

藏南冲巴淡色花岗岩锆石 U-Pb、白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学及其地质意义

王晓先^{1,2}, 张进江², 闫淑玉², 刘江³

(1. 中国地震局地壳应力研究所 地壳动力学重点实验室, 北京 100085; 2. 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; 3. 中国地质科学院 地质研究所 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037)

摘要: 本文采集藏南冲巴淡色花岗岩样品并进行系统的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学分析。锆石 U-Pb 定年结果显示, 冲巴淡色花岗岩年龄为 12.4 ± 0.4 Ma, 处于前人划分的新喜马拉雅阶段与后喜马拉雅阶段分界处。结合淡色花岗岩沿藏南拆离系分布的特征, 可将其归入新喜马拉雅阶段。冲巴淡色花岗岩为同构造侵位花岗岩, 是藏南拆离系活动导致的构造减压熔融的产物, 12.4 ± 0.4 Ma 的锆石 U-Pb 年龄代表了研究区藏南拆离系的活动时代。然而, 这一活动时代明显滞后于喜马拉雅中西部地区, 呈现自西向东启动时代和停止活动时代逐渐变晚的趋势; 白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学分析表明, 冲巴淡色花岗岩冷却年龄分别为 9.11 ± 0.25 Ma 和 9.62 ± 0.10 Ma。锆石 U-Pb 和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学计算表明, 冲巴淡色花岗岩体从 12.4 Ma 到 9.11 Ma 发生了快速冷却剥露, 冷却速率高达 $137 \sim 162$ °C/Ma, 这一结果与前人通过变质 *P-T-t* 研究得到的快速折返的结论相吻合。综合前人研究成果, 认为 12.4~9.11 Ma 的快速冷却事件可能与研究区藏南拆离系的大规模伸展拆离导致的构造剥露有关。

关键词: 喜马拉雅造山带; 藏南拆离系; 冲巴淡色花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0242-13

Zircon U-Pb and muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar chronology of the Chongba leucogranites in south Tibet and its geological implications

WANG Xiao-xian^{1,2}, ZHANG Jin-jiang², YAN Shu-yu² and LIU Jiang³

(1. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Chongba leucogranites, located in the east part of the Greater Himalayan leucogranite belt, are exposed along the South Tibet detachment system (STDS). Their emplacement and cooling ages are significant for evaluating the time span of the magmatism in Himalayan orogeny, constraining the timing of the STDS and revealing the history of the uplift-exhumation-cooling. In this paper, the authors collected leucogranite samples from Chongba area and carried out systematic LA-ICP-MS zircon U-Pb and muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating. The results of zircon U-Pb dating show that the Chongba leucogranites were emplaced at 12.4 ± 0.4 Ma. This age lies on the border between Neo-Himalaya and Post-Himalaya subdivision based on previously published data. However,

收稿日期: 2015-02-06; 接受日期: 2015-08-11

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2014-09); 国家自然科学基金项目(41402175, 41172176)

作者简介: 王晓先(1986-), 男, 汉族, 博士, 助理研究员, 构造地质学专业, 从事青藏高原地质研究, E-mail: xiaoxianwang@pku.edu.cn

er, taking into account the characteristics of the distribution along the STDS, the authors classify it as Neo-Himalaya. The Chongba leucogranites were generated through decompression-dehydration melting of the metapelite in Greater Himalayan Crystalline complex (GHC) triggered by the STDS activity. Thus, the emplacement age of 12.4 ± 0.4 Ma represents the activating timing of the STDS and apparently postdates the timing in the middle and west part of the Himalayan orogeny, which shows a regularity of getting later from west to east. Muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar cooling ages of the Chongba leucogranites are 9.11 ± 0.25 Ma and 9.62 ± 0.10 Ma, respectively. Combined with the ages and the close temperatures of zircon and muscovite, the authors hold that the rapid cooling exhumation might have occurred between 12.4 Ma to 9.11 Ma, whose cooling rate was up to 137 °C/Ma to 162 °C/Ma. These calculated results are in accord with previous conclusion obtained by metamorphic *P-T-t* of the granulite from GHC in Chongba area. It is considered that the rapid cooling event during 12.4 ~ 9.11 Ma was probably associated with the structural exhumation caused by the extension and detachment of the STDS in the study area.

Key words: Himalayan orogen; South Tibet detachment system; Chongba leucogranites; zircon U-Pb dating; muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating

Fund support: Research Grant from Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration(ZDJ2014-09); National Natural Science Foundation of China (41402175, 41172176)

始于 65 ~ 55 Ma(Beck *et al.*, 1995; Rage *et al.*, 1995; Rowly, 1996)的印度-欧亚大陆的碰撞-汇聚作用,造就了全球海拔最高的高原和最年轻、最典型的碰撞型造山带——青藏高原和喜马拉雅造山带。自新生代以来,喜马拉雅造山带在其南北两侧分别经历了以逆冲和伸展为主的变形作用(王晓先等, 2012; Zhang *et al.*, 2012),形成了南喜马拉雅逆冲推覆体系,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);而在北喜马拉雅却发育了多种形式的伸展构造,如南北向裂谷(NSTR)、北喜马拉雅片麻岩穹窿(NHGD)和藏南拆离系(STDS)等。在碰撞的中晚期(晚始新世-中新世),伴随着大规模的地壳深熔作用,形成了两条绵延数千公里的巨型花岗岩带:一条位于特提斯喜马拉雅中部的 NHGD 内,该带内除康马穹窿(Wang *et al.*, 2012; 王晓先等, 2015)和哈金桑惹穹窿(Quigley *et al.*, 2008)核部出露早古生代花岗岩外,大部分穹窿核部均发育晚始新世-中新世的二云母花岗岩/淡色花岗岩(张宏飞等, 2004; Aoya *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006; Zeng *et al.*, 2009; Larson *et al.*, 2010; Leloup *et al.*, 2010; Mitsuishi *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2012; Lederer *et al.*, 2013; Gao and Zeng, 2014; Liu *et al.*, 2014),称为 NHGD 花岗岩带;另外一条位于大喜马拉雅结晶杂岩(GHC)的顶部,以淡色花岗岩为主,主要呈不连续的点/带状沿 STDS 分布,称为 GHC 花岗岩带(Yin

and Harrison, 2000)。这些花岗岩是研究喜马拉雅造山带构造-岩浆演化历史的重要“岩石探针”,成为国内外学者关注的焦点。

受自然条件所限,在交通上较易到达的 GHC 淡色花岗岩带研究较多。GHC 淡色花岗岩主要沿喜马拉雅山脉的脊部分布,东西延伸 2 000 多公里,由一系列不连续的淡色花岗岩侵入体组成。早期对 GHC 淡色花岗岩的 U-Pb 年代学测定表明,其年龄主要为中新世(26 ~ 13 Ma)(Edwards and Harrison, 1997; Coleman, 1998; Harrison *et al.*, 1999; Murphy and Harrison, 1999; Schneider *et al.*, 1999; Simpson *et al.*, 2000; Searle and Godin, 2003; Annen *et al.*, 2006; Cottle *et al.*, 2007; Kellett and Godin, 2009; Yang *et al.*, 2009; Leloup *et al.*, 2010; Sachan *et al.*, 2010; Chamber *et al.*, 2011; Kellett *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2012)。然而,随着近几年大量高质量的年代学数据的相继发表,发现淡色花岗岩年龄显然不局限于中新世:如在大喜马拉雅西部的吉隆地区, Yang 等(2009)报道了同构造淡色花岗岩年龄为 36 Ma;中部的定结地区未变形淡色花岗岩脉年龄为 11 ~ 10 Ma(Kali *et al.*, 2010);东部的库拉岗日淡色花岗岩侵位时代为 12 Ma(Edwards and Harrison, 1997; Wu *et al.*, 1998)。这些年龄不断的改写 GHC 淡色花岗岩的形成时代跨度,而且随着越来越多新的年代学数据的发表,年龄跨度必将继续加大。因此,喜马拉雅淡色

花岗岩的形成时代需要被重新评估。

GHC 淡色花岗岩的年代学研究主要用于解决以下两方面的问题: ① 限定 STDS 的活动时代。一般认为 GHC 淡色花岗岩是 STDS 活动导致 GHC 变泥质岩发生构造减压熔融的产物, 因此, 可以用同构造侵位花岗岩的年龄来限定 STDS 的活动时代。前人的研究表明, STDS 是一条具有较长活动历史的拆离断层, 其最早的活动时代可追溯到晚始新世(约 36 Ma, Yang *et al.*, 2009), 最晚的活动时代为中中新世(11 Ma, Kellett *et al.*, 2009), 主要的活动时间集中于 26~13 Ma (Hodges, 2000; Annen *et al.*, 2006; Godin *et al.*, 2006; Cottle *et al.*, 2007; Kellett *et al.*, 2010; Leloup *et al.*, 2010; Sachan *et al.*, 2010; Chambers *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012); ② 揭示区域的隆升剥露历史, 主要通过与其它的年代学分析方法(如 U-Pb、Ar-Ar 和 AFT)相结合来实现。目前, 对 GHC 淡色花岗岩进行的不同类型年代学的研究绝大部分集中在中西部地区, 东部地区鲜见报道(亚东以东地区), 这制约了我们从整体上认

识喜马拉雅淡色花岗岩的形成时代、STDS 的活动时间和规律以及区域的隆升剥露历史。本文在野外调查的基础上, 报道了喜马拉雅造山带东部冲巴淡色花岗岩的锆石 U-Pb 和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄, 以期丰富喜马拉雅淡色花岗岩年代学、探索 STDS 的活动时代和规律以及研究区的隆升剥露历史提供新的资料。

1 地质背景与样品描述

狭义的喜马拉雅造山带指雅鲁藏布江缝合带与 MFT 之间的、由新生代印度-欧亚大陆碰撞形成的强烈变形、变质带。该造山带自北向南发育的岩石构造单元依次为特提斯喜马拉雅沉积系(THS)、STDS、GHC、MCT、小喜马拉雅沉积岩系(LHS)、MBT、西瓦里克前陆盆地沉积(SS)和 MFT。其中, THS 以低角度的 STDS 为界上覆于 GHC 之上, 而 GHC 沿 MCT 逆冲于 LHS 之上, 后者又沿 MBT 逆冲于 SS 之上(图 1)。THS 位于最北部, 其南北分别

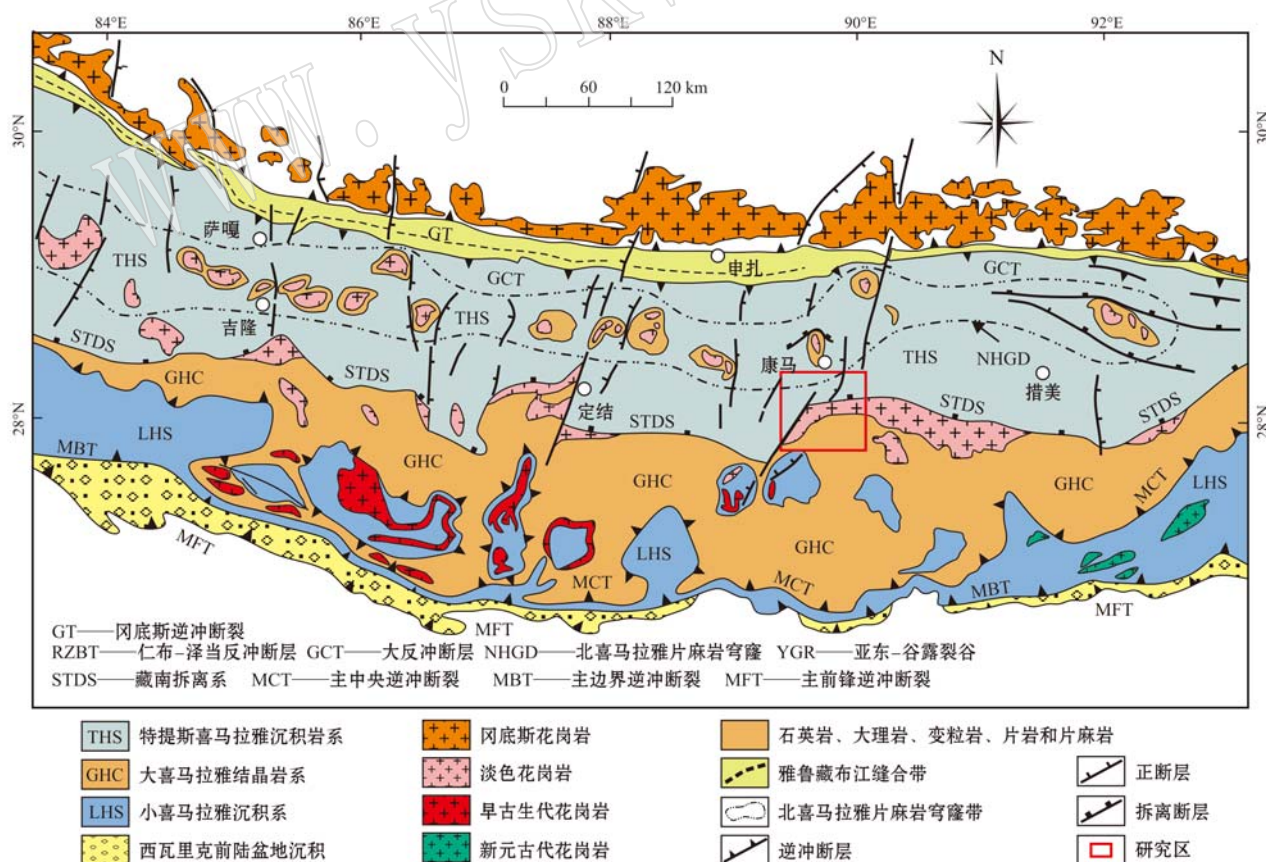


图 1 喜马拉雅造山带中东段地质简图(据 Zhang *et al.*, 2012 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of the middle and east Himalayan orogen(modified after Zhang *et al.*, 2012)

以 STDS 和雅鲁藏布江缝合带为界, 主要发育古生代到始新世的、经历极低级变质的硅质碎屑岩和碳酸岩沉积, 其中夹杂中生代火山岩 (Brookfield, 1993), 在其中部自西向东分布一系列片麻岩穹窿——NHGD, 是北喜马拉雅伸展构造的重要组成部分 (张进江, 2007); GHC 位于 MCT 和 STDS 之间, 由原岩时代为古元古代-奥陶纪的中高级变质结晶杂岩系组成 (Aikman *et al.*, 2008), 其上部靠近 STDS 处出露大量的淡色花岗岩, 形成 GHC 淡色花岗岩带; LHS 位于 MBT 和 MCT 之间, 主要由碎屑沉积岩和低级变质岩组成 (Brookfield, 1993); 最南部的 SS 位于 MBT 和 MFT 之间, 为一套古近系-中新世的海相和陆相地层沉积。

本文的研究区位于喜马拉雅造山带东部的冲巴地区 (图 2), 研究区以 STDS 为界, 北部为 THS, 由奥陶纪-白垩纪的沉积岩组成, 主要岩性包括石英大理

岩、板岩、千枚岩, 以及未变质的灰岩、粉砂岩和泥页岩等; 南部为 GHC 中高级变质的亚东岩群, 主要由含夕线石榴黑云斜长片麻岩、混合岩、眼球状片麻岩、黑云斜长变粒岩和石英岩组成, 局部夹麻粒岩相基性岩和超基性岩。GHC 最上部为淡色花岗岩体 (图 2), 其沿 STDS 呈东西向展布, 岩石总体呈灰白色 (图 3a), 显微镜下观察主要矿物组成为石英 (25% ~ 30%)、斜长石 (25% ~ 30%)、钾长石 (15% ~ 20%)、白云母 (15%)、黑云母 (5%) (图 3b), 本文用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学分析的样品即采集于此。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

从样品 TYC-40 中挑选出锆石单矿物, 对其进

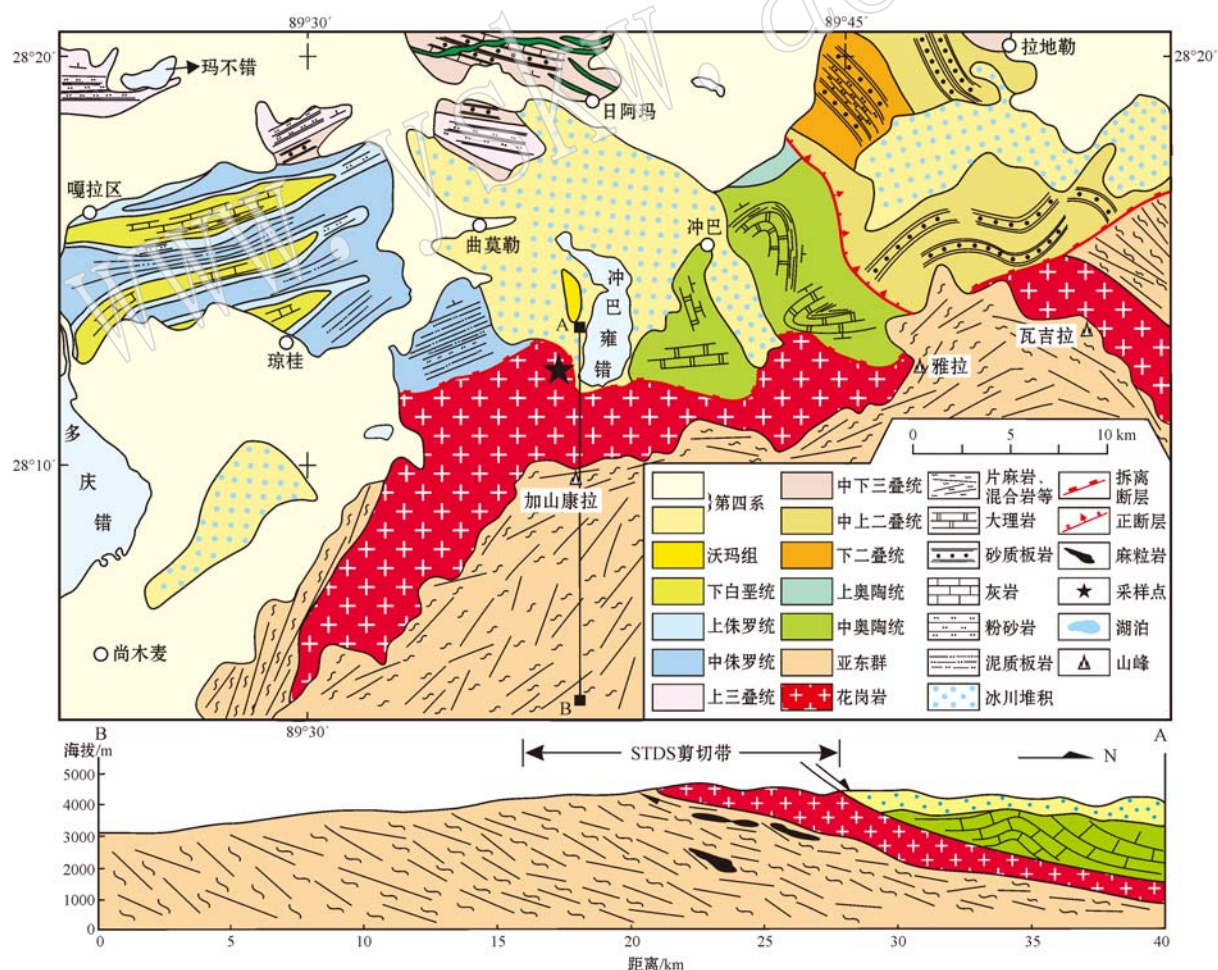


图 2 藏南冲巴地区地质简图

Fig. 2 Sketch geological map of the Chongba area, southern Tibet

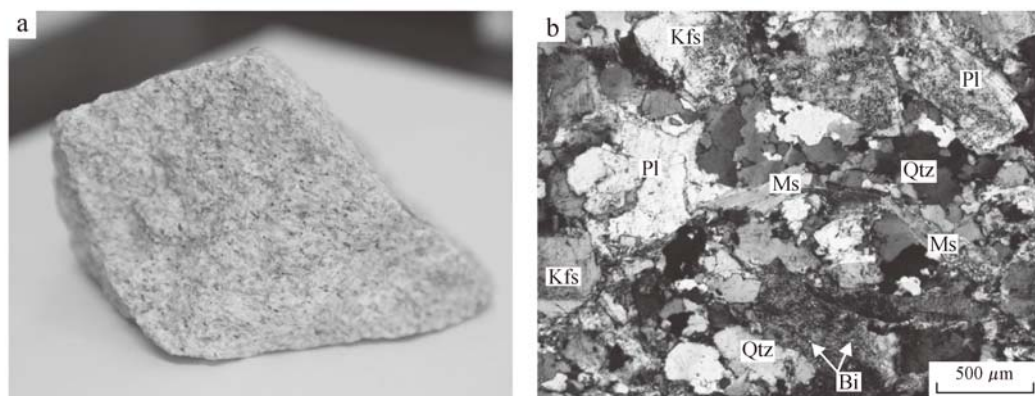


图 3 冲巴淡色花岗岩手标本(a)和正交偏光显微照片(b)

Fig. 3 Macro-photograph (a) and micro-photograph (b, crossed nicols) of the Chongba leucogranite

Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Ms—白云母; Bi—黑云母

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Ms—muscovite; Bi—biotite

行 LA-ICP-MS U-Pb 定年。锆石用常规方法分析,并在双目镜下挑纯。将锆石置于环氧树脂中,然后磨至约一半暴露出锆石内部,用于阴极发光研究及随后的 LA-ICP-MS U-Pb 分析。锆石阴极荧光照相 (CL 图像)在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的扫描电镜室完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 LA-ICP-MS 实验室进行。所用仪器为电感耦合等离子体质谱仪 (Aglient 7500c),并结合 COMPEXpro102 准分子激光器,激光剥蚀斑直径为 $32\ \mu\text{m}$,激光能量密度为 $10\ \text{J}/\text{cm}^2$,剥蚀频率为 $5\ \text{Hz}$ 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,Ar 为辅助气。锆石年龄计算采用标准锆石 Plesovice ($337\ \text{Ma}$)作为外标 (Sláma *et al.*, 2008),标准锆石 91500 为监控盲样 (Wiedenbeck *et al.*, 1995)。元素含量采用国际标样 NIST610 作为外标, ^{29}Si 为内标元素进行校正。测试过程中采用单点剥蚀,每完成 5 个测点的样品测定,加测标样一次,在 15 个锆石样品点前后各测 2 次 NIST610。标样的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER4.4.2 程序,普通铅校正使用 Anderson (2002) 给出的程序计算,加权平均年龄及谐和图的绘制使用 Isoplot/Ex (3.0) (Ludwig, 2003) 完成。

2.2 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年

白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。首先将挑选出的云母用纯铝锡箔纸包装成球形,置于中国原子能科学研究院 49-2 反应堆 B4 孔道进行中子照射,快中子

通量为 $2.2359 \times 10^{18}\ \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,照射时间为 $24\ \text{h}$ 。用于测试快中子通量的监测标样采用 ZBH-25 ($132.7\ \text{Ma}$)、Bem 4 M ($18.6\ \text{Ma}$) 和 FCs ($28.2\ \text{Ma}$)。同时对纯物质 CaF_2 和 K_2SO_4 进行照射,得出校正因子分别为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 271$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 652$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.007\ 03$ 。照射后的样品冷却后密封去气装入系统。测定时对样品进行阶步升温加热,每个样品分 8~11 步加热释气,温度范围为 $850 \sim 1\ 400^\circ\text{C}$,每个加热点在恒温状态下保持 $20\ \text{min}$ 。系统分别采用活性炭冷井及锆钛钕吸气剂对气体进行纯化,纯化时间分别为 $10\ \text{min}$ 和 $15\ \text{min}$,使用 RGA10 型质谱仪记录 5 组 Ar 同位素信号,信号强度以毫伏 (mV) 为单位记录。质谱峰循环测定 9 次,用峰顶值减去前后基线的平均值来获得 Ar 同位素的数据。数据处理时,采用本实验室编写的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating 1.2 数据处理程序对每组 Ar 同位素测试数据进行校正计算,再采用 Isoplot/Ex (3.0) 计算坪年龄及等时线年龄 (Ludwig, 2003)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

冲巴淡色花岗岩样品 TYC-40 中锆石阴极发光图像显示,多数锆石呈长柱状或短柱状,自形-半自形,棱角较为清晰,锆石晶粒长度在 $150 \sim 200\ \mu\text{m}$,长宽比介于 $1.5:1 \sim 3:1$ 之间 (图 4)。锆石内部结构差异较大,部分锆石发育完整的核-幔-边结构,核部和幔部色调较亮,一般具有似泡沫状或熔蚀的港

湾状结构,为后期熔体或热液改造所致;边部锆石色调较暗,发育明显的韵律生长环带,表明为岩浆成

因;另有部分锆石色调较为均一(如 04.1 和 20.1,图 4),且发育明显的震荡环带,为古老的残留锆石。

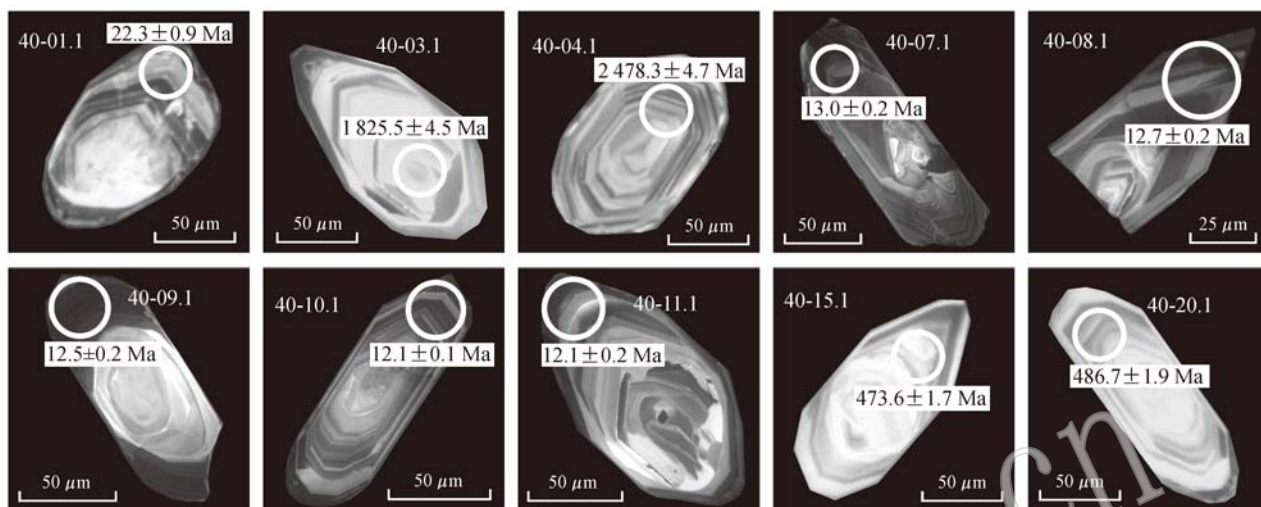


图 4 冲巴淡色花岗岩中代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 4 CL images of the representative zircons from Chongba leucogranite

对样品 TYC-40 总共选取 21 个点进行同位素比值测定,其中 9 个分析点(02.1,03.1,04.1,05.1,14.1,15.1,19.1,20.1,21.1)位于锆石的核部,另外 12 个分析点(01.1,06.1,07.1,08.1,09.1,10.1,11.1,12.1,13.1,16.1,17.1,18.1)位于锆石的边部,分析结果列于表 1。核部 9 个分析点的 U 和 Th 含量分别在 $455.8 \times 10^{-6} \sim 5\,018.7 \times 10^{-6}$ 和 $90.6 \times 10^{-6} \sim 1\,280.0 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 比值变化范围较大,介于 0.07~0.88 之间,绝大多数高于 0.10, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄范围为 2 478.3~399.3 Ma,其年龄分布与喜马拉雅中碎屑锆石年龄谱图具有可对比性,为来自古老源岩的继承锆石;锆石边部 12 个分析点的 U 和 Th 含量分别为 $4\,691.2 \times 10^{-6} \sim 55\,503.3 \times 10^{-6}$ 和 $17.4 \times 10^{-6} \sim 8\,117.0 \times 10^{-6}$, Th/U 比值较低,介于 0.02~0.15 之间,大部分低于 0.10,且发育韵律生长环带,属于典型深熔成因的锆石(Wu and Zheng, 2004),12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄范围为 31.4~12.1 Ma,其中 7 个分析点落在谐和线上且年龄较集中(图 5),加权平均年龄为 12.4 ± 0.4 Ma(MSWD=1.0)(图 5b),代表了冲巴淡色花岗岩的最终结晶年龄。

3.2 白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果

本次研究共选取 2 件样品(TYC-34 和 TYC-40)进行白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,分析结果列于表 2。样品 TYC-34 中白云母在 850~1 400℃ 之间的 9 个加

热阶段析出³⁹Ar_K 累计为 57.5%,给出一个稳定的坪年龄为 9.11 ± 0.25 Ma(MSWD=0.99)(图 6),白云母的初始⁴⁰Ar/³⁶Ar=305±22 Ma,略高于尼尔值 295.5 Ma,表明存在 Ar 过剩,指示白云母形成年龄不早于 9.11 ± 0.25 Ma,在用⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating1.2 进行数据处理时已经对每组 Ar 同位素进行了校正,在采用 Isoplot/Ex(3.0)计算坪年龄时少量过剩 Ar 对真实年龄基本没有影响,因此样品年龄是可靠的。样品 TYC-40 中白云母在 850~1 400℃ 之间的 9 个加热阶段析出³⁹Ar_K 累计为 84.4%,给出一个稳定的坪年龄为 9.62 ± 0.10 Ma(MSWD=0.27)(图 6),白云母的初始⁴⁰Ar/³⁶Ar=289.5±6.1 Ma,略低于尼尔值 295.5 Ma,表明存在 Ar 丢失,但程度很轻,因此认为此年龄也是可靠的。

4 讨论

4.1 喜马拉雅淡色花岗岩的时代

喜马拉雅淡色花岗岩的形成时代问题一直是国际地学界研究的热点,早期对淡色花岗岩的 U-Pb 年代学研究发现,南部 GHC 淡色花岗岩的年龄早于北部 NHGD 二云母花岗岩/淡色花岗岩。虽然目前获得的淡色花岗岩年代学资料并不支持 GHC 淡色花岗岩早于 NHGD 二云母花岗岩/淡色花岗岩这一结论(Harrison *et al.*, 1997),但仍呈现一些规律,如大

表 1 冲巴淡色花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析数据
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analytical data of the Chongba leucogranite

分析点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				表观年龄/Ma						
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ $\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma$						
40-01.1	510.9	10 692.7	0.05	0.008 02	0.033 38	0.003 57	0.003 47	0.000 15	0.016 57	0.002 85	33.3	3.5	22.3	0.9
40-02.1	246.2	869.3	0.28	0.000 78	4.822 70	0.031 59	0.308 96	0.001 26	0.092 29	0.001 07	1 788.9	5.5	1 735.6	6.2
40-03.1	90.6	1 074.4	0.08	0.000 65	5.036 91	0.026 53	0.309 13	0.001 04	0.087 60	0.001 57	1 825.5	4.5	1 736.4	5.1
40-04.1	399.1	455.8	0.88	0.000 85	10.482 26	0.053 57	0.403 78	0.001 80	0.127 48	0.000 73	2 478.3	4.7	2 456.2	7.9
40-05.1	544.9	958.9	0.57	0.000 56	8.599 91	0.029 26	0.390 14	0.000 98	0.125 32	0.000 59	2 296.5	3.1	2 123.5	4.5
40-06.1	17.4	5 893.9	0.00	0.063 09	0.021 67	0.000 69	0.002 49	0.000 03	0.023 75	0.001 87	21.8	0.7	16.0	0.2
40-07.1	293.8	6 727.0	0.04	0.047 12	0.013 08	0.000 76	0.002 01	0.000 03	0.001 24	0.000 12	13.2	0.8	13.0	0.2
40-08.1	162.0	4 691.2	0.03	0.046 53	0.012 64	0.001 18	0.001 97	0.000 04	0.002 37	0.000 28	12.8	1.2	12.7	0.2
40-09.1	378.2	7 549.8	0.05	0.046 52	0.012 40	0.000 64	0.001 93	0.000 03	0.000 88	0.000 12	12.5	0.6	12.5	0.2
40-10.1	407.5	15 989.2	0.03	0.045 77	0.011 82	0.000 32	0.001 87	0.000 02	0.000 74	0.000 08	11.9	0.3	12.1	0.1
40-11.1	318.9	16 100.9	0.02	0.046 11	0.011 93	0.000 74	0.001 88	0.000 04	0.001 34	0.000 28	12.0	0.8	12.1	0.2
40-12.1	454.2	7 453.7	0.06	0.047 44	0.012 86	0.000 42	0.001 97	0.000 02	0.000 83	0.000 06	13.0	0.4	12.7	0.2
40-13.1	713.7	10 773.7	0.07	0.059 87	0.040 26	0.001 10	0.004 88	0.000 06	0.008 63	0.000 26	40.1	1.1	31.4	0.4
40-14.1	155.6	1 540.6	0.10	0.054 74	0.482 17	0.010 90	0.063 90	0.000 52	0.023 37	0.000 89	399.6	7.5	399.3	3.1
40-15.1	443.7	1 994.8	0.22	0.056 17	0.590 25	0.005 65	0.076 23	0.000 29	0.023 39	0.000 31	471.0	3.6	473.6	1.7
40-16.1	468.8	23 142.7	0.02	0.069 25	0.017 92	0.000 71	0.001 88	0.000 03	0.004 93	0.000 34	18.0	0.7	12.1	0.2
40-17.1	596.9	11 454.7	0.05	0.046 98	0.012 18	0.000 96	0.001 88	0.000 04	0.000 79	0.000 15	12.3	1.0	12.1	0.2
40-18.1	8 117.0	55 503.3	0.15	0.317 34	0.098 10	0.001 22	0.002 24	0.000 02	0.030 33	0.000 41	95.0	1.1	14.4	0.2
40-19.1	310.8	4 324.8	0.07	0.072 59	1.568 45	0.022 34	0.156 73	0.001 00	0.047 81	0.000 72	957.8	8.8	938.6	5.6
40-20.1	548.5	1 566.5	0.35	0.057 01	0.616 25	0.006 33	0.078 42	0.000 32	0.023 63	0.000 23	487.5	4.0	486.7	1.9
40-21.1	1 280.0	5 018.7	0.26	0.102 02	3.038 61	0.007 02	0.216 06	0.000 28	0.070 40	0.000 25	1 417.4	1.8	1 261.0	1.5

表 2 冲巴淡色花岗岩白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年分析数据
Table 2 Muscovite ⁴⁰Ar-³⁹Ar analytical data of the Chongba leucogranites

t/℃	Age/Ma	± Age/Ma	⁴⁰ Ar* / %	³⁹ Ar/mol	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	± ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	± ³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	± ³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	± ³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar	± ⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar
TYC-34; 白云母; J = 0.005 408														
850	4.36	0.08	21.71	38.80	2.059 09	0.000 88	0.026 43	0.000 77	0.311 12	0.000 53	0.005 52	0.000 03	0.447 05	0.008 07
900	9.14	0.78	58.55	16.60	1.604 40	0.006 30	0.016 88	0.000 12	0.139 21	0.000 04	0.002 26	0.000 27	0.939 48	0.080 39
950	8.98	0.53	50.70	6.86	1.819 71	0.000 97	0.012 24	0.001 50	0.180 81	0.000 36	0.003 06	0.000 18	0.922 71	0.054 37
1 000	9.11	0.91	47.90	6.46	1.954 28	0.000 29	0.013 53	0.000 22	0.189 23	0.000 24	0.003 47	0.000 32	0.936 25	0.093 63
1 050	9.27	0.45	47.34	4.80	2.011 23	0.000 12	0.011 57	0.003 41	0.267 40	0.000 45	0.003 63	0.000 16	0.952 29	0.046 83
1 100	9.15	0.88	48.93	6.79	1.920 57	0.005 59	0.014 26	0.000 98	0.139 54	0.000 11	0.003 33	0.000 31	0.939 75	0.090 74
1 200	9.00	0.77	58.12	8.15	1.591 62	0.004 98	0.013 44	0.000 63	0.139 97	0.000 16	0.002 27	0.000 27	0.925 05	0.079 25
1 300	8.99	0.67	59.50	3.75	1.551 39	0.006 16	0.017 56	0.000 54	0.315 23	0.000 85	0.002 19	0.000 23	0.923 31	0.068 98
1 400	1.48	1.11	3.87	0.62	3.925 27	0.034 53	0.070 73	0.001 73	2.200 15	0.052 08	0.013 34	0.000 37	0.152 04	0.113 40
TYC-40; 白云母; J = 0.005 421														
850	15.10	3.85	15.07	0.72	10.277 46	0.064 62	0.152 68	0.012 86	1.754 69	0.012 14	0.029 99	0.001 33	1.550 45	0.397 45
900	9.60	4.69	7.60	0.50	12.919 50	0.281 68	0.000 94	0.015 73	2.809 48	0.054 21	0.041 13	0.001 32	0.983 91	0.482 22
950	4.34	1.39	5.72	0.84	7.751 14	0.141 86	0.018 79	0.001 16	1.217 85	0.022 90	0.025 04	0.000 02	0.443 92	0.142 06
1 000	9.02	0.16	18.36	2.46	5.036 30	0.007 60	0.018 57	0.004 14	0.544 54	0.001 11	0.014 04	0.000 05	0.924 77	0.016 47
1 050	4.66	0.54	8.49	2.70	5.612 98	0.035 18	0.016 34	0.000 35	0.447 90	0.003 43	0.017 48	0.000 14	0.476 74	0.055 07
1 100	2.66	0.11	4.00	6.61	6.802 94	0.009 06	0.016 43	0.000 06	0.184 28	0.000 44	0.022 13	0.000 02	0.272 28	0.011 20
1 200	9.59	0.13	49.10	32.40	2.002 63	0.000 79	0.012 75	0.000 00	0.034 10	0.000 01	0.003 43	0.000 05	0.983 36	0.013 33
1 300	9.66	0.13	57.42	31.00	1.724 40	0.000 41	0.012 81	0.000 31	0.037 40	0.000 06	0.002 47	0.000 05	0.990 21	0.013 76
1 400	9.58	0.47	43.77	11.40	2.245 19	0.000 05	0.012 35	0.001 08	0.074 47	0.000 38	0.004 27	0.000 16	0.982 68	0.047 83

注: ⁴⁰Ar* 为放射性⁴⁰Ar。

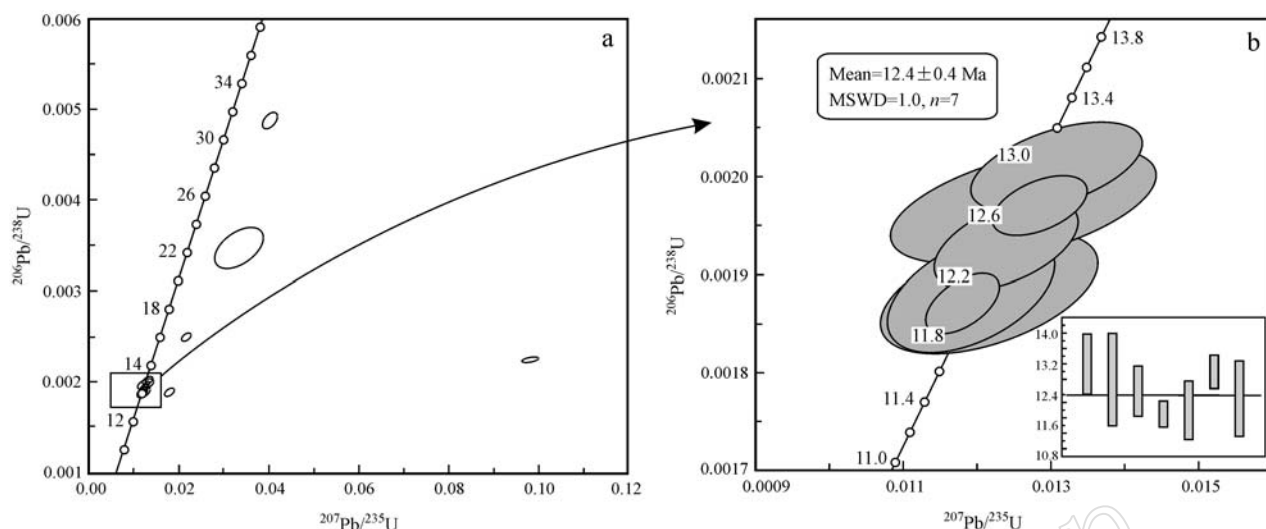
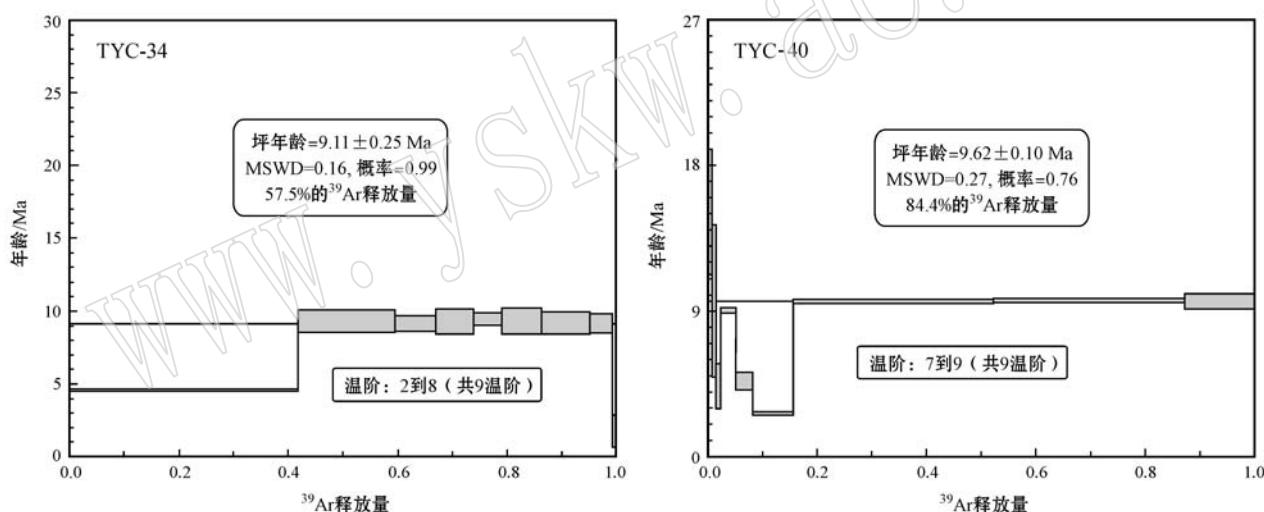


图 5 冲巴淡色花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram of the Chongba leucogranite

图 6 冲巴淡色花岗岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄图Fig. 6 Muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau age diagram of the Chongba leucogranites

喜马拉雅西部的淡色花岗岩年龄明显早于东部。而近期吴福元等(2015)在大量年代学数据的基础上,借鉴前人的划分方案(Hodges, 2000),重新勾画了喜马拉雅花岗岩的年代学格架,将其大致划分为始喜马拉雅阶段(Eo-Himalayan; 44~26 Ma)、新喜马拉雅阶段(Neo-Himalayan; 26~13 Ma)和后喜马拉雅阶段(Post-Himalayan; 13~7 Ma)。其中始喜马拉雅花岗岩在出露位置、岩石矿物组成、地球化学成分以及形成的构造背景上与后二者截然不同;而新喜马拉雅与后喜马拉雅淡色花岗岩在物质组成和化学成分上可以对比,其主要区别在于前者主要沿东西向

的 STDS 分布,而后者更多的沿南北向的 NSTR 分布。冲巴淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄介于 12.7~12.1 Ma 之间,加权平均年龄为 12.4 ± 0.4 Ma,在吴福元等(2015)的划分方案中位于新-后喜马拉雅阶段的分界处,严格来讲,应该属于后喜马拉雅阶段,但从冲巴淡色花岗岩的分布位置来看,其主要沿 STDS 分布,因此笔者更倾向于将其归入新喜马拉雅阶段。

4.2 STDS 活动时代

喜马拉雅淡色花岗岩多沿区域内伸展构造(如 STDS 和 NSTR)分布,在大喜马拉雅地区,淡色花岗

岩的分布位置和形态受控于 STDS, 前人通过其成因机制的研究, 认为 GHC 淡色花岗岩是 STDS 启动之后, 在地壳伸展、深部物质折返的背景下源岩发生构造减压熔融形成的 (Harris and Massey, 1994; Davidson *et al.*, 1997), 并沿 STDS 提供的通道上侵就位, 因此, GHC 淡色花岗岩的形成与 STDS 活动密切相关, 可以用来限定 STDS 的活动时代 (Guillot *et al.*, 1994)。近年来, 有关 STDS 活动时代的报道多来自于喜马拉雅中西部地区, 如西部的 Zaskar 地区 STDS 活动时代为 23~20 Ma (Walker *et al.*, 1999), Sutlej 地区为 23~17 Ma (Vannay *et al.*, 2004), Silving 地区为 23~21 Ma (Searle *et al.*, 1999); 而中部的玛纳斯鲁地区为 19~16 Ma (Searle *et al.*, 1997)、珠峰地区为 21~17 Ma (Murphy and Harrison, 1999; Viskupic *et al.*, 2005)、Thakkola 地区为 17~14 Ma (Coleman and Hodges, 1995)、定结地区为 19~13 Ma (Zhang *et al.*, 2007)、亚东地区为 17~13 Ma (蒙梦平等, 2014); 而东部的广大地区鲜见有关 STDS 活动时代的报道, 仅有东不丹地区报道过 15.5~11 Ma 的年龄 (Kellett *et al.*, 2009)。本次研究的冲巴淡色花岗岩沿东西向的 STDS 呈条带状分布; 手标本上白云母和电气石等矿物显示微弱的定向排列 (图 3a), 显微镜下观察白云母绕钾长石眼球的边部定向排列形成微弱的面理, 但主要矿物 (如石英和长石等) 并未发生塑性变形 (图 3b), 说明淡色花岗岩中显示的微弱面理为侵位流动面理, 花岗岩冷凝后期和侵位后未遭受强烈变形, 因此, 该淡色花岗岩应为同构造侵位花岗岩。同构造淡色花岗岩 U-Pb 定年结果显示, 其年龄为 12.4 ± 0.4 Ma, 该年龄代表了研究区 STDS 的活动时代, 这一结论与前人在邻近的瓦姐拉地区获得的 15.5~11 Ma 的活动时代相吻合 (Kellett *et al.*, 2009)。结合前人对不同地区 STDS 活动时代的报道, STDS 的活动时代具有一定的规律性, 自西向东其启动时代和停止活动时代逐渐变晚, 目前对于这一规律虽然尚无合理解释, 但笔者认为可能与印度-欧亚大陆碰撞之后的汇聚角度、汇聚速率以及深部岩石圈结构的改变有关, 具体的动力学背景还需要更多地质学、地球物理学等证据来证实。

4.3 中晚中新世快速冷却剥露

喜马拉雅造山带的高海拔和大地貌反差使其成为研究造山带构造隆升-冷却剥露事件的理想场所, 根据目前所报道的大量热年代学数据, 王国灿等

(2011) 将喜马拉雅新生代划分出 55~36 Ma、25~20 Ma、17~12 Ma 和 3 Ma 以来几次强抬升冷却剥露期, 其中 17~12 Ma 这一期事件主要集中于造山带的中西部地区, 如尼泊尔中部地区的 GHC 在 15~12 Ma 不断剥露至中地壳 (Godin *et al.*, 2001); STDS 的珠峰段在 16.7~16.4 Ma 的去顶速率大于 8.2 mm/a (Hodges *et al.*, 1998); 希夏邦马峰南侧的 GHC 淡色花岗岩在 17~14 Ma 之间存在约 12 km 的剥露, 剥露速率达 4 mm/a (Searle *et al.*, 1997); 藏南吉隆-聂拉木一带在 17~13 Ma 发生快速抬升-冷却剥露, 平均冷却速率达 50~55 °C/Ma (王国灿等, 2011)。该期冷却剥露事件的起止时间与 STDS 强烈活动时代和终止活动时代高度吻合, 被认为是 STDS 大规模伸展拆离作用导致的构造剥露的结果 (李明等, 2013)。而本文在东部的冲巴地区, 获得的锆石 U-Pb 和白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄分别为 12.4 ± 0.4 Ma 和 9.11 ± 0.25 Ma、 9.62 ± 0.10 Ma, 如果以锆石封闭温度为 800 °C、白云母封闭温度为 350 °C 计算, 冲巴淡色花岗岩的冷却速率高达 137~162 °C/Ma, 指示了快速的冷却剥露。相对于中西部地区, 研究区所处的东部地区 STDS 活动时代为 15.5~11 Ma (Kellett *et al.*, 2009), 与上述地区获得的快速冷却剥露事件时间一致, 因此, 笔者认为 12.4~9.11 Ma 的快速冷却事件与研究区 STDS 伸展拆离导致的构造剥露有关。除此之外, Warren 等 (2008) 对研究区南部的 Masang Kang 地区开展的变质 *P-T-t* 研究, 揭示基性麻粒岩在约 10 Ma 发生了快速的折返; 而邻近地区的花岗岩白云母/黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究也显示, 岩石在 11.4~10.7 Ma 发生了快速冷却 (Maluski *et al.*, 1988; Chakungal, 2006), 这些证据从不同方面佐证了本文的结论。

5 结论

(1) 冲巴淡色花岗岩沿喜马拉雅造山带东部的 STDS 展布, 其锆石 U-Pb 年龄为 12.4 ± 0.4 Ma, 白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 冷却年龄为 9.11 ± 0.25 Ma 和 9.62 ± 0.10 Ma, 将其归入新喜马拉雅阶段 (Neo-Himalayan)。

(2) 冲巴淡色花岗岩为同构造侵位花岗岩, 其锆石 U-Pb 年龄代表了研究区 STDS 的活动时代。从整体上看, 大喜马拉雅深熔作用以及 STDS 活动时代呈现自西向东逐渐变晚的规律。

(3) 冲巴淡色花岗岩从 12.4 Ma 到 9.11 Ma 发生了快速冷却剥露, 冷却速率高达 $137 \sim 162 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 这一冷却事件与研究区藏南拆离系的大规模伸展拆离导致的构造剥露有关。

致谢 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 和白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年分析和数据处理分别得到北京大学地球与空间科学学院马芳副教授和李建清副教授的指导和帮助; 两位审稿专家对本文进行了认真审阅并提出宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢。

References

- Aikman A B, Harrison T M and Ding L. 2008. Evidence for early ($> 44 \text{ Ma}$) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(1/2): 14~23.
- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59~79.
- Annen C, Scaillet B and Sparks R S J. 2006. Thermal constraints on the emplacement rate of a large intrusive complex: The Manaslu leucogranite, Nepal Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 71~95.
- Aoya M, Wallis S R, Terada K, *et al.* 2005. North-south extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement[J]. *Geology*, 33(11): 853~856.
- Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, *et al.* 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between Northwest India and Asia[J]. *Nature*, 373(1): 55~58.
- Brookfield M E. 1993. The Himalayan passive margin from Precambrian to Cretaceous[J]. *Sedimentary Geology*, 84(1/4): 1~35.
- Chakungal J. 2006. Geochemistry and metamorphism of metabasites, and spatial variation of P-T paths across the Bhutan Himalaya: Implications for the exhumation of the Greater Himalayan sequence [D]. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Chambers J, Parrish R, Argles T, *et al.* 2011. A short-duration pulse of ductile normal shear on the outer south Tibetan detachment in Bhutan: Alternating channel flow and critical taper mechanics of the eastern Himalaya [J]. *Tectonics*, 30(2), doi: 10.1029/2010TC002784.
- Coleman M and Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension [J]. *Nature*, 374(6517): 49~52.
- Coleman M E. 1998. U-Pb constraints on Oligocene-Miocene deformation and anatexis within the Central Himalaya, Marsyandi valley, Nepal[J]. *American Journal of Science*, 298(7): 553~571.
- Cottle J M, Jessup M J, Newell D L, *et al.* 2007. Structural insights into the early stages of exhumation along an orogen-scale detachment: The South Tibetan Detachment system, Dzakaa Chu section, eastern Himalaya[J]. *Journal of Structural Geology*, 29(11): 1781~1797.
- Davidson C, Grujic D E, Hollister L S, *et al.* 1997. Metamorphic reactions related to decompression and synkinematic intrusion of leucogranite, High Himalayan Crystallines, Bhutan[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(5): 593~612.
- Edwards M A and Harrison T M. 1997. 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[J]. *Geology*, 25(6): 543~546.
- Gao L E and Zeng L S. 2014. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130: 136~155.
- Godin L, Grujic D, Law R D, *et al.* 2006. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: An introduction[J]. *Geological Society of London, Special Publications*, 268: 1~23.
- Godin L, Parrish R R, Brown R L, *et al.* 2001. Crustal thickening leading to exhumation of the Himalayan metamorphic core of central Nepal: Insight from U-Pb geochronology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology[J]. *Tectonics*, 20(5): 729~747.
- Guillot S, Hodges K, Le Fort P, *et al.* 1994. New constraints on the age of the Manaslu leucogranite: Evidence for episodic tectonic denudation in the central Himalayas[J]. *Geology*, 22(6): 559~562.
- Harris N and Massey J. 1994. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites[J]. *Tectonics*, 13(6): 1537~1546.
- Harrison T M, 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.
- Harrison T M, Lovera O M and Grove M. 1997. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. *Geology*, 25(10): 899~902.
- Hodges K V. 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 112(3): 324~350.
- Hodges K, Bowring S, Davidek K, *et al.* 1998. Evidence for rapid displacement on Himalayan normal faults and the importance of tectonic denudation in the evolution of mountain ranges[J]. *Geology*, 26(6): 483~486.
- 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 model[J].

- Tectonics, 29(2), TC2014. doi:10.1029/2009TC002551.
- Kellett D A and Godin L. 2009. Pre-Miocene deformation of the Himalayan superstructure, Hidden valley, central Nepal[J]. Journal of the Geological Society, 166(2): 261~275.
- Kellett D A, Grujic D and Erdmann S. 2009. Miocene structural reorganization of the South Tibetan detachment, eastern Himalaya: Implications for continental collision[J]. Lithosphere, 1(5): 259~281.
- Kellett D A, Grujic D, Warren C, *et al.* 2010. Metamorphic history of a syn-convergent orogen-parallel detachment: The South Tibetan detachment system, Bhutan Himalaya[J]. Journal of Metamorphic Geology, 28(8): 785~808.
- Larson K P, Godin L, Davis J D, *et al.* 2010. Out-of-sequence deformation and expansion of the Himalayan orogenic wedge: Insight from the Changgo culmination, south central Tibet[J]. Tectonics, 29(4): 1~30.
- Lederer G W, Cottle J M, Jessup M J, *et al.* 2013. Timescales of partial melting in the Himalayan middle crust: Insight from the Leo Pargil dome, northwest India[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 166(5): 1 415~1 441.
- Lee J H, McClelland W, Wang Y, *et al.* 2006. Oligocene-Miocene crustal flow southern Tibet: Geochronology of Mabja Dome[J]. Geological Society of London, Special Publications, 268: 445~469.
- Leloup P H, Maheo G, Arnaud N, *et al.* 2010. The South Tibet detachment shear zone in the Dingye area Time constraints on extrusion models of the Himalayas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 292(1/2): 1~16.
- Li Ming, Wang An, Liu Chao, *et al.* 2013. Neogene exhumation of the Greater Himalaya slab in Gyirong area, Tibet, constrained by fission track geochronology[J]. Geological Bulletin of China, 32(1): 86~92(in Chinese with English abstract).
- Liu X B, Liu X H, Leloup P H, *et al.* 2012. Ductile deformation within Upper Himalaya Crystalline Sequence and geological implications, in Nyalam area, Southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 57(26): 3 469~3 481.
- Liu Z C, Wu F Y, Ji W Q, *et al.* 2014. Petrogenesis of the Ramba leucogranite in the Tethyan Himalaya and constraints on the channel flow model[J]. Lithos, 208/209: 118~136.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex: A geochronological tool kit for Microsoft Excel version 3.00[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre, 4: 1~70.
- Maluski H, Matte P, Brunel M, *et al.* 1988. Argon 39-argon 40 dating of metamorphic and plutonic events in the North and High Himalaya belts(southern Tibet, China)[J]. Tectonics, 7(2): 299~326.
- Meng Mengping, Zhao Zhidan, Liu Dong, *et al.* 2014. The Chronology and Petrogenesis of the Leucogranite from Yadong Area, Southern Tibet[C]. Chinese Geoscience Union. Beijing(in Chinese).
- Mitsuishi M, Simon R W, Aoya M, *et al.* 2012. 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[J]. Earth and Planetary Science Letters, 325/326: 10~20.
- Murphy M A and Harrison T M. 1999. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk Valley, south Tibet[J]. Geology, 27(9): 831~834.
- Quigley M C, Yu L J, Geogory 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.
- Rage J C, Cappetta H, Hartenberger J L, *et al.* 1995. Collision ages [J]. Nature, 375(3): 286.
- Rowley D B. 1996. Age of initiation collision between India and Asia: Review of the stratigraphic data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 145(1/4): 1~13.
- Sachan H K, Kohn M J, Saxena A, *et al.* 2010. The Malari leucogranite, Garhwal Himalaya, northern India: Chemistry, age, and tectonic implications[J]. Geological Society of American Bulletin, 122(11/12): 1 865~1 876.
- Schneider D, Edwards M, Kidd W S F, *et al.* 1999. Early Miocene anatexis identified in the western syntaxis, Pakistan Himalaya[J]. Earth and Planetary Science Letters, 167(3/4): 121~129.
- Searle M P and Godin L. 2003. The South Tibetan Detachment system and the Manaslu leucogranite: A structural re-interpretation and restoration of the Annapurna Manaslu Himalaya, Nepal[J]. Journal of Geology, 111(5): 505~523.
- Searle M P, Noble S R, Hurford A J, *et al.* 1999. Age of crustal melting, emplacement and exhumation history of the Shivling leucogranite, Garhwal Himalaya[J]. Geological Magazine, 136(5): 513~525.
- 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]. Journal of Geology, 105(3): 295~317.
- Simpson R L, Parrish R R, Searle M P, *et al.* 2000. Two episodes of monazite crystallization during metamorphism and crustal melting in the Everest region of the Nepalese Himalaya[J]. Geology, 28(5): 403~406.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. Chemical Geology, 249(1/2): 1~35.
- Vannay J C, Grasemann B, Rahn M, *et al.* 2004. Miocene to Holocene exhumation of metamorphic crustal wedges in the NW Himalaya: Evidence for tectonic extrusion coupled to fluvial erosion[J]. Tectonics, 23(1): TC1014. doi:10.1029/2002TC001429.

- Viskupic K, Hodges K V and Bowring S A. 2005. Timescales of melt generation and the thermal evolution of the Himalayan metamorphic core, Everest region, eastern Nepal[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 149(1): 1~21.
- Walker J D, Martin M W, Bowring S A, *et al.* 1999. Metamorphism, melting, and extension: Age constraints from the High Himalayan Slab of southeast Zaskar and northwest Lahaul[J]. *Journal of Geology*, 107(4): 473~495.
- Wang Guocan, Cao Kai, Zhang Kexin, *et al.* 2011. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic[J]. *Science China Earth Science*, 41(3): 332~349(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Liu Jiang, *et al.* 2012. Middle-Miocene transformation of tectonic regime in the Himalayan orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(33): 3 162~3 172(in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Zhang J J, Santosh M, *et al.* 2012. Andean-type orogeny in the Himalayas of south Tibet: Implications for early Paleozoic tectonics along the Indian margin of Gondwana[J]. *Lithos*, 154: 248~262.
- Wang Xiaoxian, Zhang Jinjiang, Yan Shuyu, *et al.* 2015. Structural characteristics and active time of the Kangmar detachment, Southern Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(2): 250~259(in Chinese with English abstract).
- Warren C J, Beaumont C and Jamieson R A. 2008. Modelling tectonic styles and ultra-high pressure(UHP) rock exhumation during the transition from oceanic subduction to continental collision[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 267(1/2): 129~145.
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses[J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 31~47.
- Wu C D, 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.
- Wu Fuyuan, Liu Zhichao, Liu Xiaochi, *et al.* 2015. Himalayan leucogranite: petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1~36(in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1 554~1 569.
- Yan D P, Zhou M F, Robinson P T, *et al.* 2012. Constraining the mid-crustal channel flow beneath the Tibetan Plateau: Data from the Nielaxiongbo gneiss dome, SE Tibet[J]. *International Geology Review*, 54(6): 615~632.
- Yang X Y, Zhang J J, Qi G W, *et al.* 2009. Structure and deformation around the Gyirong basin, north Himalaya, and onset of the south Tibetan detachment[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(8): 1 046~1 058.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211~280.
- Zeng L S, Liu J, Gao L E, *et al.* 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardois gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104~112.
- Zhang Hongfei, Harris N, Parrish R, *et al.* 2004. The U-Pb ages and geological implications of the Kudui and Sajia leucogranites from sajia dome in northern Himalaya[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(20): 2 090~2 094(in Chinese with English abstract).
- Zhang J J and Guo L. 2007. Structure and Geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the south Tibetan detachment system[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 29(5/6): 722~736.
- Zhang J J, Santosh M, Wang X X, *et al.* 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 939~960.
- Zhang Jinjiang. 2007. A review on extensional structures in northern Himalaya and southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639~649(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李明, 王岸, 刘超, 等. 2013. 西藏吉隆地区高喜马拉雅新近纪冷却剥露——来自裂变径迹年龄的证据[J]. *地质通报*, 32(1): 86~92.
- 蒙梦平, 赵志丹, 刘栋, 等. 2014. 藏南亚东地区淡色花岗岩年代学与岩石成因[C]. 北京: 中国地球科学联合学术年会.
- 王国灿, 曹凯, 张克信, 等. 2011. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局[J]. *中国科学*, 41(3): 332~349.
- 王晓先, 张进江, 刘江, 等. 2012. 中新世中期喜马拉雅造山带构造体制的转换[J]. *科学通报*, 57(33): 3 162~3 172.
- 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.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. *岩石学报*, 31(1): 1~36.
- 张宏飞, Harris N, Parrish R, 等. 2004. 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[J]. *科学通报*, 49(20): 2 090~2 094.
- 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.