

DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04009

马子宁, 韩中鹏, 李亚林, 毕文军, 徐田堃, 肖思祺, 2022. 西藏南部康巴穹隆剥露历史分析: 来自低温热年代学的证据. 沉积与特提斯地质, 42(2): 300-309. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04009.

MA Z N, HAN Z P, LI Y L, BI W J, XU T K, XIAO S Q, 2022. Exhumation history of the Kampa dome in the southern Tibet: Evidence from low-temperature thermochronology. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2): 300-309. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04009.

西藏南部康巴穹隆剥露历史分析: 来自低温热年代学的证据

马子宁¹, 韩中鹏², 李亚林¹, 毕文军³, 徐田堃¹, 肖思祺¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083; 3. 太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:造山带穹隆构造记录了陆-陆碰撞及其碰撞后地壳和地表演化过程的信息,是探讨造山带构造演化的重要窗口。康巴穹隆位于藏南特提斯喜马拉雅地区,是北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)的组成部分,其剥露过程及其动力学机制仍然存在争议。通过对康巴穹隆核部花岗岩片麻岩开展锆石 U-Pb、锆石裂变径迹(ZFT)年代学研究和三维数值模拟,获得了康巴穹隆的锆石 U-Pb 年龄为 497.89 ± 1.2 Ma, 锆石 FT 年龄(17~11 Ma)明显小于锆石 U-Pb 结晶年龄,说明这些径迹年龄是岩体冷却抬升形成的。Pecube 三维数值模拟对穹隆核部样品的 ZFT 数据进行反演显示,康巴穹隆核部岩体自中新世以来经历 15.9~11.4 Ma 和 ca. 4.2 Ma 两次快速剥露,结合区域构造演化,提出第一次快速剥露与藏南拆离系(STDS)的活动有关,第二次快速剥露是对气候变化过程的响应。

关键词:藏南;康巴穹隆;锆石裂变径迹;Pecube

中图分类号:P597.3; P542

文献标识码:A

Exhumation history of the Kampa dome in the southern Tibet: Evidence from low-temperature thermochronology

MA Zining¹, HAN Zhongpeng², LI Yalin¹, BI Wenjun³, XU Tiankun¹, XIAO Siqi¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Department of Earth Sciences and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The orogenic dome structure records the crustal and terrestrial evolution process of the continental-continental collision and its post-collision is an important window for discussing the tectonic evolution of the orogenic belt. The Kampa dome located in the Tethys Himalayas, southern Tibet, is a component of the Northern Himalayan gneiss dome (NHGD), its exhumation process and its dynamic mechanism are still controversial. The zircon U-Pb, zircon fission-track (ZFT) age dating, and three-dimensional numerical simulation of the granite gneiss at the core of the Kampa dome are carried out, the zircon U-Pb age of the Kampa dome is obtained as: 497.89 ± 1.2 Ma, The FT age of zircon (17-11 Ma) is significantly smaller than the crystallization age of zircon U-Pb,

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-4-14; 责任编辑: 郭秀梅; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 马子宁(1993—),男,博士研究生,研究方向为盆地构造分析与动力学。E-mail: mznucgh@163.com

资助项目: 中国地质调查局(DD20190057)、国家自然科学基金(91955206)、第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0803)项目联合资助

indicating that these ZFT ages are formed by the cooling and uplifting of the dome. The inversion of the ZFT data of the core samples by Pecube shows the Kampa dome has experienced two rapid exhumation events at 15.9-11.4 Ma and ~4.2 Ma since the Miocene. Combined with the regional tectonic evolution, we propose that the first rapid exhumation is related to the activity of the South Tibet Detachment System (STDS), and the second rapid exhumation is a response to the climate changing process.

Key words: southern Tibet; kampa dome; zircon fission-track; pecube

0 引言

片麻岩穹隆是由中下地壳热动力学过程产生的、与岩浆作用紧密联系的穹隆状构造(Eskola, 1948; 许志琴和马绪宣, 2015)。北喜马拉雅片麻岩穹隆保存了特提斯喜马拉雅地区自印度与欧亚板块碰撞以来, 中下地壳构造变形、高级变质、地壳深熔及地表过程的重要信息(曾令森等, 2008), 查明其剥露历史能为刻画陆-陆碰撞后的造山过程提供重要依据。前人对穹隆核部岩体与上覆盖层之间接触关系和相对运动过程存在不同的认识, 包括“侵入接触关系”(Burg et al., 1984)、较小运动量的“不整合接触关系”(Lee et al., 2000)与上盘相对下盘向北运动的“拆离断层接触关系”(Chen et al., 1990; Burchfiel et al., 1992; 王根厚等, 1997; Steck et al., 1998; Edwards et al., 1999; Hodges, 2000), 这也导致对整个穹隆构造形成的动力学机制存在不同的观点。可见, 明确穹隆构造内伸展断裂的性质及活动过程是全面认识其形成演化的首要前提。低温热年代学是研究地壳浅部热史演化的重要手段, 也是精确刻画区域剥露历史的有效手段。

康巴穹隆位于喜马拉雅中段、藏南低分水岭地区(李德威等, 2003; 刘德民等, 2005), 在经历自新生代以来持续性构造活动的同时, 留存有大量冰川和地面径流等地表过程造成的侵蚀地貌。穹隆核部的花岗片麻岩是进行低温热年代学研究的理想对象, 反演其冷却历史不仅能为穹隆构造的形成提供可靠依据, 也是探讨构造与气候的耦合过程的关键环节。

本文在野外基岩样品采集和低温热年代学实验结果模拟的基础上, 建立了康巴穹隆区域地貌的演化模型, 获得了核部岩体自中新世以来的剥露速率及其隆升时限, 明确了康巴穹隆伸展断裂带与藏南拆离系(STDS)之间的运动学关系, 结合区域构造活动与气候条件, 探讨了核部岩体两次快速冷却的构造-气候成因。

1 区域地质背景

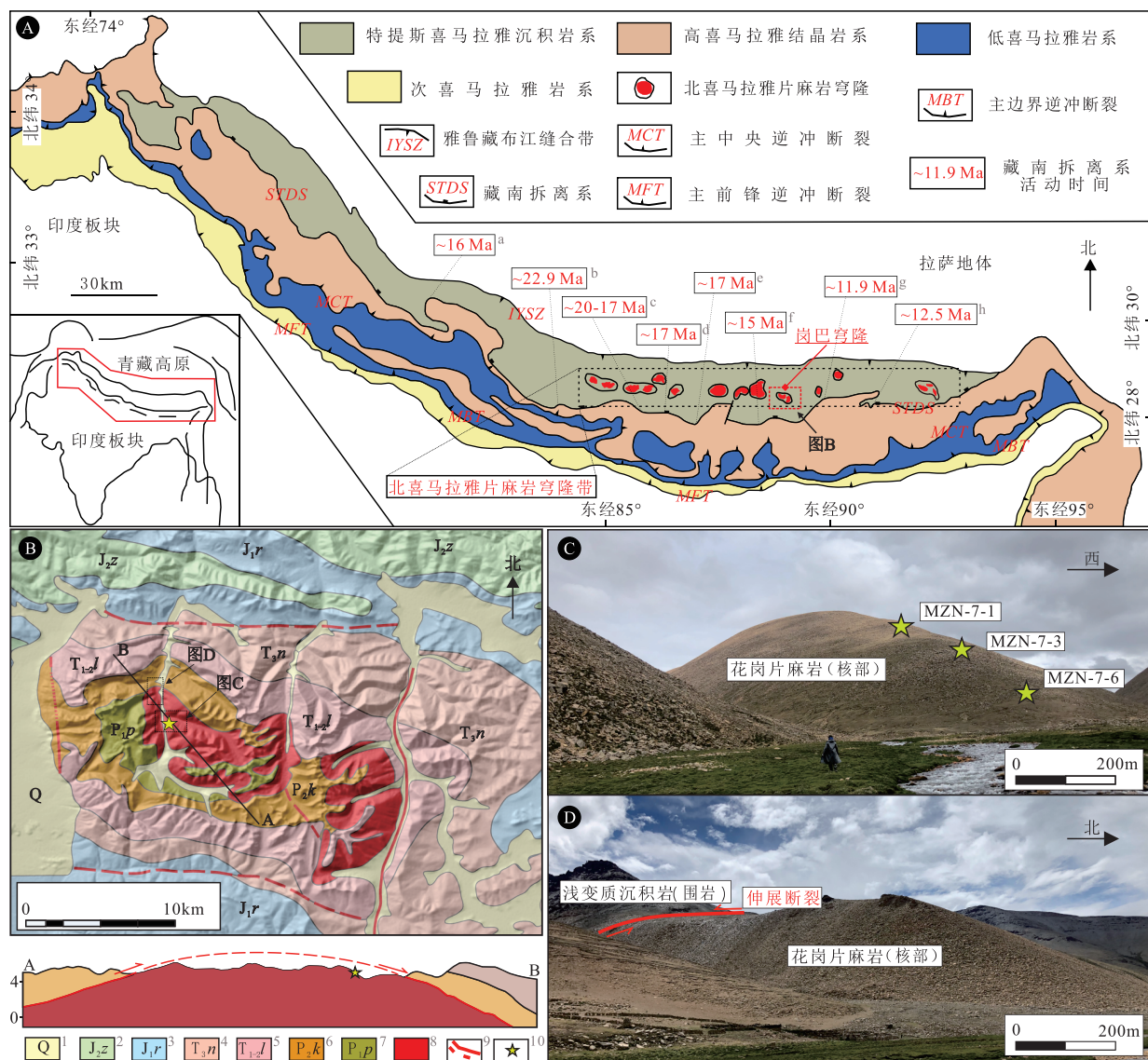
北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)(Zhang J et al., 2012)位于藏南拆离系(STDS)与雅鲁藏布江缝合带(IYSZ)之间的特提斯喜马拉雅地区(张志等, 2017, 图 1A), 是由一系列不连续的、自西向东近同纬度带状分布的穹隆组成。带内穹隆的核部岩体由古生代花岗岩(如康马穹隆; Chen et al., 1990; Lee, et al., 2000)、康巴穹隆(Quigley et al., 2006, 2008; Liu et al., 2016; Lin et al., 2020)或新生代淡色花岗岩(如雅拉香波穹隆; Zeng et al., 2009)组成, 岩体之上覆以浅变质的特提斯喜马拉雅岩系(董汉文等, 2017), 两者多呈伸展断层接触。由于大多数穹隆核部的淡色花岗岩(脉)在岩石组合和地球化学特征上与高喜马拉雅淡色花岗岩具有一致性、伸展断裂带与藏南拆离系(STDS)具有相似的构造特征, 所以伸展断裂带常被认为是藏南拆离系(STDS)在特提斯喜马拉雅地区的延伸出露(Chen et al., 1990; Burchfiel et al., 1992; Steck et al., 1998; Edwards et al., 1999; Hodges, 2000; Lee et al., 2006; Aoya et al., 2006; 张进江, 2007; Zhang et al., 2012; 王晓先等, 2015)。

康巴穹隆位于北喜马拉雅片麻岩穹隆带中部, 核部岩体主体由花岗片麻岩组成, 出露形态不规则, 总体呈近东西向展布, 面积约为 400 km²(周志广, 2008; 图 1B)。核部岩体与特提斯喜马拉雅沉积地层以伸展断裂接触(图 1B, D), 穹隆区域内留存有大量冰川和地面径流等地表过程造成的侵蚀地貌。

2 采样、实验测试及模拟

2.1 样品采集及前期处理

本研究样品为远离淡色花岗岩岩脉的新鲜花岗片麻岩(图 1B、C), 共采集年龄高程剖面样品 3 件, 用于锆石 FT 年龄分析, 同时采集 1 件基岩样品用于锆石 U-Pb 年龄分析, 通过手持 GPS 确定采样位置, 海拔高度分布为 5050 ~ 5450m, 采样间隔为



1—第四系沉积;2—上侏罗统遮拉组;3—下侏罗统日当组;4—上三叠统涅如组;5—中、下三叠统吕村组;6—中二叠统康马组;7—下二叠统破林浦组;8—加里东期花岗片麻岩;9—实测、推测断层;10—高程剖面位置

图 A 修改自 (Liu et al., 2017; Wang Y et al., 2017, 2021; Khanal et al., 2020), 数据来源: a (Wang Y et al., 2005), b (Harrison et al., 1999), c (Searle et al., 1997), d (Schärer U et al., 1986), e (Murphy, 2007), f (Leloup et al., 2010), g (Wu et al., 1998), h (Edwards et al., 1999); 图 B 修改自 (Quigley et al., 2008; Lin et al., 2020)

图 1 喜马拉雅造山带地质简图(A)、康巴穹隆地质图及剖面图(B)、穹隆核部岩体(C)、伸展断裂图(D)

Fig. 1 Simplified geologic map of the Himalayan orogen (A), Simplified geologic map of the Kampa dome and NE-SW geological cross-section A-B (B), core of the dome (C) and extensional fault of the dome (D)

200m(图 1C), 均位于穹隆体核部。单颗粒锆石的挑选工作在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成, 是按照标准重矿物分离方法将初碎样品逐级破碎至 60 目, 再经重液分离法和磁选法等手段进行分离提纯后, 在体视镜下选出晶形完好、表面无裂隙、内部无包裹体的锆石颗粒。

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

锆石制靶、阴极发光图像 (CL) 采集以及 LA-

ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析工作均在湖北省武汉上谱分析科技有限责任公司完成。实验前期处理是将锆石颗粒经环氧树脂粘贴于样品靶上, 根据阴极发光图像遴选锆石 U-Pb 同位素测试点 (图 3B)。锆石 U-Pb 定年测试利用 LA-ICP-MS 仪器分析完成, 详细的仪器参数和分析流程见 (Zong et al., 2017)。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及

U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Ludwig, 2003; Liu Y et al., 2008, 2010)完成。

2.3 锆石裂变径迹(ZFT)年代学

锆石裂变径迹(ZFT)样品的制备与测试均在北京安普泰德科技有限公司进行。实验首先将经打磨抛光露出矿物颗粒最大面的锆石靶片在 210℃ 条件下的 KOH + NaOH 高温熔融物内蚀刻 20 ~ 35h, 以揭示其自发径迹(Yuan et al., 2003, 2006), 再将样品与无铀白云母片叠合后, 与 CN2 锆石标准铀玻璃(Bellemans et al., 1995)一并接受热中子辐照(Yuan et al., 2006), 利用 25℃ 条件下的 40% HF 溶液蚀刻白云母外探测器, 揭示样品诱发径迹, 矿物的自发/诱发径迹的测量统计均采用 1200 倍高精度光学显微镜。

2.4 Pecube 三维数值模拟技术

为了进一步还原康巴穹隆的剥露过程, 本文使用了 Bruan(2012)团队开发编写的三维数值模型 Pecube。该模型的原理是通过赋予研究区岩石圈地壳几何参数、地表地形和构造环境等边界条件, 在经历构造抬升、地表侵蚀和地形演化的地质块体中, 以有限元的方法解三维热传导方程, 从而模拟地壳内部地温场(Braun et al., 2012; 周祖翼, 2014; 张远泽, 2015)。将运用此“温度-时间轨迹”模拟计算出的热年代学年龄, 与实测热年代学年龄对比, 可获得评价模型失配度的指标 misfit。

在 Pecube 正演的运行代码中, 本文根据遥感影像确定了康巴穹隆研究区所需模拟的区域, 并采用 ArcGis 软件提取了模型地表的边界数字高程模型(DEM)数据; 结合前人研究资料, 设定了反演模型的其他边界条件, 包括地壳厚度、边界坐标等在内的地壳几何参数, 其中岩石密度为地壳密度 $2700\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Valla et al., 2010; Ge et al., 2020)、地幔密度为 $3200\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Pierre et al., 2010), 热扩散率为 $25\text{km}^2 \cdot \text{Ma}^{-1}$ (Braun et al., 2012)、模型厚度 50km(Li et al., 2006; Wang C Y et al., 2010), 地表温度 8℃ 和大气温度梯度为 $4^\circ\text{C}/\text{km}$ (Bermudez et al., 2011), 建立了与地质事实较相符的正演模型(图 2)。

在 Pecube 反演运行代码中, 本文将康巴穹隆 3 个样品的实测年代学数据内置于低温测年体系中, 其“剥蚀速率转换时间”及“阶段剥蚀速率”的取值范围及最优结果见表 1。模型反演的次数参数为: 初始模型 500 个、重反演模型 200 个、邻域计算 50

次, 共计 10500 个模型。本文的三维数值模拟工作获得国家超级计算广州中心支持, 是经“天河二号”超级计算机内 5 节点、120 核并行计算 36h 完成。

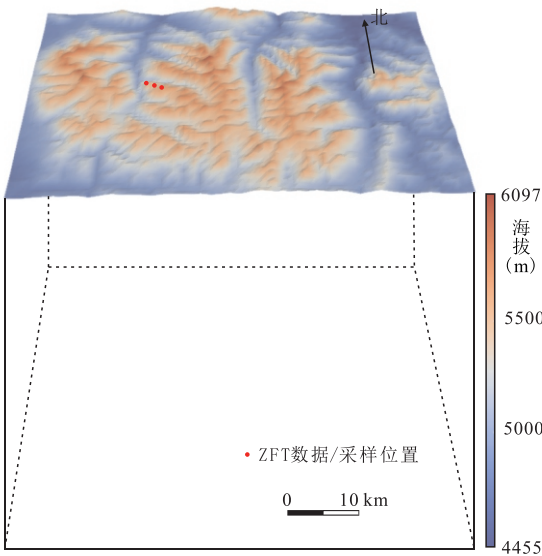


图 2 康巴穹隆研究区 Pecube 模型
Fig. 2 Pecube model of the Kampa dome

表 1 Pecube 模型反演参数及结果

Table 1 Modeling parameters and results of Pecube inversion

参数名称	取值范围	最佳结果
转换时间 1 (Ma)	20 ~ 15	15.9
转换时间 2 (Ma)	15 ~ 10	11.4
转换时间 3 (Ma)	5 ~ 0	4.2
剥蚀速率 1 (km/Ma)	0 ~ 2	0.08
剥蚀速率 2 (km/Ma)	0 ~ 2	1.38
剥蚀速率 3 (km/Ma)	0 ~ 2	0.09
剥蚀速率 4 (km/Ma)	0.2	0.98

测试单位: 国家超级计算广州中心

3 实验结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄结果

锆石样品的 U-Pb 年龄谐和锆石频率分布直方图(图 3A)的绘制采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。康巴穹隆核部岩体样品(MZN-7-4)自形程度较高、呈长柱状, 长宽比约为 3:1。锆石颗粒内部结构清晰, 无包裹体, 边部干净, 具有明显的韵律环带结构(图 3B), 锆石 Th 和 U 含量分别在 $78 \times 10^{-6} \sim 2668 \times 10^{-6}$ 和 $107 \times 10^{-6} \sim 3066 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 比值在 0.44 ~ 0.99 之间(表 2), 谐和年龄为 $497.89 \pm 1.2\text{Ma}$ (图 3A)。

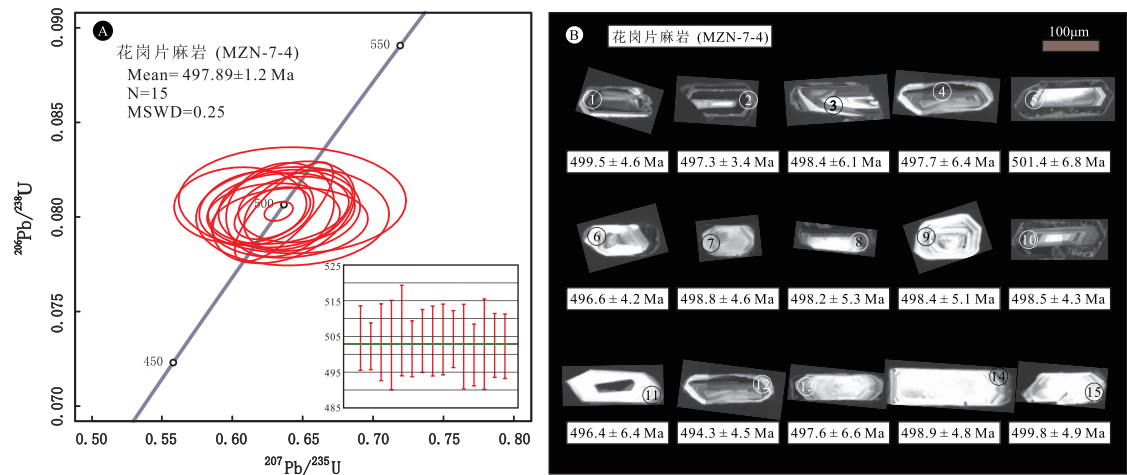


图3 康巴穹隆花岗片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图(A)、锆石 CL 阴极发光图像及测试位置(B)

Fig. 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram of the gneiss granite from the Kampa dome (A)、CL images of the representative zircons(B)

表 2 康巴穹隆核部岩体花岗片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 2 Concordia plots of the zircon U-Pb dating data for the granitic gneiss in the core of the Kampa dome

样品序号	Th	U	Th/U 比值	同位素比值 (± 1σ)						年龄 (± 1σ Ma)			
	(× 10 ⁻⁶)	(× 10 ⁻⁶)		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
花岗片麻岩 (MZN-7-4)													
MZN-7-4-01	1476	2997	0.49	0.0565	0.0011	0.6306	0.0125	0.0806	0.0008	496.5	7.8	499.5	4.6
MZN-7-4-02	2668	3066	0.87	0.0565	0.0010	0.6281	0.0110	0.0802	0.0006	494.9	6.9	497.3	3.4
MZN-7-4-03	275	570	0.48	0.0572	0.0014	0.6335	0.0157	0.0804	0.0010	498.3	9.7	498.4	6.1
MZN-7-4-04	686	1423	0.48	0.0572	0.0010	0.6363	0.0143	0.0803	0.0011	500.0	8.9	497.7	6.4
MZN-7-4-05	392	884	0.44	0.0524	0.0035	0.6423	0.0330	0.0809	0.0011	503.7	20.4	501.4	6.8
MZN-7-4-06	283	350	0.81	0.0569	0.0017	0.6289	0.0193	0.0801	0.0007	495.4	12.0	496.6	4.2
MZN-7-4-07	215	228	0.94	0.0569	0.0018	0.6324	0.0204	0.0804	0.0008	497.6	12.7	498.8	4.6
MZN-7-4-08	174	240	0.73	0.0579	0.0019	0.6401	0.0206	0.0803	0.0009	502.4	12.7	498.2	5.3
MZN-7-4-09	335	340	0.99	0.0583	0.0014	0.6465	0.0157	0.0804	0.0009	506.3	9.7	498.4	5.1
MZN-7-4-10	234	328	0.71	0.0582	0.0015	0.6453	0.0169	0.0804	0.0007	505.6	10.4	498.5	4.3
MZN-7-4-11	78	107	0.73	0.0577	0.0031	0.6424	0.0280	0.0800	0.0011	503.8	17.3	496.4	6.4
MZN-7-4-12	128	142	0.90	0.0583	0.0021	0.6403	0.0228	0.0797	0.0008	502.5	14.1	494.3	4.5
MZN-7-4-13	121	203	0.60	0.0564	0.0019	0.6361	0.0206	0.0802	0.0011	499.9	12.8	497.6	6.6
MZN-7-4-14	156	233	0.67	0.0557	0.0015	0.6168	0.0166	0.0805	0.0008	487.8	10.4	498.9	4.8
MZN-7-4-15	191	214	0.89	0.0546	0.0017	0.6053	0.0192	0.0806	0.0008	480.6	12.2	499.8	4.9

测试单位:武汉上谱分析科技有限责任公司

3.2 锆石 FT 年龄结果

本次实验的 Zeta 常数为 $(88.2 \pm 2.9) \text{ a} / \text{cm}^2$, 应用 IUGS 推荐的 Zeta 常数标定法计算出裂变径迹中心年龄,实验结果列于表 3。借助 Green(1986)提供的方法对所测单颗粒年龄是否属于同一年龄组的概率进行评价, $P(\chi^2)$ 值用于评价所测单颗粒属于同一年龄组的概率 (Galbraith, 1981; Galbraith and Laslett, 1993),若 $P(\chi^2) > 5$,则代表样品的同

组年龄;若 $P(\chi^2) < 5$,则表明样品单颗粒年龄不均匀分布,此时应代之以权重平均年龄,即“中心年龄”。所测样品 MZN-7-1、MZN-7-3 和 MZN-7-6 的 $P(\chi^2) < 5$,数据的年龄分布见雷达图解(图 4A),其锆石裂变径迹中心年龄分别为 $17 \pm 1.0 \text{ Ma}$ 、 $11 \pm 1.0 \text{ Ma}$ 和 $16 \pm 1.0 \text{ Ma}$,年龄高程相关性较弱(图 4B),但均小于岩体形成年龄(ca. 497.89Ma)。

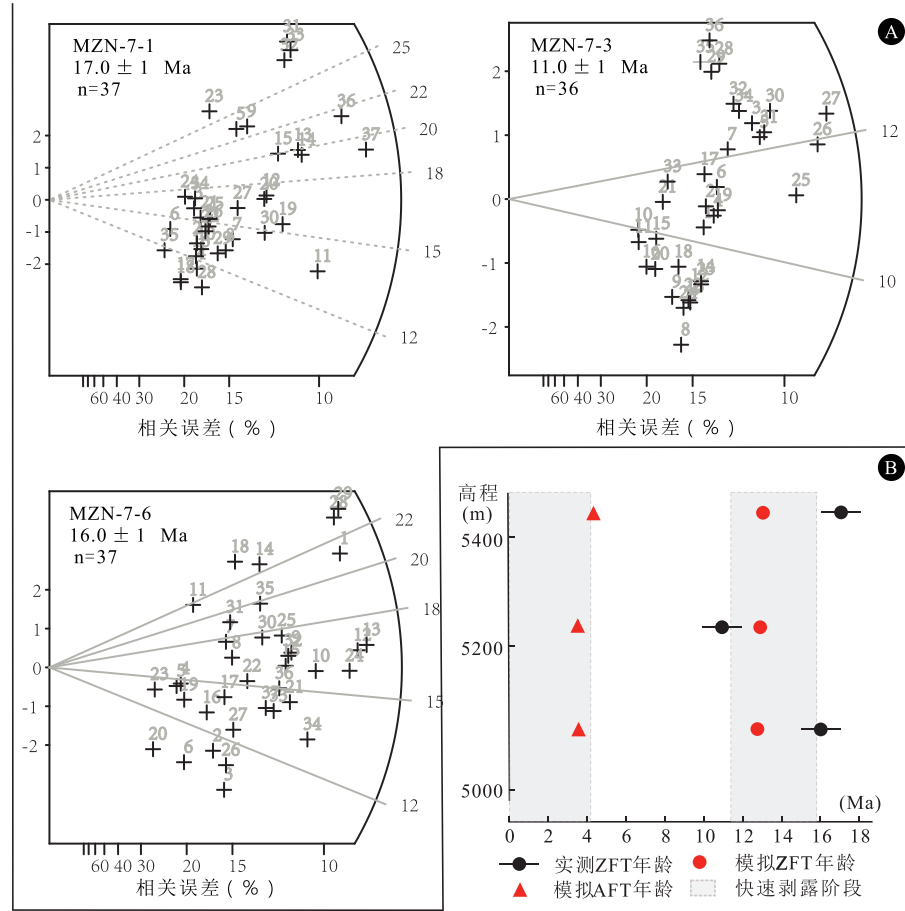


图 4 χ^2 检验值小于 5% 样品锆石裂变径迹年龄分解图 (A) 实测及模拟年龄 - 高程图解 (B)

Fig. 4 Decomposition of zircon fission track age which failed the χ^2 test (A), age-elevation diagram of measured and model age (B)

表 3 康巴穹隆核部花岗片麻岩锆石裂变径迹 (ZFT) 测试结果

Table3 Observed results of ZFT and relevant calculated data for the granitic gneiss in the core of the Kampa dome							
样品号	高程 (m)	颗粒 数量	$\rho_s (10^5/\text{cm}^2)$ (Ns)	$\rho_i (10^5/\text{cm}^2)$ (Ni)	$\rho_d (10^5/\text{cm}^2)$ (N)	$P(\chi^2)$ (%)	中心年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)
MZN-7-1	5450	37	39.168 (3084)	115.255 (9075)	10.881 (6844)	0	16 $\pm$ 1
MZN-7-3	5230	36	29.147 (2550)	115.926 (10142)	10.132 (6844)	0.9	11 $\pm$ 1
MZN-7-6	5050	37	28.229 (2539)	93.624 (8421)	13.021 (6844)	0	17 $\pm$ 1

测试单位:北京安普泰德科技有限公司

3.3 Pecube 模拟结果

上述 10500 个 Pecube 三维模型的最低失配函数 (misft) 为 0.92, 各模拟参数的散点图 (图 5) 也具有较好的趋近趋势。综合模拟结果, 康巴穹隆地区自中新世以来共经历两次快速剥露 (图 4B、图 6), 第一次快速剥露起始于中新世 15.9Ma, 在 11.4Ma 结束, 其平均速率为 1.38mm/yr; 第二次快速剥露起始于上新世 4.2Ma, 平均速率为 0.98mm/yr; 两次快速剥露之间是平均速率为 0.09 mm/yr 的缓慢剥露。

4 讨论

前人对北喜马拉雅片麻岩穹隆带的形成机制进行了大量研究, 提出了不同的形成模式 (Burg et al., 1984; Harrison et al., 1997; Yin et al., 1999; 王根厚等, 1999; 张进江, 2007), 无论何种模式, 穹隆体的隆升剥露过程均与区域构造活动联系紧密, 而区域构造活动所造成的浅地表热扰动会体现在由低温热年代学体系所记录的剥蚀历史中 (李汉敖, 2020)。

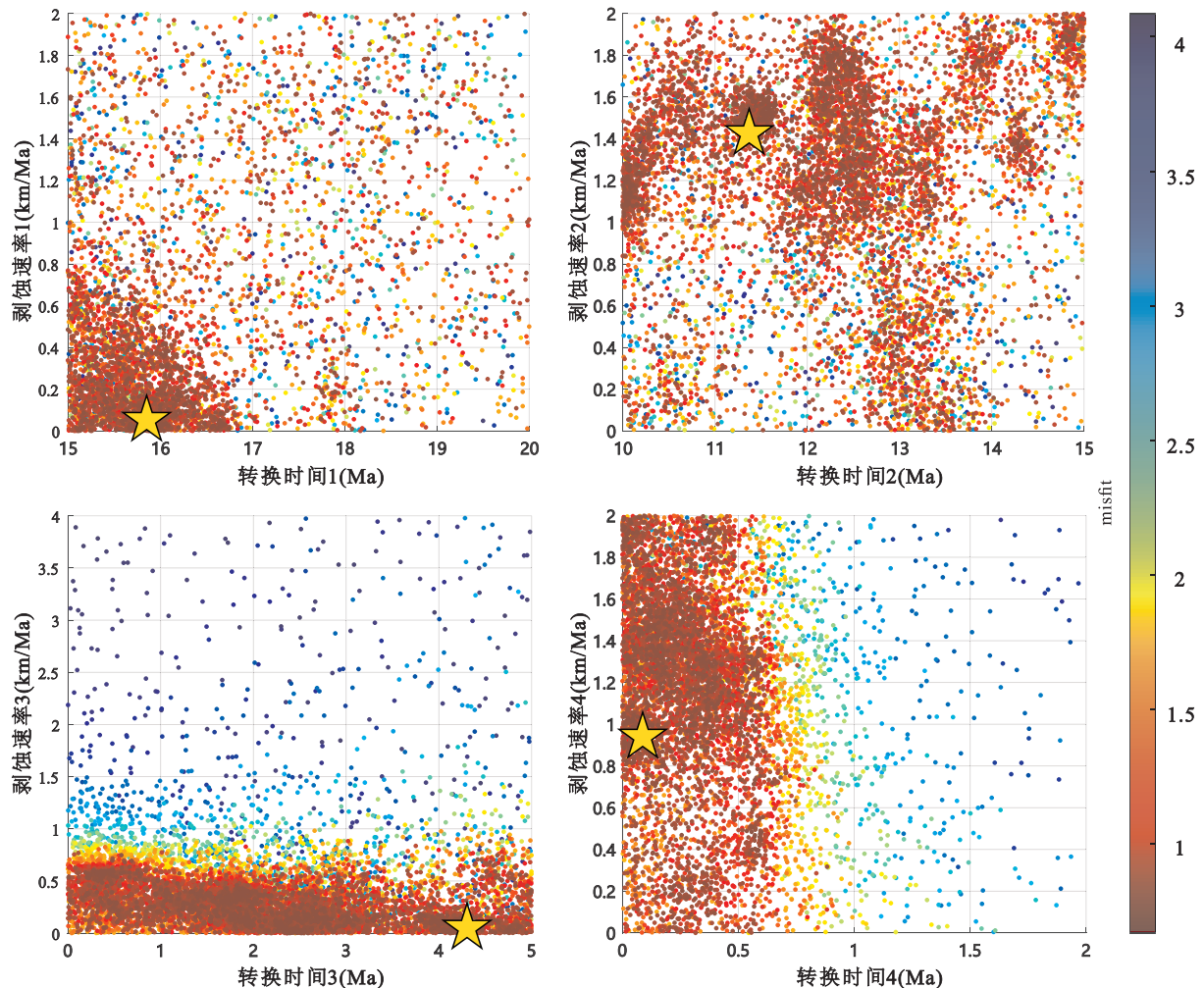


图5 Pecube 模型反演失配函数散点图

Fig. 5 Scatter plots of Pecube inversion misfits

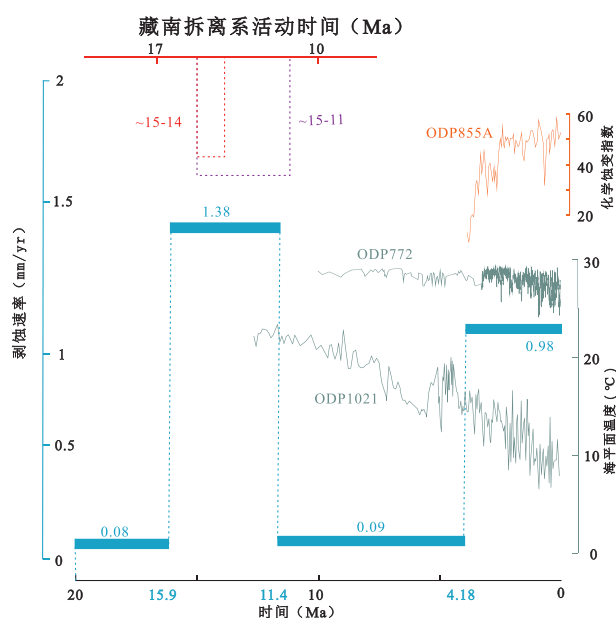
近年来,针对康巴穹隆伸展断裂内同构造淡色花岗岩岩脉的年代学研究(Quigley et al., 2006, 2008; Liu et al., 2016; Lin et al., 2020)表明,康巴穹隆伸展断裂在活动时限上与藏南拆离系(STDS)具有相似性,因而被认为是藏南拆离系(STDS)在北部的延伸出露(王晓先等,2015)。本文通过数值模拟得出康巴穹隆第一次快速剥露的时间为15.9~11.4Ma,在时限上与康巴穹隆南部锡金地区的藏南拆离系 ca. 15~14Ma 的活动时限(Kellett et al., 2013)、亚东地区藏南拆离系 ca. 15~11Ma 的活动时限(刘文灿等,2004;Xu et al., 2013)一致(图6),可以将此次快速剥露解释为是康巴穹隆核部岩体冷却历史对强烈改变浅地表等温线的藏南拆离系活动所产生的响应,ca. 11.4Ma 开始的低速剥露则可能与藏南拆离系活动的停止有关。

康巴穹隆核部岩体第二次快速剥露起始于上

新世,平均速率为0.98mm/yr。在这一时期,与穹隆冷却相关的大规模边界断层活动已停止,此次起始于中新世的冷却应主要受控于气候作用,且青藏高原的气候事件在这一时期已和全球气候事件相吻合(季军良等,2013)。北太平洋 ODP1021 和印度洋 ODP722 钻孔(Herbert et al., 2016)所反映的海平面温度变化(图6)显示,东亚及南亚古气候在上新世发生明显变化,总体上呈随时间波动式变冷,Zhang et al., (2020)通过北太平洋 ODP885A 钻孔岩心沉积物化学蚀变指数(CIA)的变化(图6),揭示出亚洲内陆地区在这次全球快速变冷背景下化学蚀变作用增强的现象。本文的数值模拟结果中,康巴穹隆核部岩体的第二次的快速剥露与这次全球气候变化在时间上相近。

本文针对康巴穹隆的野外地质调查表明,康巴穹隆区内地面径流源于区域降水而非上游来水,这

与喜马拉雅地区众多河流的特征类似(Clift et al., 2008)。区域降水量增加可在直接加深地表受剥蚀程度的同时又通过增加河流的径流量而加强河流下切侵蚀及溯源侵蚀作用(Zheng et al., 2014),造成岩体的阶段性快速冷却。前人对喜马拉雅造山带各地区气候(降水)与快速剥蚀事件的耦合关系进行了大量细致的研究(丁林等, 1995; 于祥江等, 1995; 赵志丹等, 2003; Grujic et al., 2006; Zeilinger et al., 2007; Thiede et al., 2009; Deeken et al., 2011; Patel et al., 2011; Adlakha et al., 2013; Zheng et al., 2014), Zheng et al. (2014)认为以降水量增加为代表的气候作用是造成高喜马拉雅地区上新世以来经历快速剥蚀的原因。本文数值模拟所显示的康巴穹隆核部岩体自上新世发生的速率为0.98mm/yr的快速剥露,在位置、时限及强度上与前述研究具有显著的相关性,可认为此次快速剥露是其对以降水量增加为代表的气候变化过程的响应。



红色部分引自(Kellett et al., 2013)、紫色部分引自(刘文灿等, 2004; Xu et al., 2013),所示年龄为区域内藏南拆离系活动时间;绿色折线部分表示北太平洋、印度洋海平面温度变化;黄色折线部分为北太平洋化学蚀变指数变化

图6 中新世以来康巴穹隆剥蚀速率-时间变化图

Fig. 6 Denudation rate-time variation of the Kampa dome since Miocene

5 结论

针对康巴穹隆核部 U-Pb 年龄为 497.89Ma 的花岗片麻岩的 ZFT 年代学与数值模拟表明:

(1)中新世中期以来,康巴穹隆核部岩体经历两次快速剥露,第一次快速剥露发生在 15.9 ~ 11.4Ma,平均速率为 1.38mm/yr,是对藏南拆离系(STDS)活动的响应。

(2)第二次快速剥露起始于上新世 4.2Ma,平均速率为 0.98mm/yr,是对以降水量增加为代表的气候变化过程的响应。

参考文献 (References):

- Adlakha V, Lang K A, Patel R C, et al., 2013. Rapid long-term erosion in the rain shadow of the Shillong Plateau, Eastern Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 582: 76–83.
- Aoya M, Wallis S R, Kawakami T, et al., 2006. The Malashan gneiss dome in south Tibet: a comparative study with the Kangmar dome with special reference to kinematics of deformation and origin of associated granites [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1): 471–495.
- Adlakha V, Lang K A, Patel R C, et al., 2013. Rapid long-term erosion in the rain shadow of the Shillong Plateau, Eastern Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 582(1): 76–83.
- Bellemans F, De Corte F, Den Haute P V, 1995. Composition of SRM and CN U-doped glasses: Significance for their use as thermal neutron fluence monitors in fission track dating [J]. *Radiation Measurements*, 24(2): 153–160.
- Bermudez M A, Van d B P, Bernet M, 2011. Asynchronous Miocene-Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes [J]. *Geology*, 39(2): 139–142.
- Braun J, Van Der Beek P, Valla P, et al., 2012. Quantifying rates of landscape evolution and tectonic processes by thermochronology and numerical modeling of crustal heat transport using PECUBE [J]. *Tectonophysics*, 524: 1–28.
- Burchfiel B C, Chen Z L, Hodges K V, et al., 1992. The South Tibetan detachment system, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt [J]. *Spec. Pap. Geog. Soc. Amer*, 269: 1–48.
- Burg J P, Brunel M, Gapais D, et al., 1984. Deformation of leucogranites of the crystalline Main Central Sheet in southern Tibet (China) [J]. *Journal of Structural Geology*, 6(5): 535–542.
- Chen Z, Liu Y, Hodges K V, et al., 1990. The Kangmar Dome: a metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet) [J]. *Science*, 250(4987): 1552–1556.
- Clift P D, Hodges K V, Heslop D, et al., 2008. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity [J]. *Nature Geoscience*, 1(12): 875–880.
- Deeken A, Thiede R C, Sobel E R, et al., 2011. Exhumation variability within the Himalaya of northwest India [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 305(1–2): 103–114.
- Edwards M A, Pêcher A, Kidd W S F, et al., 1999. Southern Tibet detachment system at Khula Kangri, eastern Himalaya: A large-

- area, shallow detachment stretching into Bhutan? [J]. *The Journal of Geology*, 107(5): 623–631.
- Eskola P E, 1948. The problem of mantled gneiss domes [J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 104(1–4): 461–476.
- Galbraith R, 1981. On statistical models for fission track counts [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(6): 471–478.
- Galbraith R F, Laslett G, 1993. Statistical models for mixed fission track ages [J]. *Nuclear tracks and radiation measurements*, 21(4): 459–470.
- Ge Y, Liu Z J, Zhang J, et al., 2020. Spatio-temporal variation in rock exhumation linked to large-scale shear zones in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 63(4): 512–532.
- Green, Paul F, 1986. On the thermo-tectonic evolution of Northern England: Evidence from fission track dating [J]. *Geological Magazine*, 123(5): 493–506.
- Grujic D, Coutand I, Bookhagen B, et al., 2006. Climatic forcing of erosion, landscape, and tectonics in the Bhutan Himalayas [J]. *Geology*, 34(10): 801–804.
- Harrison M T, Lovera O M, Grove M, 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts [J]. *Geology*, 25(10): 899.
- Harrison M T, Grove M, McKeegan K D, et al., 1999. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, central Himalaya [J]. *Journal of Petrology*, 40(1): 3–19.
- Herbert T D, Lawrence K T, Tzanova A, et al., 2016. Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystems [J]. *Nature Geoscience*, 9(11): 843–847.
- Hodges K V, 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 324–350.
- Kellett D A, Grujic D, Coutand I, et al., 2013. The South Tibetan detachment system facilitates ultrarapid cooling of granulite-facies rocks in Sikkim Himalaya [J]. *Tectonics*, 32(2): 252–270.
- Khanal G P, Wang J M, Wu F Y, et al., 2020. In-sequence buoyancy extrusion of the Himalayan metamorphic core, central Nepal: Constraints from monazite petrochronology and thermobarometry [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 199: 104406.
- Lee J, Hacker B R, Dinklage W S, et al., 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints [J]. *Tectonics*, 19(5): 872–895.
- Lee J, McClelland W, Wang Y, et al., 2006. Oligocene-Miocene middle crustal flow in southern Tibet: geochronology of Mabja Dome [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 268(1): 445–469.
- Leloup P H, Mahéo G, Arnaud N, et al., 2010. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area: Time constraints on extrusion models of the Himalayas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2): 1–16.
- Li S, Mooney W D, Fan J, 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data [J]. *Tectonophysics*, 420(1–2): 239–252.
- Lin C, Zhang J, Wang X, et al., 2020. Oligocene initiation of the South Tibetan detachment system: Constraints from syn-tectonic leucogranites in the Kampa dome, northern Himalaya [J]. *Lithos*, 354: 105332.
- Liu X C, Wu F Y, Yu L J, et al., 2016. Emplacement age of leucogranite in the Kampa Dome, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 667: 163–175.
- Liu Y, Gao S, Hu Z, 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 [J]. *Journal of petrology*, 51(1–2): 537–571.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
- Liu Z C, Wu F Y, Qiu Z L, et al., 2017. Leucogranite geochronological constraints on the termination of the South Tibetan Detachment in eastern Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 721: 106–122.
- Ludwig K R, 2003. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 70.
- Murphy M A, 2007. Isotopic characteristics of the Gurla Mandhata metamorphic core complex: Implications for the architecture of the Himalayan orogen [J]. *Geology*, 35(11): 983–986.
- Quigley M, Liangjun Y, Xiaohan L, et al., 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of the Kampa Dome, southern Tibet: Implications for tectonic evolution of the North Himalayan gneiss domes [J]. *Tectonophysics*, 421(3–4): 269–297.
- Quigley M C, Liangjun Y, Gregory C, et al., 2008. U-Pb SHRIMP zircon geochronology and T-t-d history of the Kampa Dome, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 446(1–4): 97–113.
- Schärer U, Xu R H, Allègre C J, 1986. U (Th) Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, South Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(1): 35–48.
- Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al., 1997. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement [J]. *The Journal of Geology*, 105(3): 295–318.
- Steck A, Matthieu Girard A M, Robyr M, 1998. Geological transect across the Tso Moriri and Spiti areas: Thenappe structures of the Tethys Himalaya [J]. *Eclogae Geol. Helv.*, 91: 103–121.
- Thiede R C, Bookhagen B, Arrowsmith J R, et al., 2015. Climatic control on rapid exhumation along the Southern Himalayan Front [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(3–4): 791–806.
- Valla P G, Herman F, van der Beek P A, et al., 2010. Inversion of thermochronological age-elevation profiles to extract independent estimates of denudation and relief history—I: Theory and conceptual model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(3–4): 511–522.

- Wagner G, Van den Haute P, 2012. Fission-track dating[M]. Springer Science & Business Media,
- Wang C Y, Lou H, Silver P G, et al., 2010. Crustal structure variation along 30°N in the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3–4): 367–376.
- Wang Y, Xia B, Zhang Y, et al., 2005. U-Pb SHRIMP zircon ages of the Cuoguocongba tourmaline two-mica granite in pulan, southwest Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 517–521.
- Wang Y, Zhang L, Zhang 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.
- Wang Y, Zeng L, Gao L E, et al., 2021. Eocene thickening without extra heat in a collisional orogenic belt: A record from Eocene metamorphism in mafic dike swarms within the Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. *GSA Bulletin*, doi:10.1130/B35679.1
- Wolf R A, Farley K A, Kass D M, 1998. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U-Th)/He thermochronometer [J]. *Chemical Geology*, 148(1–2): 105–114.
- Wu C, Nelson K D, Wortman G, et al., 1998. Yadong cross structure and South Tibetan Detachment in the east central Himalaya (89–90°E)[J]. *Tectonics*, 17(1): 28–45.
- Xu Z, Wang Q, Pecher A, et al., 2013. Orogen - parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene[J]. *Tectonics*, 32(2): 191–215.
- Yin A, Kapp, Paul A, 1999. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet[J]. *Geology*, 27(9): 787–790.
- Yuan W M, Zhang X T, Dong J Q, et al., 2003. A new vision of the intracontinental evolution of the eastern Kunlun Mountains, Northern Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Radiation Measurements*, 36(1–6): 357–362.
- Yuan W, Dong J, Shicheng W, et al., 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(6): 847–856.
- Zeng L S, Liu J, Gao L, et al., 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104–112.
- Zhang J, Santosh M, Wang X, et al., 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 939–960.
- Zhang Q, Liu Q, Roberts A P, et al., 2020. Mechanism for enhanced eolian dust flux recorded in North Pacific Ocean sediments since 4.0 Ma: Aridity or humidity at dust source areas in the Asian interior? [J]. *Geology*, 48(1): 77–81.
- Zheng Y, Zhang J, Wang J, et al., 2014. Rapid denudation of the Himalayan orogen in the Nyalam area, southern Tibet, since the Pliocene and implications for tectonics-climate coupling [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(9): 874–885.
- Zeilinger G, Seward D, Burg J P, 2007. Exhumation across the Indus Suture Zone: a record of back sliding of the hanging wall[J]. *Terra Nova*, 19(6): 425–431.
- Zong K, Klemd R, Yuan Y, et al., 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32–48.
- 丁林, 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. *科学通报*, 40(16): 1497–1500.
- 王根厚, 周详, 曾庆高, 等, 1997. 西藏康马热伸展变质核杂岩构造研究[J]. *成都理工学院学报*, 37(2): 62–67.
- 王晓先, 张进江, 闫淑玉, 等, 2015. 藏南康马拆离断层的构造特征及其活动时代[J]. *大地构造与成矿学*, 39(2): 250–259.
- 董汉文, 许志琴, 孟元库, 等, 2017. 藏南错那洞淡色花岗岩年代学研究及其对藏南拆离系活动时间的限定[J]. *岩石学报*, 33(12): 3741–3752.
- 季军良, 洪炎烈, 肖国桥, 等, 2013. 青藏高原新近纪重大气候事件演化序列[J]. *地质通报*, 32(1): 120–129.
- 李汉敖, 2020. 青藏高原南北向正断层活动时限与伸展速率变化的深部过程及动力学机制探讨[D]. 中国地质大学(北京).
- 刘德民, 李德威, 杨巍然, 等, 2005. 喜马拉雅造山带晚新生代构造隆升的裂变径迹证据[J]. *地球科学*, 30(2): 147–152.
- 李德威, 刘德民, 廖群安, 等, 2003. 南萨迦拉轨岗日变质核杂岩的厘定及其成因[J]. *地质通报*, 22(5): 303–307.
- 刘文灿, 万晓樵, 梁定益, 等, 2004. 江孜县幅、亚东县幅地质调查新成果及主要进展[J]. *地质通报*, 23(5): 7.
- 许志琴, 马绪宣, 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片麻岩穹隆(群)[J]. *岩石学报*, 31(12): 3509–3523.
- 于祥江, 季建清, 龚俊峰, 等, 2011. 雅鲁藏布大峡谷气候因素引起地壳剥蚀冷却的证据[J]. *科学通报*, 56(10): 765–773.
- 张进江, 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. *地质通报*, 26(6): 639–649.
- 张远泽, 2015. 川滇地块东部主要活动断裂新生代精确构造年代格架及其对青藏高原东缘新生代动力学过程的启示[D]. 中国地质大学.
- 张志, 张林奎, 李光明, 等, 2017. 北喜马拉雅错那洞穹隆: 片麻岩穹隆新成员与穹隆控矿新命题[J]. *地球学报*, 38(5): 754–766.
- 赵志丹, 莫宣学, 郭铁鹰, 等, 2003. 西藏南部岩体裂变径迹年龄与高原隆升[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(8): 877–880.
- 曾令森, 梁凤华, 许志琴, 2008. 喜马拉雅造山带变泥质岩系及其地球化学特征[J]. *岩石学报*, 24(7): 1517–1527.
- 周志广, 2008. 藏南哈桑惹—康马隆起带构造变形及演化[D]. 中国地质大学(北京).
- 周祖翼, 2014. 低温年代学: 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社.