科学通报 2012 年 第 57 卷 第 33 期: 3162 ~ 3172
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中新世中期喜马拉雅造山带构造体制的转换

王晓先[①], 张进江[①*], 刘江[①], 闫淑玉[①②], 王佳敏[①]

① 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;
② 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
* 联系人, E-mail: zhjj@pku.edu.cn

2012-04-23 收稿, 2012-07-11 接受
国家自然科学基金(41172176, 41121062)和中国地质调查局工作项目(1212011121066)资助

摘要 喜马拉雅造山过程中存在多期构造体制转换, 理清各期构造转换的时代和地球动力学成因对研究喜马拉雅造山带的构造演化具有重要意义. 藏南吉隆地区大喜马拉雅发育一复杂变形的淡色花岗岩脉, 其现今形态呈轴面北倾的不对称褶皱分布于围岩黑云斜长片麻岩中, 构造恢复显示其记录了两期不同构造体制下的变形作用——早期上盘向北的伸展和后期向南的逆冲缩短, 暗示了喜马拉雅造山带由南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换. 锆石 La-ICP-MS 测年结果显示, 淡色花岗岩侵位于 21.03~18.7 Ma, 结合构造分析, 吉隆地区喜马拉雅造山带的构造转换发生于 18.7 Ma 之后. 吉隆及其他地区藏南拆离系(STDS)和南北向裂谷(NSTR)的测年数据表明, 喜马拉雅造山带在 19~13 Ma 处于构造体制转换时期, 其构造体制由南北向伸展转换为南北向挤压; 该构造体制转换可能受印度-欧亚板块的汇聚速率控制, 汇聚速率较快时, 发生南北向挤压, 表现为逆冲、褶皱和 NSTR 的发育; 汇聚速率较慢时, 发生南北向伸展, 表现为 STDS 的伸展滑脱.

关键词
吉隆地区
淡色花岗岩脉
锆石 La-ICP-MS 定年
藏南拆离系
南北向裂谷
构造体制转换

喜马拉雅造山作用形成了南喜马拉雅逆冲推覆体系, 主要包括主中央逆冲断裂(MCT)、主边界逆冲断裂(MBT)和主前锋逆冲断裂(MFT); 而在北喜马拉雅却形成了多种形式的伸展构造, 如藏南拆离系(STDS)、北喜马拉雅片麻岩穹窿(NHGD)、南北向裂谷(NSTR)以及分布于青藏高原的高角度正断层. 最近的研究发现, 在北喜马拉雅, 造山作用不同阶段受不同构造体制控制, 形成不同性质的构造: (1) 36~32 Ma(始新世-渐新世之交)之前[1], 喜马拉雅造山带受南北向挤压的构造体制控制, 形成了早期的逆冲断层, 表现为 STDS 记录的早期的向南逆冲; (2) 渐新世早期之后, 构造体制由南北向挤压转换为南北向伸展, 渐新世晚期到中新世早期(28.4~16.2 Ma), 北喜马拉雅发生大规模的伸展, 主要表现为 STDS 向北的伸展拆离[2~14]; (3) 中新世中期(~13 Ma), 构造体制转换为东西向伸展, 中-晚中新世(13~8 Ma)[15,16], 喜马拉雅造山带受东西向伸展的构造体制控制, 形成了切穿 STDS 的 NSTR, 如亚东-谷露裂谷、尼玛-定日裂谷和申扎-定结裂谷. 目前, 对于由南北向挤压向南北向伸展构造体制的转换已经有了较为充分的认识[1,17~19], 而对于由南北向伸展向东西向伸展的构造体制转换尚未得到充分研究.

为了更好地揭示喜马拉雅造山带这一构造体制转换, 我们选取了喜马拉雅造山带中各种构造发育较为齐全的剖面——吉隆沟剖面, 对 STDS 下盘经历复杂变形的淡色花岗岩脉进行详细的构造研究, 在此基础上进行 La-ICP-MS 锆石定年, 同时结合前人的研究资料, 对该期构造体制转换的时间进行限定, 并探讨喜马拉雅构造体制转换的地球动力学成因.

1 地质概况与样品描述

喜马拉雅地区位于北部 YLZBS(雅鲁藏布江缝

英文版见: Wang X X, Zhang J J, Liu J, et al. Middle-Miocene transformation of tectonic regime in the Himalayan orogen. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5414-6

合带)和南部的 MFT 之间, 自北而南发育的构造岩石单元依次为特提斯喜马拉雅沉积系(THS), STDS, 大喜马拉雅结晶岩系(GHC), MCT, 小喜马拉雅沉积系(LHS), MBT, Siwalik 前陆盆地沉积和 MFT[1,20](图 1).

在吉隆地区, 喜马拉雅造山带发育较为完整, 其自南向北主要划分为以下 5 个构造岩石单元: GHC, STDS, THS, 晚新生代沉积盆地和 NHGD(图 2)[1]. 其中 GHC 由两部分组成, 中间被北倾的断层分开, 南侧主要由中级变质岩组成, 包括变质砂岩和片岩等, 北侧由高级变质岩组成, 包括黑云斜长片麻岩、花岗质片麻岩和混合岩等, 其中有淡色花岗岩脉侵入. STDS 是发育在 GHC 和 THS 之间的一条宽十多公里的韧性剪切带, 剪切带主要由糜棱岩化的片麻岩和面理化的淡色花岗岩组成[22]. THS 位于 STDS 的上盘, 主要发育一套古生代-中生代的沉积地层, 主要的岩石类型包括砂岩、粉砂岩、泥岩、灰岩以及基性火山岩, 代表了被动大陆边缘沉积, 底部岩石发生轻微变质, 形成板岩和千枚岩. 吉隆地区新生代沉积盆地包括吉隆盆地、沃玛盆地以及其他的小型盆地. 最北部发育佩枯错和马拉山片麻岩穹窿, 穹窿核部主要发育淡色花岗岩、二云母二长花岗岩和花岗质片麻岩[23,24], 中部为石榴石片岩, 最外部为 THS 的板岩和千枚岩. 本文的研究区位于吉隆地区 GHC, 主要研究对象为 GHC 北侧黑云斜长片麻岩中的淡色花岗岩脉体.

本文的采样位置见图 2. 淡色花岗岩脉体呈透镜体分布于围岩黑云斜长片麻岩中(图 3(a)), 露头长度约 50 m. 围岩黑云斜长片麻岩发育片麻状构造, 黑云母不连续定向排列形成片麻理(图 3(b)), 主要矿物包括石英、钾长石、斜长石、黑云母和少量的白云母. 淡色花岗岩样品 TYC-88 主要的矿物包括石英(45%)、斜长石(35%)、钾长石(15%)、黑云母和白云母(<5%), 以及少量的绿泥石, 其中石英具有波状消光(图 3(c)), 锯齿状边界, 可能是侵位之后后期剪切运动的结果, 少量的斜长石内部发生蚀变, 形成微小的白云母颗粒(图 3(d)).

2 实验方法

本文对发育于吉隆地区 GHC 中的淡色花岗岩脉体样品进行了 La-ICP-MS 年代学测定. 挑出锆石制靶后, 进行透射光、反射光和阴极发光照相, 用于锆石测年样品点的确定. 其中样品的破碎和锆石的挑选在河北廊坊地质服务有限公司完成, 阴极发光图像在中国科学院地质与地球物理研究所电镜室完成. 锆石 U-Pb 年代学和微量元素含量分析测试工作在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成, 样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER_ver 4.0[25]程序, U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用 Isoplot/Ex_ver 3

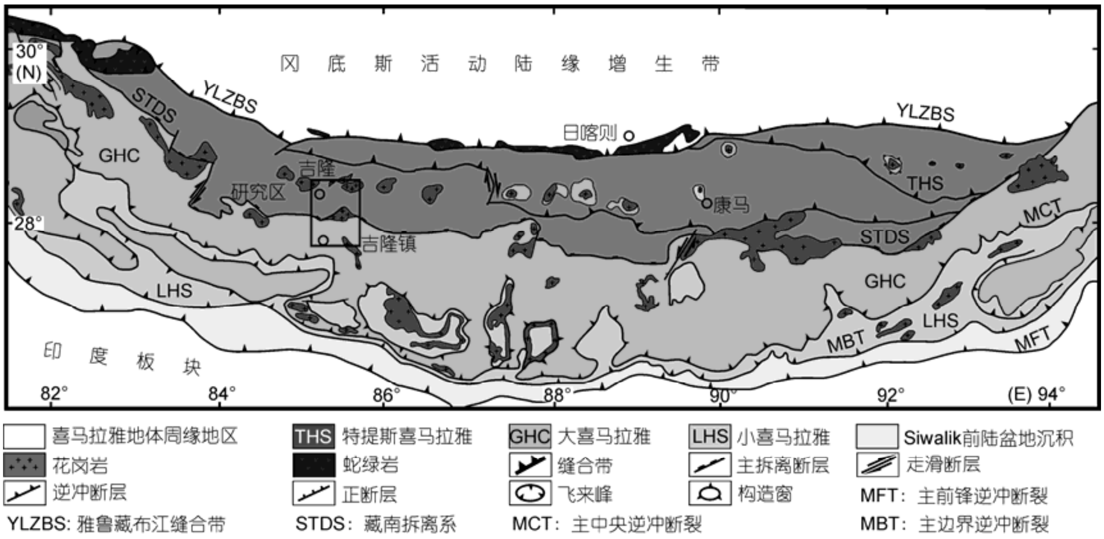

图 1 喜马拉雅造山带地质简图

据文献[1,21]修改

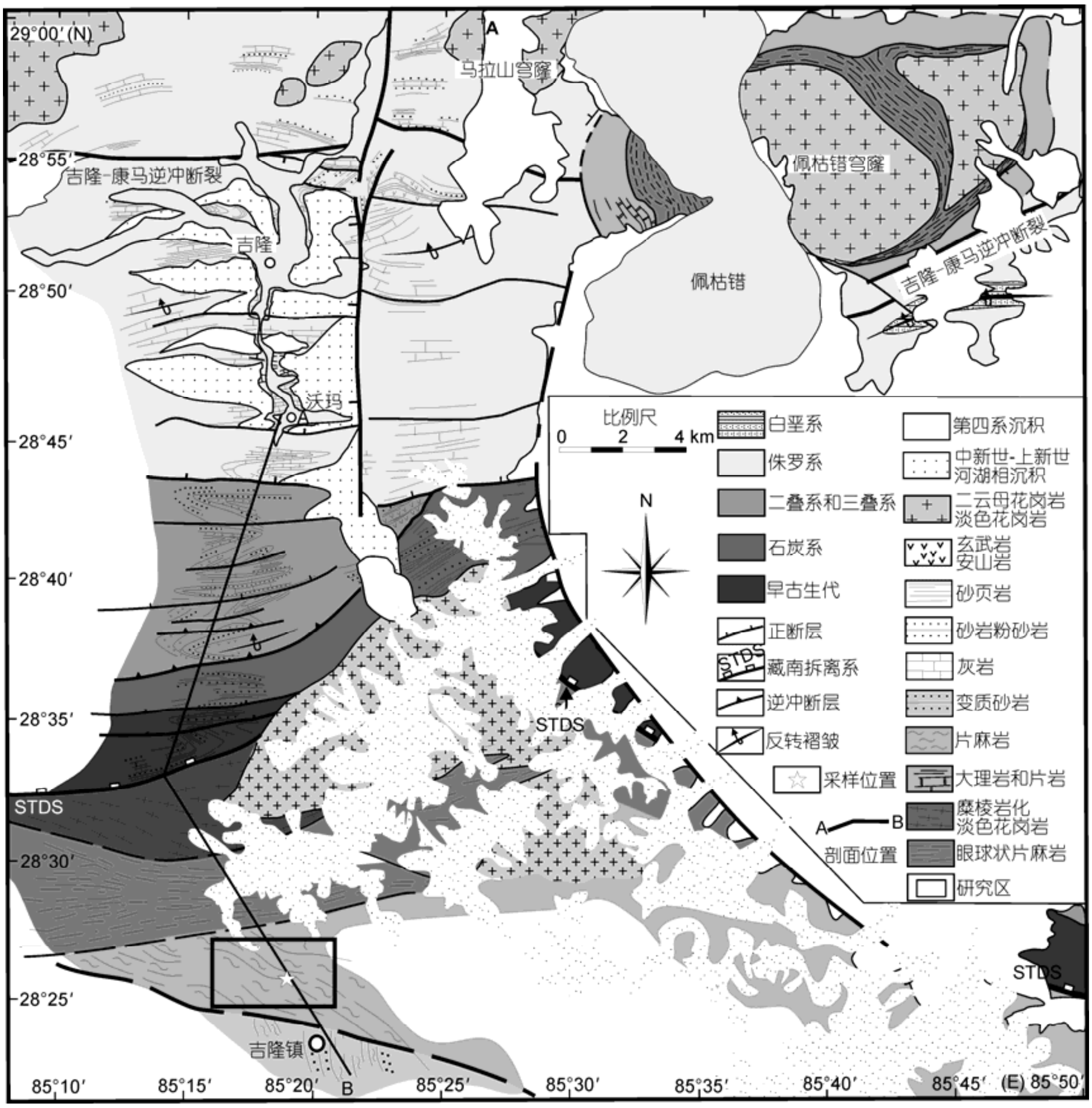

图 2 吉隆地区地质简图

据文献[1]修改

程序完成[26].

3 实验结果

图 4 是代表性锆石阴极发光(CL)图像. GHC 淡色花岗岩样品(TYC-88)的 CL 图像显示(图 4), 锆石晶形自形, 多成柱状, 晶粒长度在 100~300 μm, 内部锆石色调较暗, 呈海绵状, 可能为后期热液改造的结果; 外部锆石色调较亮, 发育明显的震荡环带, 总体来看锆石表现为岩浆锆石的特征[27].

对 TYC-88 样品总共进行了 32 个点位分析, 绝大多数分布在 U-Pb 谐和线上或谐和线附近(图 5, 数据见表 1). 所分析的 32 个点的点位全部位于锆石边部的震荡环带上, 数据结果表明 32 个分析点的 Th/U 值较低(0.01~0.06). 32 个分析点的表观年龄分布范围较大, 从 26.8 Ma 到 18.2 Ma, 在 U-Pb 谐和图上明显可分为两组: 第一组共 11 个分析点, 其年龄分布为 20.9~21.2 Ma, 加权平均年龄为 21.03±0.11 Ma (MSWD = 0.39); 第二组共 15 个分析点, 年龄范围为 18.2~19.2 Ma, 加权平均年龄为 18.70±0.19 Ma (MSWD = 3.6). 两组不同年龄的锆石其边部具有相同的震荡环带以及较低的 Th/U 值, 这与深熔成因的淡色花岗岩特征相吻合[22], 表明这些年龄代表了淡色花岗岩的结晶年龄. 淡色花岗岩脉较大的年龄分布范围与喜马拉雅造山带中典型的淡色花岗岩年龄分布一

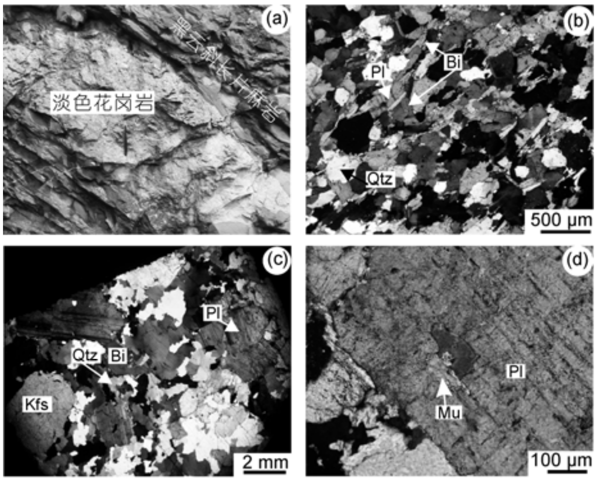

图 3　吉隆地区大喜马拉雅淡色花岗岩脉、黑云斜长片麻岩野外及显微照片

(a) 淡色花岗岩脉及围岩黑云斜长片麻岩野外露头; (b) 黑云斜长片麻岩中黑云母不连续定向排列形成片麻理; (c) 淡色花岗岩主要矿物石英、斜长石、钾长石和黑云母及石英的波状消光; (d) 淡色花岗岩中斜长石内部蚀变形成白云母. 矿物代号: Qtz, 石英; Kfs, 钾长石; Pl, 斜长石; Bi: 白云母

致, 代表了一个较长时间的持续的深熔作用[1].

4　讨论

4.1　吉隆地区多期构造变形及构造转换

吉隆地区喜马拉雅造山作用划分为多个期次, Yang 等人[22]通过对吉隆盆地及其周缘主要构造的变形研究, 将其划分为3个主要的构造期次: (1) THS 和 GHC 中记录的早期向南的逆冲; (2) STDS 向北的滑脱伸展; (3) 南北向正断层所代表的东西向伸展. 两次不同的构造变形期次之间对应了一次构造转换.

淡色花岗岩脉经历了复杂的构造变形, 在现今剖面上表现为轴面北倾的不对称褶皱, 指示了向南的逆冲(图 6(d)). 但形成这些不对称褶皱的岩脉总体呈现为布丁化或透镜体状, 通过构造恢复, 可见其为不对称透镜体, 其形态指示了上盘向北的伸展作用(图 6(a)). 因此, 该淡色花岗岩脉记录了早期上盘向北的伸展和后期向南的逆冲两期构造变形, 两期构造变形之间对应了由南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换. 结合淡色花岗岩脉的 U-Pb 测年结果及本研究区的地质历史[1,22], 我们提出淡色花岗岩脉及其构造形态的形成过程: (1) 34~19 Ma, 吉隆地区 STDS 发生伸展减薄, 同时引发 GHC 地壳重熔[22], 研究区 21.03~18.7 Ma 的淡色花岗岩脉与吉隆 STDS 活动时间一致, 是在 STDS 伸展减薄时发生侵位、结晶; (2) 18.7 Ma 之后, 侵位冷凝后的淡色花岗岩脉体持续经历上盘向北的伸展剪切, 形成了不对称透镜体或布丁构造及连接透镜体的细小脉体, 类似于曲颈构造 (图 6(a)); (3) 在不对称布丁构造形成后, 淡色花岗岩脉又经历了上盘向南的逆冲作用, 形成轴面北倾的不对称褶皱(图 6(b)), 代表了南北向挤压体制. 由于淡色花岗岩脉所处的研究区紧邻 STDS(图 2 和图 6(c)), 而距离 MCT 较远, 且 MCT 的挤压变形主要集中在一个数公里宽的剪切带中[20], 因此研究区的淡色花岗岩脉不可能卷入 MCT 的挤压变形中, 而是南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换的结果. 通过以上分析我们认为北喜马拉雅造山带在 18.7 Ma

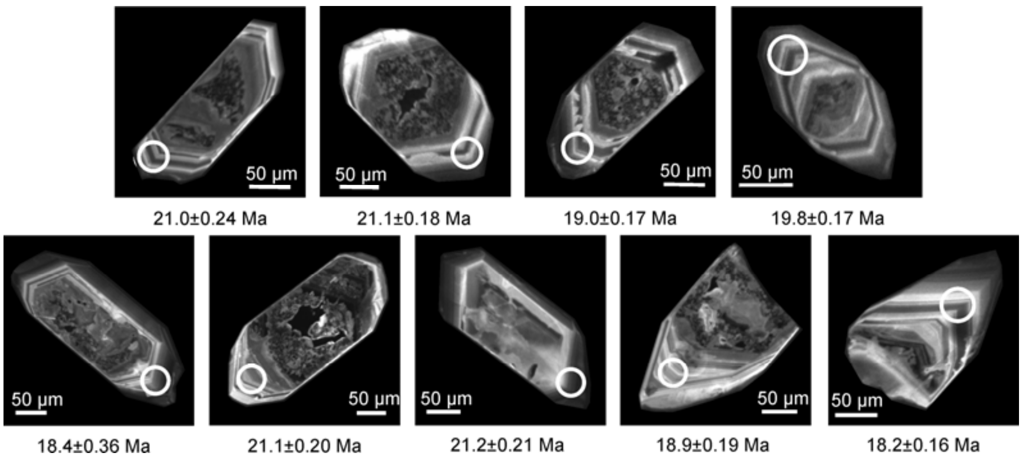

图 4　淡色花岗岩样品 TYC-88 代表性锆石 CL 图像

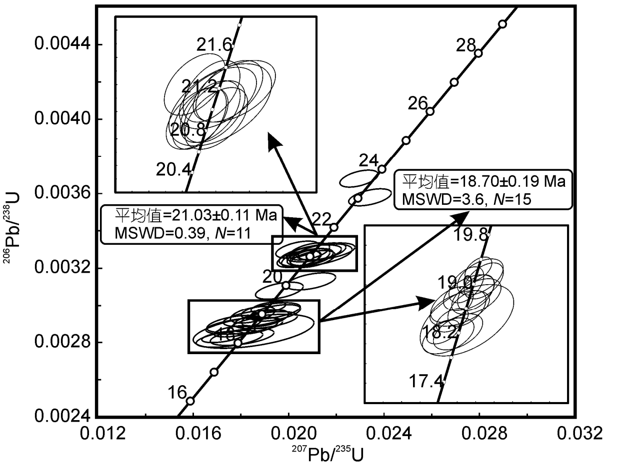

图 5 淡色花岗岩样品 TYC-88 锆石 U-Pb 年龄谐和图

之后发生了由南北向伸展向南北向挤压(东西向伸展)的构造体制转换.

4.2 中新世中期喜马拉雅构造转换

吉隆地区淡色花岗岩脉的构造和年代学分析表明, 本区喜马拉雅造山带在 18.7 Ma 之后发生了由南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换. 而在北喜马拉雅的定结和亚东地区, 南北向伸展构造体制控制的 STDS 被东西向伸展构造体制控制的 NSTR 切割[15,16], 而 NSTR 的活动时间(19~7 Ma)与吉隆地区淡色花岗岩脉记录的挤压逆冲的时间(<18.7 Ma)一致, 表明 NSTR 可能也是南北向挤压作用的产物[28], NSTR 是区域规模上广泛分布的构造现象, 暗示了整个北喜马拉雅构造体制转换的存在.

为了更准确地限定南北向伸展向南北向挤压构造转换的时间, 我们对吉隆和其他地区 STDS 及 NSTR 活动时间进行详细的总结分析(图 7), 结果显示, 代表南北向伸展的 STDS 活动时间约为 36~13 Ma, 主期活动集中于 28~13 Ma; 而代表南北向挤压的 NSTR 活动时间为 19~7 Ma, 主期活动时间为 19~13 Ma, 这表明 28~19 Ma 之间, 喜马拉雅主要受南北向伸展的构造体制控制, 19~13 Ma 喜马拉雅造山带开始发生由南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换, 这个时期喜马拉雅同时受两种构造体制控制, 处于构造体制转换的过渡调整时期, 13 Ma 之后, 喜马拉雅主要受南北向挤压的构造体制控制, 以上分析表明整个喜马拉雅造山带在 19~13 Ma 发生了构

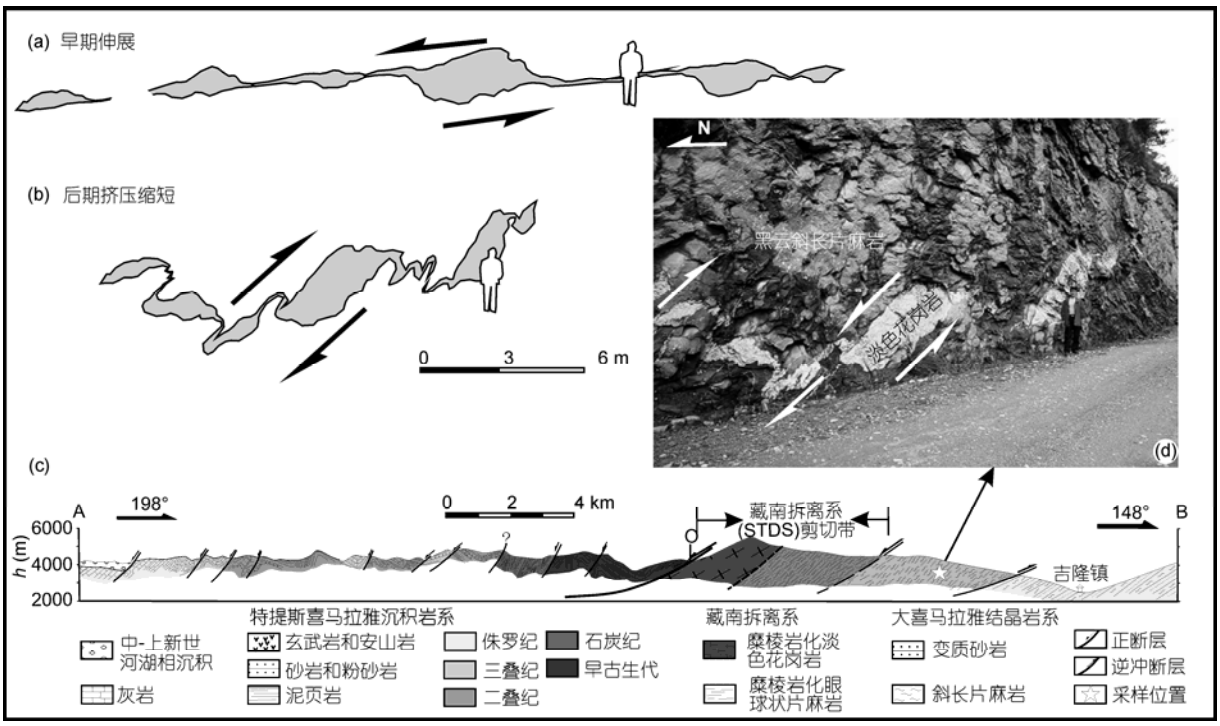

图 6 吉隆地区喜马拉雅造山带剖面图(剖面位置见图 2)及淡色花岗岩脉构造恢复图

(a) 淡色花岗岩脉早期伸展; (b) 淡色花岗岩脉后期挤压缩短; (c) 吉隆地区喜马拉雅造山带剖面图(部分); (d) 淡色花岗岩脉现今出露形态

表 1　吉隆地区淡色花岗岩脉锆石 La-ICP-MS 定年数据

分析点号	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	同位素比值								表观年龄 (Ma)					
				$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	±1σ
TYC-88-01	82.8	6718.9	0.01	0.04780	0.00086	0.02741	0.00043	0.00416	0.00003	0.00165	0.00011	26.8	0.2	27.5	0.4	33.3	2.2
TYC-88-02	35.1	1236.9	0.03	0.04697	0.00433	0.01853	0.00167	0.00286	0.00006	0.00135	0.00033	18.4	0.4	18.6	1.7	27.3	6.8
TYC-88-03	39.2	2573.4	0.02	0.04695	0.00233	0.02113	0.00101	0.00327	0.00004	0.00313	0.00031	21.0	0.2	21.2	1.0	63.1	6.2
TYC-88-04	61.2	1922.1	0.03	0.04854	0.00166	0.02094	0.00068	0.00313	0.00003	0.00173	0.00013	20.1	0.2	21.0	0.7	35.0	2.6
TYC-88-05	19.5	1838.5	0.01	0.04654	0.00175	0.02106	0.00076	0.00328	0.00003	0.00099	0.00034	21.1	0.2	21.2	0.8	20.0	6.9
TYC-88-06	45.1	1785.7	0.03	0.04751	0.00186	0.02155	0.00081	0.00329	0.00003	0.00196	0.00019	21.2	0.2	21.6	0.8	39.5	3.8
TYC-88-07	116.3	2106.6	0.06	0.04496	0.00151	0.01774	0.00057	0.00286	0.00002	0.00102	0.00006	18.4	0.2	17.9	0.6	20.6	1.3
TYC-88-08	59.1	1517.5	0.04	0.04646	0.00179	0.01853	0.00068	0.00289	0.00003	0.00157	0.00012	18.6	0.2	18.6	0.7	31.8	2.4
TYC-88-09	36.1	2238.7	0.02	0.04563	0.00143	0.02044	0.00061	0.00325	0.00003	0.00112	0.00020	20.9	0.2	20.5	0.6	22.6	4.1
TYC-88-10	25.8	1042.3	0.02	0.04614	0.00230	0.01864	0.00091	0.00293	0.00003	0.00148	0.00023	18.9	0.2	18.7	0.9	30.0	4.6
TYC-88-11	34.4	2628.0	0.01	0.04523	0.00113	0.02295	0.00053	0.00368	0.00003	0.00149	0.00018	23.7	0.2	23.0	0.5	30.1	3.6
TYC-88-12	26.2	2102.5	0.01	0.04477	0.00139	0.02037	0.00060	0.00330	0.00003	0.00172	0.00027	21.2	0.2	20.5	0.6	34.7	5.4
TYC-88-13	37.2	2666.1	0.01	0.04585	0.00126	0.02051	0.00053	0.00325	0.00003	0.00108	0.00016	20.9	0.2	20.6	0.5	21.7	3.2
TYC-88-14	46.4	1971.5	0.02	0.04728	0.00227	0.01904	0.00088	0.00292	0.00003	0.00109	0.00014	18.8	0.2	19.1	0.9	22.1	2.8
TYC-88-15	74.9	1930.6	0.04	0.04424	0.00156	0.01724	0.00058	0.00283	0.00002	0.00104	0.00009	18.2	0.2	17.4	0.6	21.0	1.8
TYC-88-16	61.9	1816.3	0.03	0.04709	0.00170	0.01901	0.00065	0.00293	0.00003	0.00112	0.00011	18.9	0.2	19.1	0.7	22.6	2.2
TYC-88-17	32.9	2139.6	0.02	0.04667	0.00141	0.02096	0.00060	0.00326	0.00003	0.00127	0.00019	21.0	0.2	21.1	0.6	25.6	3.9
TYC-88-18	70.2	1686.3	0.04	0.04501	0.00245	0.01752	0.00092	0.00282	0.00003	0.00110	0.00015	18.2	0.2	17.6	0.9	22.2	2.9
TYC-88-19	24.0	2704.1	0.01	0.04747	0.00127	0.02341	0.00059	0.00358	0.00003	0.00376	0.00032	23.0	0.2	23.5	0.6	75.9	6.4
TYC-88-20	31.8	2669.3	0.01	0.04609	0.00131	0.02087	0.00056	0.00329	0.00003	0.00137	0.00020	21.1	0.2	21.0	0.6	27.6	4.1
TYC-88-21	39.6	2165.7	0.02	0.04726	0.00154	0.02140	0.00066	0.00329	0.00003	0.00295	0.00020	21.1	0.2	21.5	0.7	59.5	4.0
TYC-88-22	81.2	2222.1	0.04	0.04556	0.00161	0.01850	0.00062	0.00295	0.00003	0.00153	0.00010	19.0	0.2	18.6	0.6	30.9	2.1
TYC-88-23	137.0	7195.0	0.02	0.04741	0.00084	0.02681	0.00042	0.00410	0.00003	0.00231	0.00008	26.4	0.2	26.9	0.4	46.6	1.6
TYC-88-24	51.0	1636.0	0.03	0.04709	0.00208	0.01925	0.00082	0.00297	0.00003	0.00093	0.00014	19.1	0.2	19.4	0.8	18.7	2.9
TYC-88-25	58.3	1737.5	0.03	0.04438	0.00197	0.01772	0.00076	0.00290	0.00003	0.00135	0.00012	18.6	0.2	17.8	0.8	27.3	2.4
TYC-88-26	75.1	2491.8	0.03	0.04633	0.00139	0.02083	0.00059	0.00326	0.00003	0.00128	0.00010	21.0	0.2	20.9	0.6	25.9	1.9
TYC-88-27	72.5	1835.9	0.04	0.04769	0.00179	0.01944	0.00070	0.00296	0.00003	0.00155	0.00011	19.0	0.2	19.5	0.7	31.3	2.3
TYC-88-28	115.9	2924.6	0.04	0.04646	0.00125	0.01915	0.00048	0.00299	0.00002	0.00095	0.00006	19.2	0.2	19.3	0.5	19.3	1.3
TYC-88-29	17.3	1007.6	0.02	0.04620	0.00232	0.01805	0.00088	0.00283	0.00003	0.00151	0.00036	18.2	0.2	18.2	0.9	30.5	7.3
TYC-88-30	23.0	914.6	0.03	0.04550	0.00272	0.01814	0.00106	0.00289	0.00003	0.00178	0.00026	18.6	0.2	18.3	1.1	36.0	5.3
TYC-88-31	38.4	2122.9	0.02	0.04691	0.00146	0.02101	0.00062	0.00325	0.00003	0.00159	0.00017	20.9	0.2	21.1	0.6	32.1	3.5
TYC-88-32	35.4	1566.4	0.02	0.04615	0.00163	0.01961	0.00066	0.00308	0.00003	0.00173	0.00016	19.8	0.2	19.7	0.7	35.0	3.3

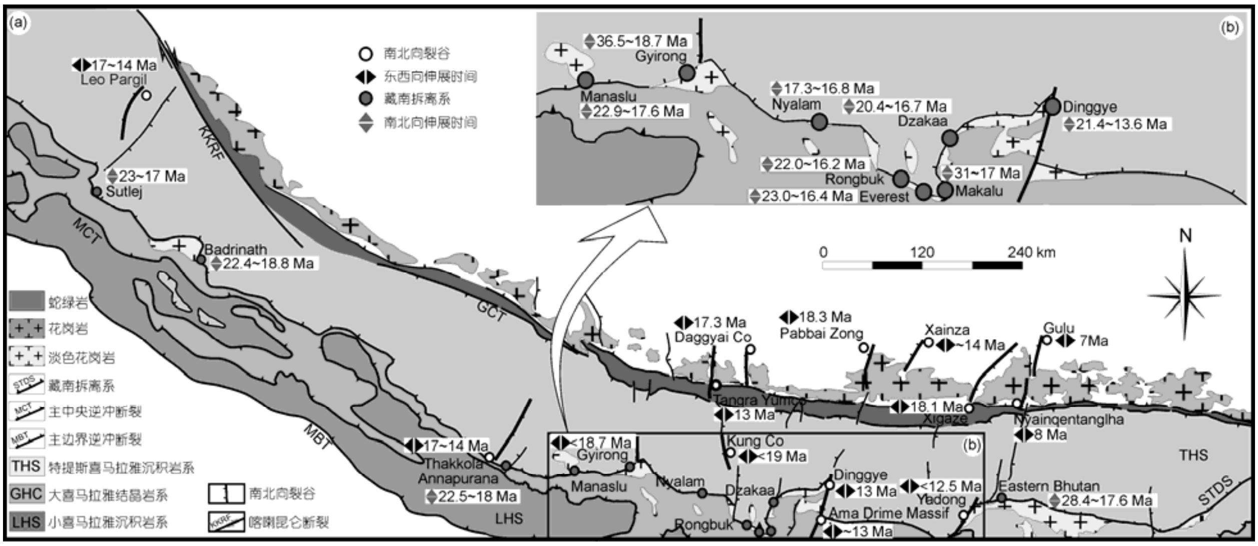

图 7 喜马拉雅造山带 STDS 和 NSTR 活动时间分布图

数据来自文献[2~8,10~15,22,29~48]

造体制的转换. 同时, 在喜马拉雅造山带淡色花岗岩锆石/独居石 U-Pb/U-(Th)-Pb、淡色花岗岩和变质沉积岩云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄谱图中(图 8, 表 S1), 淡色花岗岩的主要侵位时代为 24~13 Ma, 而云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄集中于 18~13 Ma, 花岗岩的侵位年龄与云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 冷却年龄在相同的时间段内达到峰值, 暗示了在 18~13 Ma 的快速冷却事件, 这样的快速冷却很可能是 STDS 伸展拆离与南北向挤压的过程中造山带快速隆升交替进行的共同作用结果, 表明这个时期发生了由伸展垮塌向挤压隆升的过渡调整, 即南北向伸展向南北向挤压的构造转换, 这与前面的分析结果是一致的. 综合以上分析, 本文认为在中中新世(19~13 Ma)喜马拉雅造山带发生了构造体制转换, 19~13 Ma 处于由南北向伸展向南北向挤压的过渡调整时期, 13 Ma 之后, 完全转换为南北向挤压的构造体制, 即~13 Ma 最终完成构造体制的转换.

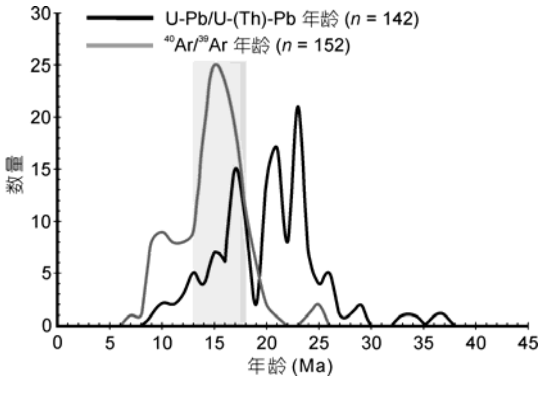

图 8 喜马拉雅造山带淡色花岗岩 U-Pb/U-Th-Pb 及淡色花岗岩、变质沉积岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄谱图

数据来自文献[1~11,13~16,22~24,30,34~83]

4.3 喜马拉雅构造体制转换的地球动力学成因

目前, 对于喜马拉雅造山带南北向挤压和伸展及东西向伸展等构造体制的成因, 主要有以下 3 种模型: (1) 侧向挤出模型. 该模型认为青藏高原物质在南北向挤压下向东挤出[84], 挤出形式表现为上地壳块体向东运动, 或中下地壳物质以"管道流"(Channel flow)形式相对流动, 向东的运动及块体间的差异形成了东西向伸展的构造体制[84,85]; (2) 向南挤出的径向分量模型[48], 该模型认为造山带中下地壳向南流动的过程中产生了东西方向的径向分量, 形成了东西向的拉张, 从而造成了 NSTR 的形成; (3) Zhang 等人[1]最近提出构造体制的转换与印度-欧亚板块的汇聚速率有关[1]. 当汇聚速率较慢时, 其不足以支撑加厚的造山带, 因而造山带发生松弛垮塌, 表现为 STDS 的伸展拆离, 此时构造体制表现为南北向伸展; 当汇聚速率较快时, 发生快速变形, 同时造山带内部发生逆冲、加厚, 表现为南北向的裂谷和指示向南逆冲的不对称褶皱, 此时构造体制主要表现为南北向挤压(东西向伸展).

吉隆地区 GHC 内不对称褶皱的形成时间与区域上 NSTR 的活动时间一致，二者均为南北向挤压变形产物. White 和 Lister[86]最新的研究结果表明，20 Ma 之前，印度-欧亚大陆的汇聚速率逐渐减慢，19~13 Ma 处于汇聚速率加快和减慢的交替过程中，但总体趋势表现为汇聚速率的加快，13 Ma 之后汇聚速率再次加快；Replumaz 等人[87]对印度-欧亚碰撞带的层析成像揭示了印度大陆的多期俯冲，其中前期较陡的俯冲板片在 15 Ma 发生了断离，俯冲角度变小，这导致水平汇聚速率的增加[88]；同时印度板块在中新世汇聚角度发生改变[89]，也可能造成汇聚速率的变化和构造体制的转换[90]. 以上研究结果很好地验证了 Zhang 等人[1]提出的模式: (1) 28~19 Ma 之间，印度-欧亚大陆汇聚速率较慢，造山带发生垮塌，STDS 强烈活动，构造体制表现为南北向伸展; (2) 19~13 Ma，印度-欧亚大陆的汇聚速率处于加快和减慢的交替期，此时 STDS 与 NSTR 交替活动，此阶段构造体制表现为南北向伸展向南北向挤压的过渡调整; (3) ~13 Ma 之后，印度-欧亚大陆汇聚速率再次加快，造成强烈的挤压缩短，形成吉隆地区的不对称褶皱，并使 NSTR 强烈活动.

5 结论

(1) 藏南吉隆地区 STDS 下盘淡色花岗岩脉侵位时间为 21.03~18.7 Ma，淡色花岗岩经历了早期上盘向北的伸展剪切和后期向南的挤压逆冲，即存在南北向伸展向南北向挤压的构造转换，构造转换的时间晚于 18.7 Ma.

(2) 中新世中期喜马拉雅造山带发生了南北向伸展向南北向挤压的构造体制转换，构造体制转换最终的完成时间为~13 Ma.

(3) 喜马拉雅造山带构造体制转换受印度-欧亚大陆汇聚速率变化的控制.

致谢 锆石 CL 拍摄得到中国科学院地质与地球物理研究所叶凯研究员的支持和帮助，锆石 La-ICP-MS U-Pb 定年和数据处理得到中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室的杨迪博士和岳雅慧博士的支持和帮助，在此一并致谢.

参考文献

1 Zhang J J, Santosh M, Wang X X, et al. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision. Gondwna Res, 2012, 21: 939–960

2 Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14-Myr ago from a new minimum age for east-aest extension. Nature, 1995, 374: 49–52

3 Harrison T M, Mckeegan K D, LeFort P. Detection of inherited monazite in the Manaslu leukogranite by $^{208}Pb/^{232}Th$ ion microprobe dating-crystallization age and tectonic implications. Earth Planet Sci Lett, 1995, 133: 271–282

4 Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, et al. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, central Himalaya. J Petrol, 1999, 40: 3–19

5 Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement. J Geol, 1997, 105: 295–317

6 Searle M P, Simpson R L, Law R D, et al. The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal-South Tibet. J Geol Soc London, 2003, 160: 345–366

7 Hodges K V. The thermodynamics of Himalayan orogenesis. In: Treloar P J, O'Brien P J, eds. What Drives Metamorphism and Metamorphic Reactions? Bath: The Geological Society Publishing House, 1998. 7–22

8 Dèzes P J, Vannay J C, Steck A, et al. Synorogenic extension: Quantitative constraints on the age and displacement of the Zanskar shear zone (northwest Himalaya). Geol Soc Am Bull, 1999, 111: 364–374

9 Murphy M A, Harrison T M. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk Valley, South Tibet. Geology, 1999, 27: 831–834

10 Godin L, Grujic D, Law R D, et al. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: An introduction. In: Law R D, Searle M P, Godin L, eds. Geological Society Special Publication. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006, 268. 1–23

11 Cottle J M, Jessup M J, Newell D L, et al. Structural insights into the early stages of exhumation along an orogen-scale detachment: The South Tibetan Detachment system, Dzakaa Chu section, eastern Himalaya. J Struct Geol, 2007, 29: 1781–1797

12 Kellett D A, Grujic D, Warren C, et al. Metamorphic history of a syn-convergent orogen-parallel detachment: The South Tibetan detachment system, Bhutan Himalaya. J Metamorph Geol, 2010, 28: 785–808

13 Leloup P H, Maheo G, Arnaud N, et al. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area Time constraints on extrusion models of the Himalayas. Earth Planet Sci Lett, 2010, 292: 1–16
14 Sachan H K, Kohn M J, Saxena A, et al. The Malari leucogranite, Garhwal Himalaya, northern India: Chemistry, age, and tectonic implications. Geol Soc Am Bull, 2010, 122: 1865–1876
15 Edwards M A, Harrison T M. When did the roof collapse? Late Miocene north-south extension in the high Himalaya revealed by Th-Pb monazite dating of the Khula Kangri granite. Geology, 1997, 25: 543–546
16 Zhang J J, Guo L. Structure and geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the south Tibetan detachment system. J Asian Earth Sci, 2007, 29: 722–736
17 Grujic D, Coutand I, Bookhagen B, et al. Climatic forcing of erosion, landscape, and tectonics in the Bhutan Himalayas. Geology, 2006, 34: 801–804
18 Robinson D M, DeCelles P G, Copeland P. Tectonic evolution of the Himalayan thrust belt in western Nepal: Implications for channel flow models. Geol Soc Am Bull, 2006, 118: 865–885
19 Webb A A G, Yin A, Harrison T M, et al. The leading edge of the Greater Himalayan Crystalline complex revealed in the NW Indian Himalaya: Implications for the evolution of the Himalayan orogen. Geology, 2007, 35: 955–958
20 Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogeny as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. Earth-Sci Rev, 2006, 76: 1–131
21 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原: 青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社, 2007. 1–458
22 Yang X Y, Zhang J J, Qi G W, et al. Structure and deformation around the Gyirong basin, north Himalaya, and onset of the south Tibetan detachment. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 52: 1046–1058
23 Aoya M, Wallis S R, Kawakami T, et al. The Malashan Gneiss Dome in South Tibet: Comparative study with the Kangmar Dome with special reference to kinematics of deformation and origin of associated granites. In: Law R D, Searle M P, Godin L, eds. Geological Society Special Publication. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006. 471–495
24 Kawakami T, Aoya M, Wallis S R, et al. Contact metamorphism in the Malashan dome, North Himalayan gneiss domes, southern Tibet: An example of shallow extensional tectonics in the Tethys Himalaya. J Metamorph Geol, 2007, 25: 831–853
25 Van Achterbergh E, Ryan C, Jackson S, et al. Appendix 3 data reduction software for La-ICP-MS in "Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences". In: Sylvester P, ed. Mineralogical Association of Canada Short Course, 2001, 29: 239–243
26 Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Special publication No.4. Berkeley: Berkeley Geochronology Center. 2003
27 Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, et al. Altas of zircon textures. In: Hanchar J M, Hoskin P W O, eds. Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemisty. Vol 53. Chantilly: Mineralogical Society of America and Geochemical Society, 2003. 469–500
28 张进江. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. 地质通报, 2007, 26: 639–649
29 Coleman M E. U-Pb constraints on Oligocene-Miocene deformation and anatexis within the Central Himalaya, Marsyandi valley, Nepal. Am J Sci, 1998, 298: 553–571
30 Deniel C, Vidal P, Fernandez A, et al. Isotopic study of the Manaslu granite (Himalaya, Nepal)—Inferences on the age and source of Himalayan leukogranites. Contrib Mineral Petrol, 1987, 96: 78–92
31 Groppo C, Rubatto D, Rolfo F, et al. Early Oligocene partial melting in the Main Central Thrust zone (Arun valley, eastern Nepal Himalaya). Lithos, 2010, 118: 287–301
32 Scaillet B, Searle M P. Mechanisms and timescales of felsic magma segregation, ascent and emplacement in the Himalaya. In: Law R D, Searle M P, Godin L, eds. Geological Society Special Publication. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006. 293–308
33 于俊杰, 曾令森, 刘静, 等. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. 岩石学报, 2011, 27: 1961–1972
34 Copeland P, Harrison T M, Lefort P. Age and cooling history of the Manaslu granite—Implications for Himalayan tectonics. J Volcanol Geoth Res, 1990, 44: 33–50
35 Harrison T M, Lovera O M, Grove M. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts. Geology, 1997, 25: 899–902
36 Hodges K V, Parrish R R, Searle M P. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas. Tectonics, 1996, 15: 1264–1291
37 Cottle J M, Jessup M J, Newell D L, et al. Geochronology of granulitized eclogite from the Ama Drime Massif: Implications for the tectonic evolution of the South Tibetan Himalaya. Tectonics, 2009, 28: 1–25
38 Kali E, Leloup P H, Arnaud N, et al. Exhumation history of the deepest central Himalayan rocks (Ama Drime range): Key pressure-temperature deformation-time constraints on orogenic models. Tectonics, 2010, 29: TC2014, doi: 10.1029/2009TC002551
39 Thiede R C, Arrowsmith J R, Bookhagen B, et al. Dome formation and extension in the Tethyan Himalaya, Leo Pargil, northwest India. Geol Soc Am Bull, 2006, 118: 635–650

40 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Activation of the Nyainquentanghla Shear Zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau. Tectonics, 1995, 14: 658–676
41 Williams H, Turner S, Kelley S, et al. Age and composition of dikes in southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism. Geology, 2001, 29: 339–342
42 Stockli D F, Taylor M, Yin A, et al. Late Miocene-Pliocene inception of E-W extension in Tibet as evidenced by apatite (U-Th)/He data. Geol Soc Am Bull, 2002, 34: 411
43 Garzione C N, DeCelles P G, Hodkinson D G, et al. East-west extension and Miocene environmental change in the southern Tibetan Plateau, Thakkhola Graben, central Nepal. Geol Soc Am Bull, 2003, 115: 3–20
44 Murphy M A, Copeland P. Transtensional deformation in the central Himalaya and its role in accommodating growth of the Himalayan orogeny. Tectonics, 2005, 24: 1–19
45 Saylor J E, DeCelles P G, Quade J. Climate-driven environmental change in the Zhada basin, southwestern Tibet. Geosphere, 2010, 6: 74–92
46 Hintersberger E, Thiede R C, Strecker M R, et al. East-west extension in the NW Indian Himalaya. Geol Soc Am Bull, 2010, 122: 1499–1515
47 Lee J, Hager C, Simon R, et al. Middle to late Miocene extremely rapid exhumation and thermal re-equilibration in the Kung Co rift, southern Tibet. Tectonics, 2011, 30: 1–26
48 Mayumi M, Simon R W, Mutsuki A, et al. E-W extension at 19 Ma in the Kung Co area, S. Tibet: Evidence for contemporaneous E-W and N-S extension in the Himalayan orogeny. Earth Planet Sci Lett, 2012, 325-326: 10–20
49 Annen C, Scaillet B, Sparks R S J. Thermal constraints on the emplacement rate of a large intrusive complex: The Manaslu leucogranite, Nepal Himalaya. J Petrol, 2006, 47: 71–95
50 Aoya M, Wallis S R, Terada K, et al. North-south extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement. Geology, 2005, 33: 853–856
51 Carosi R, Montomoli C, Rubatto D, et al. Normal-sense shear zones in the core of the Higher Himalayan Crystallines (Bhutan Himalaya): Evidence for extrusion? In: Law R D, Searle M P, Godin L, eds. Geological Society Special Publication. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006. 425–444
52 Catlos E J, Harrison T M, Manning C E, et al. Records of the evolution of the Himalayan orogen from in situ Th-Pb ion microprobe dating of monazite: Eastern Nepal and western Garhwal. J Asian Earth Sci, 2002, 20: 459–479
53 Chambers J, Caddick M, Argles T. et al. Empirical constraints on extrusion mechanisms from the upper margin of an exhumed high-grade orogenic core, Sutlej valley, NW India. Tectonophysics, 2009, 477: 77–92
54 Daniel C G, Hollister L S, Parrish R R, et al. Exhumation of the Main Central Thrust from lower crustal depths, eastern Bhutan Himalaya. J Metamorph Geol, 2003, 21: 317–334
55 Ding L, Zhong D L, Yin A, et al. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa). Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 423–438
56 Grassman B, Vannay J, Rahn M, et al. Active tectonic exhumation of high-grade metamorphic rocks in the frontal part of the Himalayan orogen: $^{40}Ar/^{39}Ar$ and fission track geochronological evidence from the Sutlej valley (NW India). J Geophys Res, 2001, 114: 24–25
57 Hubbard M S, Harrison T M. $^{40}Ar/^{39}Ar$ Age constraints on deformation and metamorphism in the Main Central Thrust zone and Tibetan slab, eastern Nepal Himalaya. Tectonics, 1989, 8: 865–880
58 Hubbard M S. Thermobarometric constraints on the thermal history of the Main Central Thrust zone and Tibetan slab, eastern Nepal Himalaya. J Metamorph Geol, 1989, 7: 19–30
59 Kapp P, Taylor M, Stockli D, et al. Development of active low-angle normal fault systems during orogenic collapse: Insight from Tibet. Geology, 2008, 36: 7–10
60 Lee J, Hacker B R, Dinklage W S, et al. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints. Tectonics, 2000, 19: 872–895
61 Lee J, McClelland W, Wang Y, et al. Oligocene-Miocene middle crustal flow in southern Tibet: Geochronology of Mabja Dome. Geol Soc London Spec Public, 2006, 268: 445–469
62 Lee J, Whitehouse M J. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages. Geology, 2007, 35: 45–48
63 Liu Y, Siebel W, Massonne H J, et al. Geochronological and petrological constraints for tectonic evolution of the central Greater Himalayan Sequence in the Kharta area, southern Tibet. J Geol, 2007, 115: 215–230
64 Murphy M A, Yin A, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system. Geol Soc Am Bull, 2002, 114: 428–447
65 Noble S R, Searle M P. Age of crustal melting and leukogranite formation from U-Pb zircon and monazite dating in the western Himalaya, Zanskar, India. Geology, 1995, 23: 1135–1138

66 Quigley M, Yu L J, Liu X H, et al. $^{40}Ar/^{39}Ar$ thermochronology of the Kampa Dome, southern Tibet: Implications for tectonic evolution of the North Himalayan gneiss domes. Tectonophysics, 2006, 421: 269–297
67 Schärer U, Xu R H, Allègre C J. U-(Th)-Pb systematics and ages of Himalayan leukogranites, south Tibet. Earth Planet Sci Lett, 1986, 77: 35–48
68 Schärer U. The effect of initial ^{230}Th disequilibrium on young U-Pb ages: The Makalu case, Himalaya. Earth Planet Sci Lett, 1984, 67: 191–204
69 Schneider D A, Edwards M A, Kidd W S F, et al. Early Miocene anatexis identified in the western syntaxis, Pakistan Himalaya. Earth Planet Sci Lett, 1999, 167: 121–129
70 Schneider D A, Edwards M A, Kidd W S F, et al. Tectonics of Nanga Parbat, western Himalaya: Synkinematic plutonism within the doubly vergent shear zones of a crustal-scale pop-up structure. Geology, 1999, 27: 999–1002
71 Searle M P, Noble S R, Hurford A J, et al. Age of crustal melting, emplacement and exhumation history of the Shivling leucogranite, Garhwal Himalaya. Geol Mag, 1999, 136: 513–525
72 Simpson R L, Parrish R R, Searle M P, et al. Two episodes of monazite crystallization during metamorphism and crustal melting in the Everest region of the Nepalese Himalaya. Geology, 2000, 28: 403–406
73 Sorkhabi R B, Stump E, Foland K A, et al. Fission-track and $^{40}Ar/^{39}Ar$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India. Tectonophysics, 1996, 260: 187–199
74 Stuwe K, Foster D. $^{40}Ar/^{39}Ar$, pressure, temperature and fission track constraints on the age and nature of metamorphism around the main central thrust in the eastern Bhutan Himalaya. J Asian Earth Sci, 2001, 19: 85–95
75 Vannay J C, Hodges K V. Tectonometamorphic evolution of the Himalayan metamorphic core between the Annapurna and Dhaulagiri, central Nepal. J Metamorph Geol, 1996, 14: 635–656
76 Viskupic K, Hodges K V. Monazite-xenotime thermochronometry: Methodology and an example from the Nepalese Himalaya. Contrib Mineral Petrol, 2001, 141: 233–247
77 Walker C B. The tectonothermal evolution of the high Himalayas in the Suru Valley, NW Zanskar, with constraints from metamorphic modeling. Dissertation for the Doctoral Degree. Oxford: University of Oxford, 1999. 1–330
78 Wobus C, Heimsath A, Whipple K, et al. Active out-of-sequence thrust faulting in the central Nepalese Himalaya. Nature, 2005, 434: 1008–1011
79 Wu C D, Nelson K D, Wortman G, et al. Yadong cross structure and South Tibetan Detachment in the east central Himalaya (89 degrees-90 degrees E). Tectonics, 1998, 17: 28–45
80 Xu R. Geochronological study of granitoids and metamorphic rocks in Xizang. In: Liu G, Jin C, Wang F, eds. Metamorphism and Igneous Rocks in Xizang (Tibet). Beijing: Geological Publishing House, 1990. 287–321
81 曾令森, 刘静, 高利娥, 等. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义. 科学通报, 2009, 54: 373–381
82 张宏飞, Harris N, Parrish R, 等. 北喜马拉雅萨迦穹窿中苦堆和萨迦淡色花岗岩的 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 2090–2094
83 龚俊峰, 季建清, 桑海清, 等. 喜马拉雅中段哲古拉花岗岩中高压麻粒岩包体及其主岩的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究. 岩石学报, 2006, 22: 2677–2686
84 Armijo R, Tapponnier P, Mercier J P T, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. J Geophys Res, 1986, 91: 13803–13872
85 Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting across southern Tibet. J Geophys Res, 1989, 94: 2787–2838
86 White L H, Lister G S. The collision of India with Asia. J Geodyn, 2012, 56-57: 7–17
87 Replumaz A, Negredo A M, Guillot S, et al. Multiple episodes of continental subduction during Indian/Asia convergence: Insight from seismic tomography and tectonic reconstruction. Tectonophysics, 2010, 483: 125–134
88 Royden L H. The tectonic expression slab pull at continental convergent boundaries. Tectonics, 1993, 12: 303–325
89 Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region. Tectonophysics, 1994, 235: 149–180
90 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学北京与过程——以藏东三江地区构造演化为例. 岩石学报, 2006, 22: 775–786

补充材料

表 S1 喜马拉雅造山带淡色花岗岩锆石 U-Pb/独居石 U-Th-Pb 及云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄统计

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 喜马拉雅造山带淡色花岗岩锆石 U-Pb/独居石 U-Th-Pb 及云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄统计

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Yadong	GHC	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	8.9±0.2	[59]
Maja	THS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	9.5±0.5	[67]
Mabja	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	9.8±0.7	[67]
Ama Drime	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	9.8±1.2	[38]
Ama Drime	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	11.0±0.4	[38]
Ama Drime	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	11.6±0.4	[38]
Ama Drime	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	11.6±0.4	[37]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	12.3±1.5	[37]
Khula kangri	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	12.5±0.4	[15]
Gonto-La	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	12.5±0.5	[15]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	12.8±0.2	[63]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	12.9±0.4	[38]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	12.0±0.1	[12]
Ama Drime	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	13.1±0.3	[38]
Bhutan	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	13.4±0.2	[54]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	13.4±1.0	[63]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	13.6±1.3	[13]
Mabja	THS	花岗岩	锆石	U-Pb	14.2±0.2	[61]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	14.2±0.4	[13]
Everest	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	14.3±0.6	[67]
Mabja	THS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	14.4±0.1	[82]
Saja	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	14.4±0.2	[82]
Mabja	THS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	14.5±0.1	[61]
Lhagoi Kangri	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	14.7±1.0	[80]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.1±0.1	[13]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.1±0.3	[13]
Lhagoi Kangri	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.1±0.5	[67]
Lhagoi Kangri	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.1±0.5	[35]
Yadong	GHC	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	15.2±0.4	[59]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.6±0.6	[13]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	15.9±0.8	[13]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.0±0.3	[13]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.0±0.9	[13]
Mabja	THS	花岗岩	锆石	U-Pb	16.2±0.4	[62]
Rongbuk	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.2±0.8	[9]
Everest	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.4±0.1	[6]
Rongbuk	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.4±0.6	[9]
Rongbuk	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.7	[7]
Lingtren	STDS	花岗岩	磷钇矿	U-(Th)-Pb	16.6±0.1	[6]
Dzakaa Chu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.7±0.3	[11]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	16.8±0.4	[12]
Nyalam	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.8±0.6	[67]
Rongbuk	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.8±0.8	[9]
Everest	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.9±0.2	[6]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	16.9±0.8	[13]
Bhutan	GHC	花岗岩	锆石	U-Pb	17.0±0.2	[51]
Nyalam	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.2±0.9	[67]

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Shisha Pangma	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.3±0.3	[5]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	17.4±0.2	[12]
Dolpo	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.6±0.3	[4]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	17.6±0.3	[12]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.6±0.3	[4]
Lhagoi Kangri	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.6±0.3	[35]
Ama Dablam	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	17.7	[6]
Malashan	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	17.8±1.1	[50]
Malashan	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	18.6±2.8	[50]
Malari	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	18.8±0.4	[14]
Annapura	STDS	花岗岩	锆石	U-Pb	19	[10]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	19.0±0.1	[2]
Manaslu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	19.0±0.4	[4]
Garhwal	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.0±0.5	[14]
Western syntaxis	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	19.1±1.5	[69]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.2±0.6	[12]
Manaslu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	19.3±0.3	[4]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.3±0.3	[12]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.3±0.3	[4]
Malashan	THS	花岗岩	锆石	U-Pb	19.3±3.9	[24]
Zanskar	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	19.5	[8]
Rongbuk	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.5±0.4	[34]
Rongbuk	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.5±0.4	[72]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	19.5±1.1	[12]
Zanskar	THS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.0±0.5	[65]
Everest	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.0±1.0	[34]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	20.0±1.7	[22]
Nar Valley	GHC	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	20.1±0.1	[10]
Lhotse	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.2±1.0	[6]
Shishi Pangma	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.2±0.2	[5]
Everest	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.3±0.3	[72]
Dzakaa Chu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.4±0.6	[11]
Pumori	GHC	花岗岩	锆石	U-Pb	20.5	[72]
Bhutan	GHC	花岗岩	锆石	U-Pb	20.5±0.5	[51]
Everest	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.5-21.3	[6]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	20.6±0.4	[12]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.7±0.1	[57~58]
Namche	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.7±0.1	[52]
Zanskar	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.8	[77]
Zanskar	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.8±0.3	[65]
Lukla	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	20.9±0.3	[52]
langtang	GHC	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	21.0	[9]
Nepal	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	21.0±2.0	[14]
Yadong	GHC	花岗岩	锆石	U-Pb	21.7±0.6	[59]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	21.8±1.3	[22]
Makalu	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	21.9±0.2	[68]
Namche	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	21.9±0.2	[52]
Garhwal	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	21.9±0.5	[35]
Shivling	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	21.9±0.5	[3]

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Annapurna	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.1	[36]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.1±0.1	[57~58]
Ghat	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.1±0.1	[52]
Namche	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.1±0.22	[75]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	22.1±0.6	[12]
Zanskar	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.2±0.2	[8]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.3±0.5	[3]
Garhwal	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.4±0.5	[35]
Manaslu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.4±0.5	[3]
Gangotri	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.4±0.5	[35]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.4±0.5	[2]
Annapura	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.5	[10]
Jiali	GHC	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	22.6±0.3	[55]
Malashan	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	22.6±0.3	[50]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.7±0.1	[57~58]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.7±0.3	[57~58]
Namche	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.7±0.3	[52]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	22.7±1.6	[12]
Gaowu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.9±0.2	[79]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	22.9±0.6	[4]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	锆石	U-Pb	22.9±2.1	[63]
Shivling	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	23.0	[71]
Makalu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	23.0±0.1	[68]
Garhwal	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	23.0±0.2	[71]
Everest	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	23.0±1.0	[3]
Mabja	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	23.1±0.8	[61]
Mabja	THS	花岗岩	锆石	U-Pb	23.1±0.8	[61]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	23.4±0.6	[12]
Makalu	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	24.0±0.4	[68]
Manaslu	STDS	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	24.0±0.8	[4]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	24.4±0.2	[57~58]
Ghat	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	24.4±0.2	[52]
Manaslu	STDS	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	25.0	[30]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	25.3±0.2	[57~58]
Ghat	GHC	花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	25.3±0.2	[52]
Namche	GHC	淡色花岗岩	独居石	U-(Th)-Pb	25.4±0.11	[76]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	25.7±0.7	[22]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	26.8±0.7	[22]
Mabja	THS	花岗岩	锆石	U-Pb	27.5±0.5	[82]
Everest	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	28.1±0.5	[52]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	28.4±0.9	[12]
Eastern Nepal	GHC	花岗质片麻岩	独居石	U-(Th)-Pb	32.2±0.2	[57~58]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	32.2±1.6	[22]
Ama Drime	GHC	花岗质片麻岩	锆石	U-Pb	33.0±2.1	[63]
Yalashangbo	THS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	35.3±1.1	[81]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	锆石	U-Pb	36.5±2.2	[22]
Ama Drime	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	6.60±0.10	[38]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	7.40±0.20	[64]
Nepal	GHC	混合岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.06±0.10	[78]

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.10±0.20	[64]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.10±0.40	[64]
Nepal	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.16±0.11	[78]
Ama Drime	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.50±0.20	[38]
Nepal	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.83±0.11	[78]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.90±0.10	[64]
Nepal	GHC	混合岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	8.99±0.23	[78]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.30±0.50	[64]
Nepal	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.54±0.11	[78]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.65±0.05	[56]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.80±0.30	[64]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.80±0.40	[64]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.80±0.80	[64]
Western syntaxis	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.87±0.77	[69]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	9.90±0.40	[64]
Western syntaxis	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.33±0.14	[69]
Sutlej	THS	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.40±2.30	[53]
Ama Drime	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.70±0.30	[38]
Ama Drime	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.72±0.73	[38]
Ama Drime	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.80±0.40	[38]
Ama Drime	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	10.90±0.20	[38]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.10±0.10	[12]
Western syntaxis	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.25±0.12	[69]
Barsong	MCT	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.30±0.20	[74]
Chegu La	GHC	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.48±0.18	[83]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.50±0.10	[12]
Barsong	MCT	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.60±0.20	[74]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.70±0.10	[12]
Ama Drime	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	11.70±0.20	[38]
Sutlej	THS	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.03±0.74	[53]
Ama Drime	THS	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.10±2.40	[38]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.12±0.06	[60]
Gurla Manahata	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.30±0.40	[64]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.61±0.06	[60]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.71±0.08	[60]
Mabja	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.84±0.08	[61]
Mabja	THS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.85±0.13	[61]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	12.86±0.30	[60]
Nepal	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.00±0.13	[78]
Mabja	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.13±0.06	[61]
Bhutan	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.20±0.10	[12]
Mabja	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.29±0.09	[61]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.35±0.06	[60]
Mabja	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.49±0.12	[61]
Mabja	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.54±0.06	[61]
Mabja	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.58±0.13	[61]
Mabja	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.61±0.12	[61]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.66±0.06	[60]
Kampa	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.74±0.28	[66]

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Kampa	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.80±0.07	[66]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.80±0.20	[13]
Kampa	THS	花岗岩片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.80±0.07	[66]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.90±0.20	[13]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.90±0.20	[13]
Kali Gandaki	MCT	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.90±0.60	[75]
Nepal	GHC	片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	13.94±0.10	[78]
Leo Pargil	THS	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.05±0.10	[39]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.20±0.10	[13]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.20±0.50	[16]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.20±0.10	[13]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.20±0.30	[10]
Ama Drime	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.20±0.50	[16]
Kampa	THS	千枚岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.22±0.18	[66]
Sutlej	THS	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.23±0.70	[53]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.30±0.20	[10]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.46±0.20	[60]
Leo Pargil	THS	变泥质岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.50±0.10	[39]
Sutlej	THS	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.52±0.57	[53]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.56±0.10	[60]
Kampa	THS	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.64±0.15	[66]
Kampa	THS	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.65±0.08	[66]
Kampa	THS	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.68±0.07	[66]
Manaslu	STDS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.70±0.20	[49]
Barsong	MCT	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.70±0.30	[74]
Kali Gandaki	MCT	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.70±0.80	[75]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.80±0.30	[10]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.82±0.08	[60]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.91±0.20	[60]
Kampa	THS	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.91±0.26	[66]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	14.98±0.06	[60]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.00±0.20	[1]
Dinggye	STDS	淡色花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.20±0.30	[13]
Kangmar	THS	副片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.24±0.05	[60]
Malashan	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.27±0.06	[50]
Sutlej	THS	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.37±0.70	[53]
Kampa	THS	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.39±0.23	[66]
Leo Pargil	THS	变泥质岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.40±0.10	[39]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.40±0.07	[56]
Kampa	THS	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.42±0.30	[66]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.47±0.29	[56]
Leo Pargil	THS	变泥质岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.50±0.10	[39]
Malashan	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.50±0.06	[50]
Leo Pargil	THS	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.50±0.10	[39]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.50±0.50	[10]
Kampa	THS	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.54±0.39	[66]
Malashan	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.68±0.03	[50]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.80±0.30	[1]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.86±0.07	[56]

地点	构造单元	岩性	定年矿物	定年方法	年龄(Ma)	参考文献
Dongjiu	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.90±0.20	[55]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.90±0.90	[10]
Malashan	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.93±0.04	[50]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.93±0.08	[56]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	15.99±0.08	[60]
Nar Valley	GHC	花岗岩片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.00±0.30	[10]
Nar Valley	GHC	大理岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.00±1.30	[10]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.10±0.60	[10]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.28±0.08	[60]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.30±0.30	[1]
Ama Drime	STDS	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.30±0.20	[13]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.30±0.20	[10]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.30±0.50	[10]
Everest	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.37±0.40	[7]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.39±0.07	[56]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.59±0.09	[56]
Manaslu	STDS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.60±0.10	[49]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.60±0.30	[10]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.60±0.40	[10]
Everest	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.70±0.40	[34]
Nar Valley	GHC	花岗岩片麻岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.90±0.20	[10]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	16.90±0.60	[10]
Kangmar	THS	副片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.04±0.04	[60]
Mabja	THS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.09±0.19	[61]
Manaslu	STDS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.10±0.10	[34]
Everest	STDS	淡色花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.10±0.40	[34]
Gyirong	STDS	淡色花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.30±0.30	[1]
Nar Valley	GHC	花岗岩片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.50±0.30	[10]
Sutlej Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.65±0.07	[56]
Mabja	THS	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.66±0.16	[61]
Gangotri	GHC	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	17.90±0.10	[70]
Gangotri	GHC	花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	18.00±0.10	[70]
Nar Valley	GHC	大理岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	18.10±0.20	[10]
Nar Valley	GHC	泥质片岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	18.20±0.80	[10]
Manaslu	STDS	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	18.40±0.10	[34]
Nar Valley	GHC	花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	19.30±0.20	[10]
Everest	STDS	淡色花岗岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	20.90±0.20	[57]
Nar Valley	GHC	花岗岩片麻岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	23.10±0.10	[10]
Ama Drime	GHC	变质沉积岩	黑云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	24.10±0.30	[38]
Nar Valley	GHC	变质沉积岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	24.50±0.70	[10]