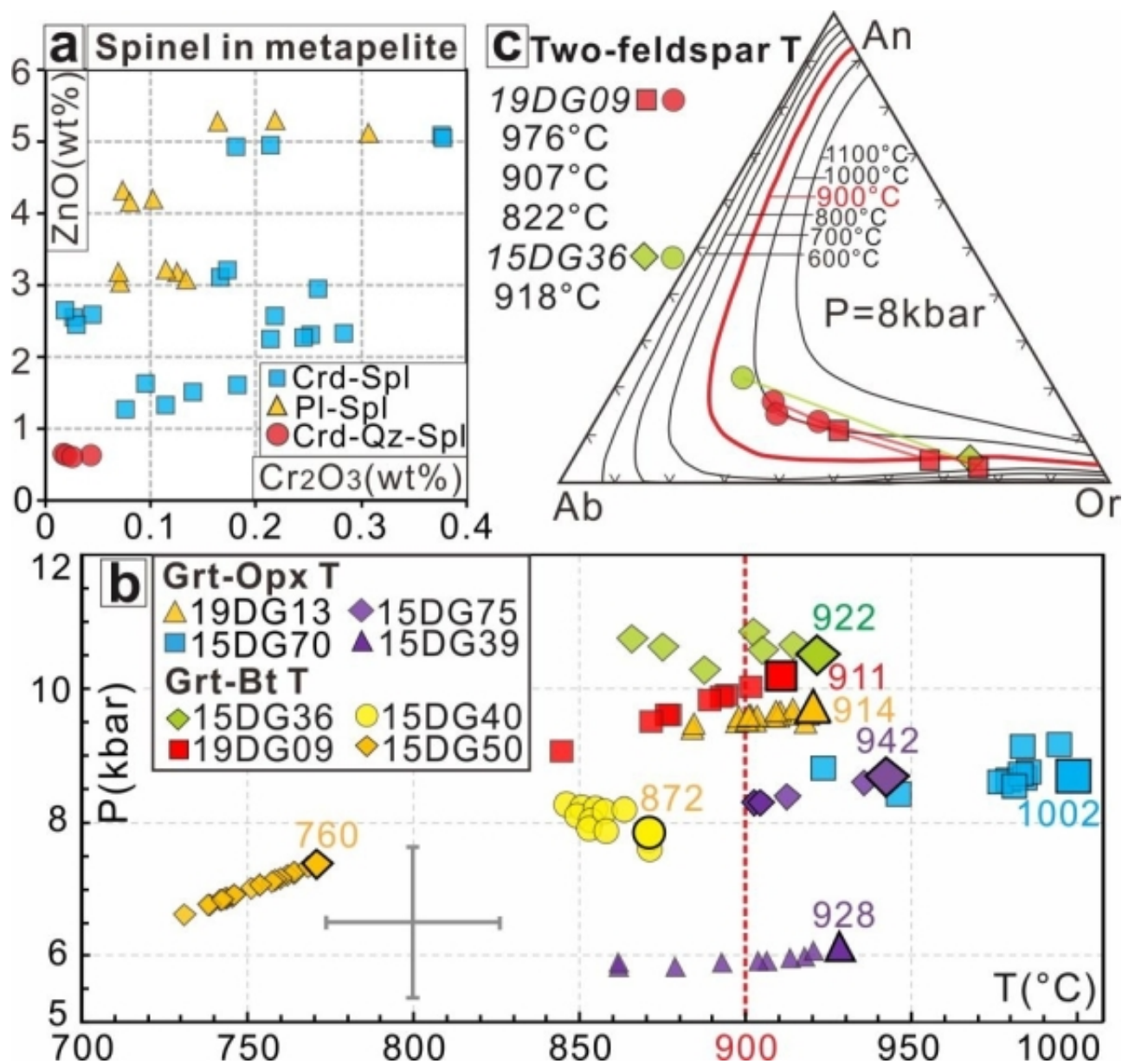


图3 喜马拉雅珠峰东坡发现超高温变质作用的部分证据

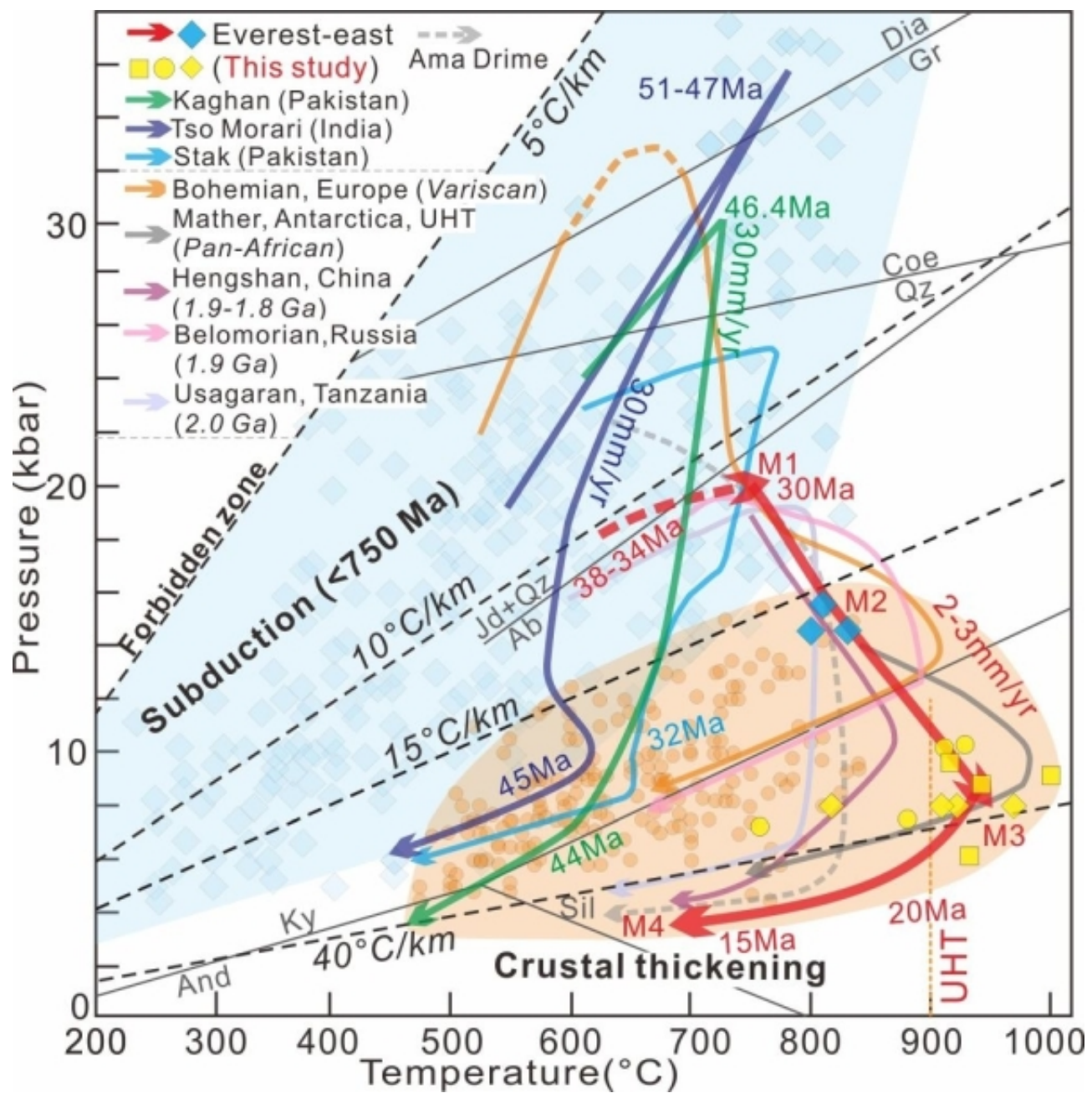


图4 珠峰东坡榴辉岩压力-温度-时间轨迹 (P-T-t) 结果, 及与喜马拉雅西部 (超) 高压榴辉岩、地球上最古老的榴辉岩、欧洲华力西榴辉岩、南极超高温等P-T- (t) 轨迹对比

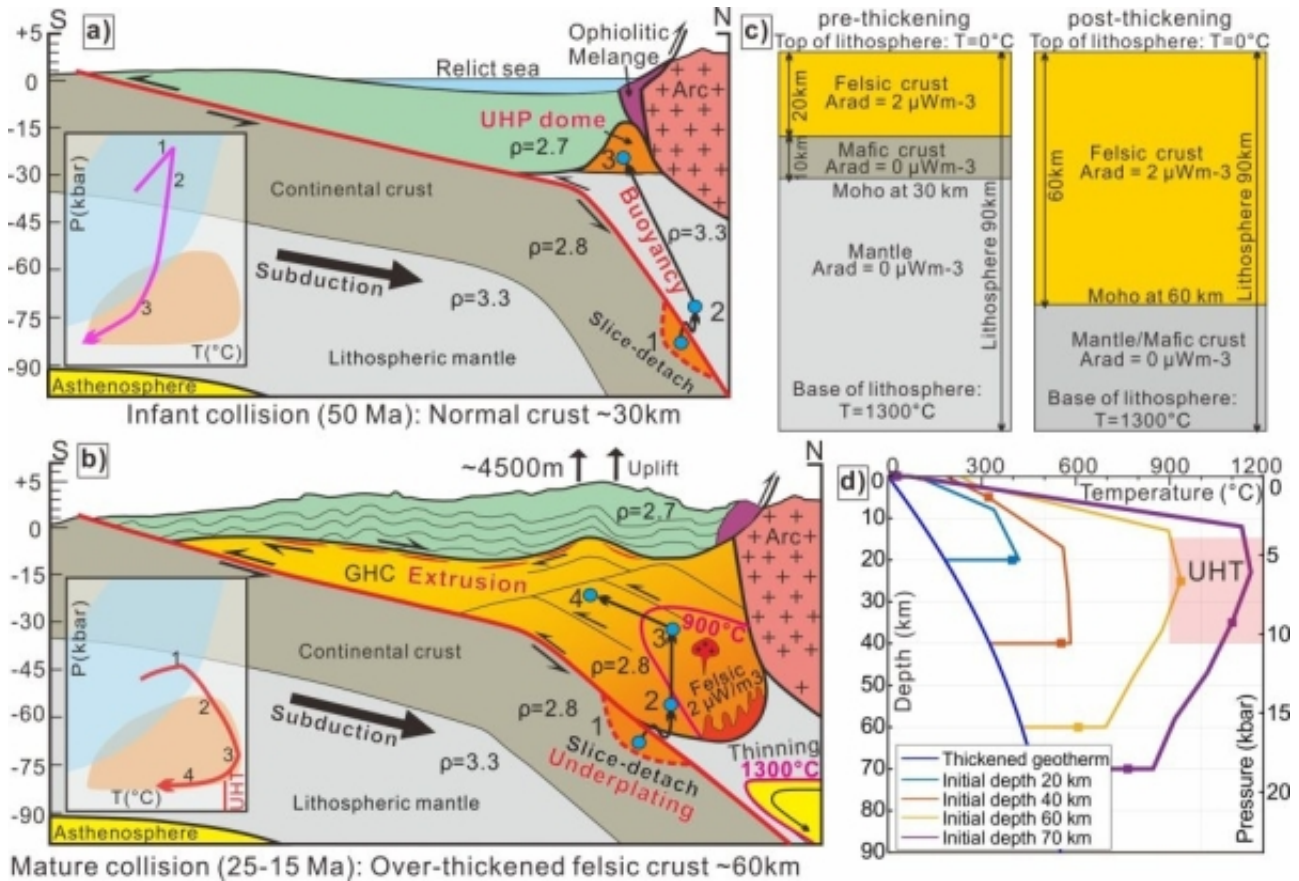


图5 大陆碰撞过程中冷榴辉岩和麻粒岩化榴辉岩（高温/超高温变质作用叠加）的成因模式图

研究团队单位：地质与地球物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发