

doi: 10.13745/j.esf.2016.01.024

藏南冲巴淡色花岗岩的地球化学特征、成因机制及其构造动力学意义

王晓先^{1,2}, 张进江², 闫淑玉^{2,3}, 刘江^{2,4}, 郭磊⁴

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. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 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

WANG Xiaoxian^{1,2}, ZHANG Jinjiang², YAN Shuyu^{2,3}, LIU Jiang^{2,4}, GUO Lei⁴

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. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing 100083, China
4. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

WANG Xiaoxian, ZHANG Jinjiang, YAN Shuyu, et al. Geochemical characteristics of the Chongba leucogranites, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 264-275

Abstract: The Chongba leucogranite pluton is situated in the eastern part of the Greater Himalayan leucogranite belt. Geochemical data show that these rocks are characterized by high SiO₂ (73.87%–74.95%), Al₂O₃ (14.20%–14.74%), K₂O (4.44%–4.89%), K₂O/Na₂O (1.19–1.42), A/CNK values (1.18–1.22), and enrichment in Rb, Th, U, depletion in Ba, Nb, Sr, Zr, and strong negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.27-0.37$). These features suggest that they are high potassium calc-alkaline and peraluminous S-type granites. The high Rb/Sr (2.6–8.6) and low CaO/Na₂O (0.18–0.20) ratios imply that the source rocks were probably pelites. The relatively high (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.763199–0.778799) and low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (–16.7––16.3) compared with those of the metasedimentary rocks in the Greater Himalaya crystalline complex (GHC), indicating that the leucogranites were generated from partial melting of the GHC metasedimentary rocks. The features of high (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i and low Sr content, and the Rb/Sr values decreasing with increased Ba content indicate that the Chongba leucogranites were derived from muscovite dehydration melting of the GHC metapelite under water-absent condition, which is probably closely associated with the structural decompression caused by the extensional decollement of the south Tibet detachment system (STDS).

Key words: southern Tibet; Chongba leucogranites; geochemistry; Sr-Nd isotopes; formation mechanism

摘要: 冲巴淡色花岗岩位于大喜马拉雅淡色花岗岩带的东部, 岩石地球化学研究结果显示, 其具有高的 SiO₂ (73.87%~74.95%)、Al₂O₃ (14.20%~14.74%) 和 K₂O (4.44%~4.89%), 高的 K₂O/Na₂O 比值 (1.19~1.42) 和 A/CNK 比值 (1.18~1.22), 富集 Rb、Th 和 U, 亏损 Ba、Nb、Sr 和 Zr, 具有强烈的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.27\sim0.37$), 属于高钾钙碱性过铝质 S 型花岗岩。冲巴淡色花岗岩具有较高的 Rb/Sr 比值 (2.6~8.6), 低的 CaO/Na₂O 比值 (0.18~0.20), 指示源区可能为泥质岩区, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.763 199~

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-04-13

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, 41121062)

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

0.778 799 和 $-16.7 \sim -16.3$, 与大喜马拉雅结晶杂岩(GHC)中变泥质岩一致,表明其来自 GHC 变泥质岩的部分熔融。淡色花岗岩具有高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 而低的 Sr 含量,且随着 Ba 含量增加, Rb/Sr 比值降低。这些特征表明,冲巴淡色花岗岩是无水条件下变泥质岩发生白云母脱水熔融的产物,部分熔融可能与 STDS 伸展拆离导致的构造减压密切相关。

关键词:藏南;冲巴淡色花岗岩;地球化学;Sr-Nd 同位素;成因机制

中图分类号:P588.121 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)01-0264-12

0 引言

喜马拉雅造山带是新生代印度-欧亚大陆碰撞的产物,在碰撞的中晚期(晚始新世—中新世)地壳物质发生强烈的深熔作用^[1-7],形成了两条延伸数千 km 的花岗岩带,即大喜马拉雅淡色花岗岩带和北喜马拉雅穹窿花岗岩带,这些淡色花岗岩主要沿着碰撞造山过程形成的伸展构造分布^[8-29],并与造山带演化过程关系密切,是研究造山作用中、晚期深部构造-岩浆作用的重要“岩石探针”^[30]。

大喜马拉雅淡色花岗岩主要沿喜马拉雅山脉的山脊分布,由一系列不连续的淡色花岗岩侵入体组成。近年来,许多学者对淡色花岗岩进行了大量的年代学研究,发现大喜马拉雅淡色花岗岩形成的时间跨度较大,为 $36 \sim 11 \text{ Ma}$ ^[2,5,10,12,21,24,27,31-38]。虽然对于淡色花岗岩的侵位时代已经有了较为准确的厘定,然而有关淡色花岗岩的成因问题仍然有不少的争议。目前,争议的焦点主要集中在两个方面:(1)淡色花岗岩的源区。目前绝大部分学者认为,淡色花岗岩来自大喜马拉雅结晶杂岩(GHC)中变质沉积岩的部分熔融^[2,39-42];少数学者认为,喜马拉雅淡色花岗岩是由小喜马拉雅沉积岩系(LHS)和 GHC 混合部分熔融而成^[43-44]。而最近 Guo 和 Wilson^[1]通过对喜马拉雅造山带部分地区淡色花岗岩进行详细的地球化学、同位素地球化学和实验岩石学的模拟研究,认为淡色花岗岩源区是 GHC 地壳物质和来自 LHS 的流体的两端混合区。(2)淡色花岗岩的成因机制。目前,对于淡色花岗岩主要来自变泥质岩中白云母脱水熔融这一结论已基本达成共识^[16,45-47],但导致白云母脱水熔融的触发因素还具有较大争议,如 Le Fort 等^[43]认为,水等流体的加入是导致部分熔融的因素。部分学者通过实验岩石学研究发现,在无外来流体的情况下,部分熔融也可以发生^[40],而 Harris、Massey 和 Davidson 等^[41,48]认为,造山过程中的伸展构造发生活动导致的构造减压是部分熔融的主要触发因素。后期又有部分学

者^[2,16,44,46]提出,断裂活动过程中的剪切摩擦生热和放射性同位素生热可以导致部分熔融。理论计算表明,单纯的摩擦剪切热和地壳放射性生热元素生热很难产生大规模的岩浆作用^[49]。由此可见,淡色花岗岩的成因问题仍然需要进一步的研究,尤其是需要来自岩石学、地球化学和同位素地球化学等方面的证据。

本文采集藏南冲巴地区大喜马拉雅淡色花岗岩样品,进行详细的全岩主量、微量和 Sr-Nd 同位素地球化学分析,查明淡色花岗岩的地球化学特征和源区,从而探讨其成因机制和构造动力学意义。

1 区域地质背景

狭义的喜马拉雅造山带指雅鲁藏布江缝合带与主前锋逆冲断裂(MFT)之间由新生代印度-欧亚大陆碰撞形成的强烈变形、变质带(图 1)。造山带自北向南发育一系列北倾的断裂,包括藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断裂(MCT)、主边界逆冲断裂(MBT)和 MFT。被这些断裂分隔的岩石-构造单元自北向南依次为特提斯喜马拉雅沉积岩系(THS)、GHC、LHS 和西瓦里克前陆盆地沉积(SS)。其中,最北部的 THS 主要由早古生代到始新世的、经历极低级变质的碎屑岩和碳酸岩组成^[50],在其中部自西向东分布一系列片麻岩穹窿——北喜马拉雅片麻岩穹窿(NHGD),是北喜马拉雅伸展构造的重要组成部分^[51],其核部多出露新生代淡色花岗岩或二云母花岗岩,形成 NHGD 花岗岩带^[3,29,52-63]。GHC 位于 STDS 和 MCT 之间,为中高级变质结晶杂岩^[64],其上部靠近 STDS 处发育大量的淡色花岗岩体,形成延伸数千 km 的花岗岩带,即大喜马拉雅淡色花岗岩带^[2,5-6,12,18,21,27,32](图 1)。LHS 位于 MCT 和 MBT 之间,由碎屑沉积岩和低级变质岩组成^[50]。最南部为 SS,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)。该区以 STDS 为界,其北为 THS,由奥

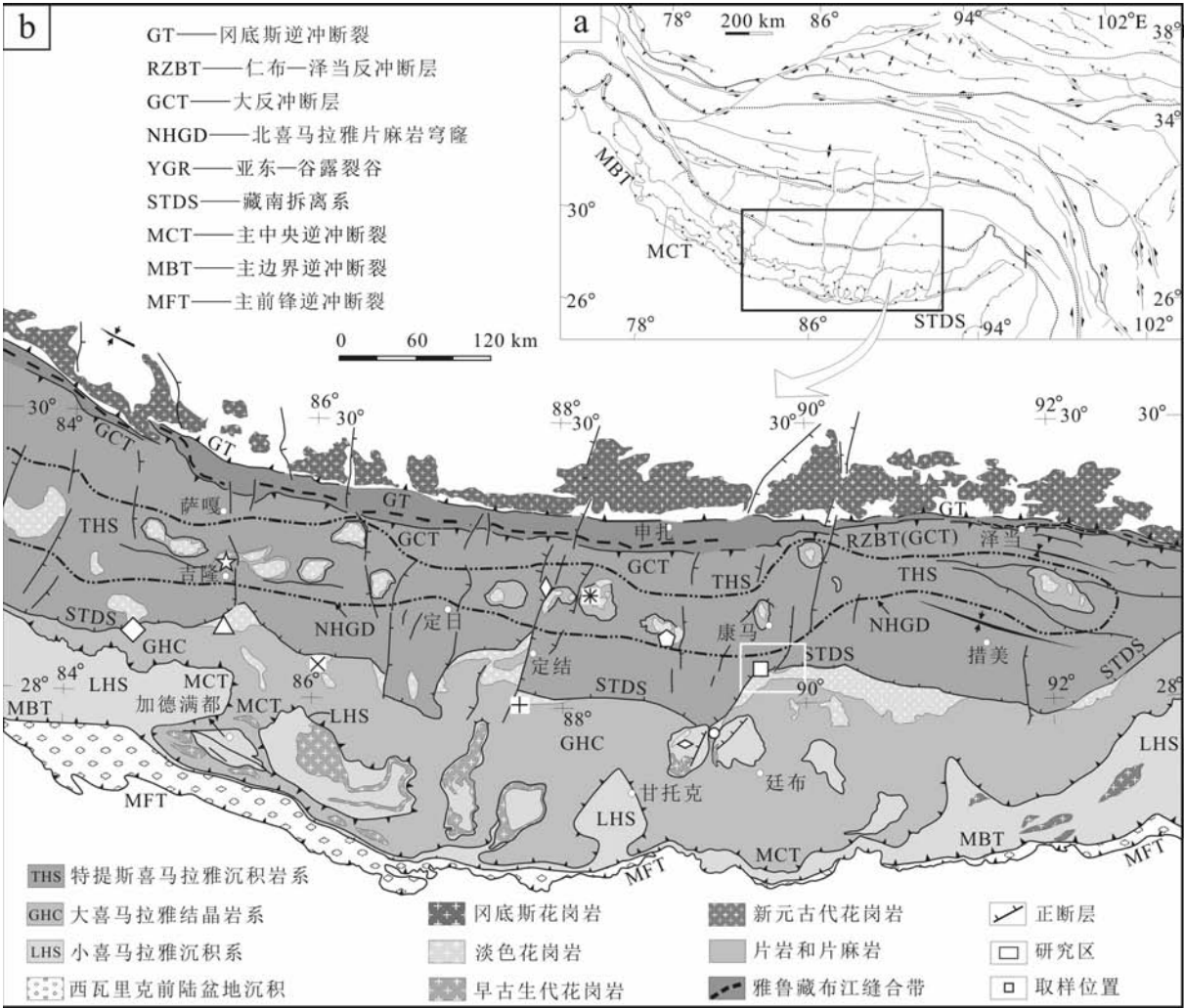


图1 喜马拉雅造山带中东段地质简图
(据文献[38]修改)

Fig.1 Sketch geological map of the middle and east Himalayan orogen

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。其南由GHC中高级变质的亚东岩群组成,主要由含夕线石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^[65]。GHC最上部为STDS淡色花岗岩体(图2),岩石总体呈灰白色(图3a),显微镜下观察其主要矿物成分为石英(35%~40%)、斜长石(40%~45%)、白云母(15%)、黑云母(5%)(图3b)。

2 实验方法

淡色花岗岩全岩的主量、微量和稀土元素含量

的测试在加拿大ACME实验室完成。其中主量元素的测试在电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-ES)上完成,仪器的测试极限为0.01%;微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法分析,微量元素的测试极限为 0.1×10^{-6} ,稀土元素测试极限为 0.01×10^{-6} 。

Rb、Sr、Sm和Nd同位素的分离和提纯在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。同位素的测试在天津地质调查中心的新型热电离质谱仪TRITON上完成,90°扇形磁分析器的有效半径为81 cm,加速电压10 kV时分析质量数范围为3~320 amu,分辨率大于450(10%峰谷定义);灵敏度大于3 ion/100 μmol或1/500;丰度灵敏度 $\leq 10 \times 10^{-9}$ 。具体实验原理和流程见文献[66]。在样品测

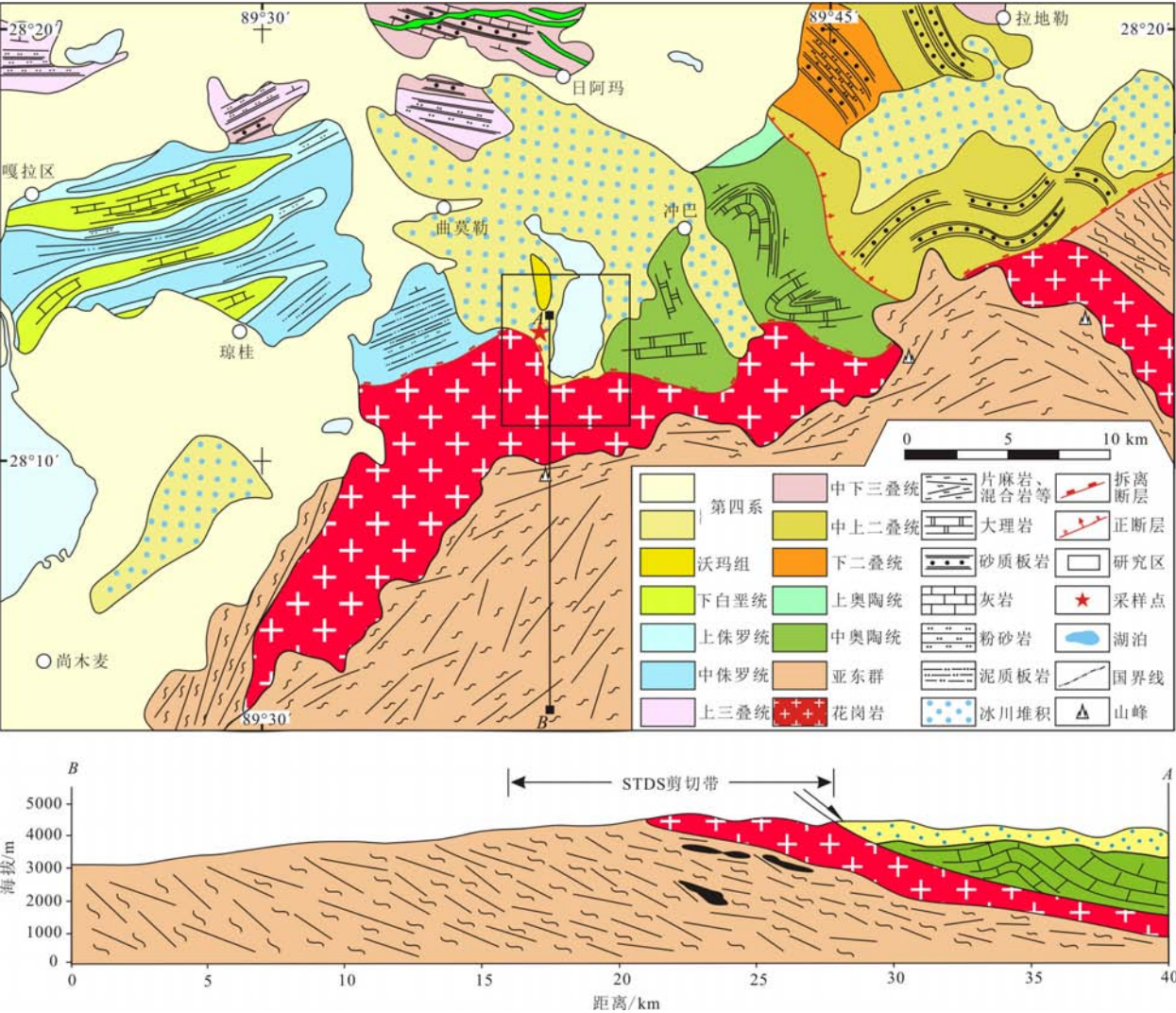
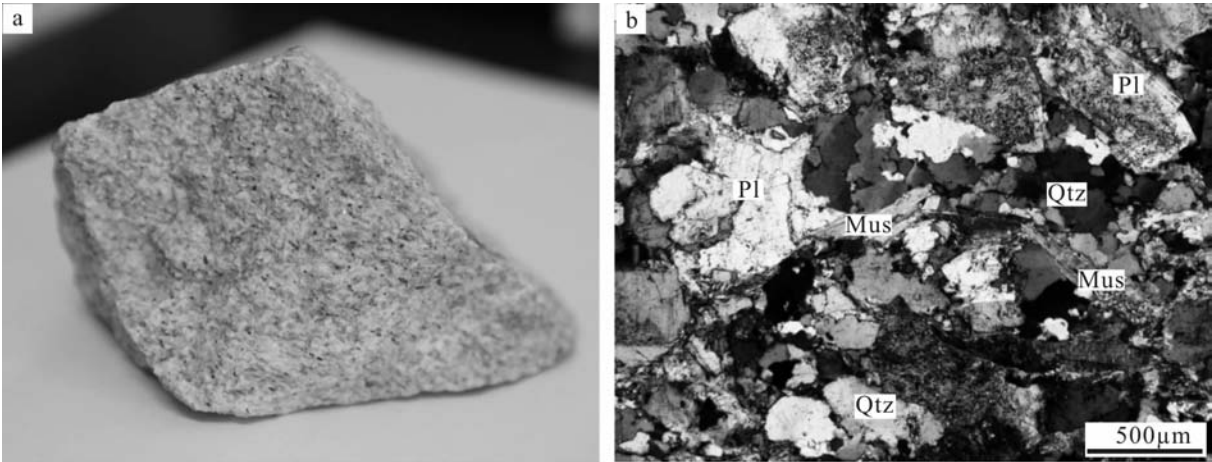


图 2 藏南冲巴地区地质简图
Fig. 2 Sketch geological map of Chongba area, southern Tibet



Pl—斜长石; Qtz—石英; Mus—白云母。
图 3 冲巴淡色花岗岩露头 and 显微照片

Fig. 3 Outcrop-scale and micro-scale photographs of the leucogranite from Chongba area

试过程中,所测定的 JNDI Nd 同位素标样和 NBS-987 Sr 标样的 Nd-Sr 同位素值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,107\pm0.000\,004(2\sigma)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\,265\pm0.000\,004(2\sigma)$ 。

3 实验结果

3.1 全岩元素地球化学特征

样品全岩主量和微量元素数据见表 1。冲巴淡色花岗岩具有较高的 SiO_2 (73.87%~74.95%)、 Al_2O_3 (14.20%~14.74%) 和 K_2O (4.44%~4.89%) 含量,较低的 CaO (0.65%~0.74%)、 Fe_2O_3 (0.54%~1.16%)、 MgO (0.13%~0.23%) 和 TiO_2 (0.06%~0.10%) 含量。样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的比值较高,为 1.19~1.42(表 1),在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,样品位于高钾钙碱性系列中(图 4a)。A/CNK 值为 1.18~1.22,均大于 1.1,在 A/NK-A/CNK 图解中,全部位于过铝质区域中(图 4b)。总体来

看,冲巴淡色花岗岩属于高钾钙碱性过铝质淡色花岗岩。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 5a),冲巴淡色花岗岩表现为 Rb、Th、U、Ta 和 Pb 的正异常以及 Ba、Nb 和 Sr 的负异常。

在稀土元素上,冲巴淡色花岗岩稀土元素总量(TREE)为 $(34.85\sim67.14)\times10^{-6}$,样品相对富集轻稀土元素(LREE),亏损重稀土元素(HREE), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.80~9.27,表明轻、重稀土元素分馏程度相对较强。在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图中(图 5b),显示为右倾型的稀土分布曲线,具有较强的负 Eu 异常, δEu 值为 0.27~0.37。

3.2 Sr 和 Nd 同位素地球化学特征

样品全岩 Sr 和 Nd 同位素测试结果列于表 2。冲巴淡色花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 较高,为 0.763 199~0.778 799, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 较低,为-16.7~-16.3,计算的两阶段亏损地幔模式年龄为 2 169~2 084 Ma,暗示其可能来自古老地壳的重熔。

表 1 淡色花岗岩全岩主量、微量和稀土元素分析数据
Table 1 The whole-rock major and trace elements compositions of the Chongba leucogranites

样品号	$w_{\text{B}}/\%$													$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	A/NK	A/CNK	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO_2	LOI	Sum						
TYC-41	74.95	14.2	0.92	0.19	0.68	3.46	4.5	0.08	0.14	0.02	0.8	99.98	7.96	1.34	1.20	1.30	0.20	
TYC-42	73.87	14.74	1.16	0.23	0.74	3.62	4.44	0.1	0.11	0.02	0.9	99.97	8.06	1.37	1.22	1.23	0.20	
TYC-43	74.78	14.48	0.80	0.13	0.71	3.74	4.45	0.06	0.13	0.02	0.7	99.99	8.19	1.32	1.18	1.19	0.19	
TYC-44	74.46	14.58	0.54	0.16	0.70	3.55	4.89	0.07	0.12	0.01	0.9	99.99	8.44	1.31	1.18	1.38	0.20	
TYC-46	74.55	14.37	0.81	0.14	0.67	3.64	4.46	0.06	0.12	0.02	1.2	100.00	8.10	1.33	1.19	1.23	0.18	
TYC-48	74.88	14.26	0.79	0.15	0.65	3.42	4.87	0.07	0.19	0.02	0.7	100.00	8.29	1.31	1.18	1.42	0.19	

样品号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$																					
	Be	Sc	Co	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
TYC-41	3	3	1.1	0.3	33	20.8	299.4	69.6	12.3	37.4	9.6	13.6	147	8.2	18.5	2.1	7.6	2.19	0.25	2.37	0.43	2.18
TYC-42	6	3	0.6	0.5	27	20.4	267.3	97.3	13.0	50.7	10.5	16.7	171	12.4	27.3	3.1	12.6	2.96	0.26	2.80	0.48	2.46
TYC-43	5	3	0.3	0.3	29	20.3	281.8	36.1	15.3	35.8	10.5	17.1	81	5.7	12.8	1.4	5.0	1.49	0.20	1.87	0.42	2.58
TYC-44	5	3	0.5	0.3	10	18.5	268.6	55.4	13.4	34.4	9.9	9.3	121	8.1	18.2	2.1	8.0	2.19	0.24	2.47	0.46	2.46
TYC-46	4	3	0.4	0.5	30	19.5	278.4	33.6	14.9	36.1	10.8	16.7	77	5.4	12.6	1.4	5.3	1.51	0.20	1.90	0.40	2.59
TYC-48	3	3	0.4	0.4	18	19.8	337.0	39.3	14.0	35.6	9.9	11.0	111	6.9	15.2	1.7	6.4	1.97	0.25	2.13	0.45	2.46

样品号	$w_{\text{B}}/10^{-6}$													Rb/Sr	$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	δEu	
	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Sn	LREE	HREE						TREE
TYC-41	0.38	1.02	0.15	0.94	0.12	1.6	1.4	7.1	5.7	3.1	9	38.84	7.59	46.43	4.3	2.42	2.09	6.26	0.33
TYC-42	0.41	1.10	0.16	0.96	0.12	2.1	1.7	11.1	8.8	3.6	9	58.65	8.49	67.14	2.6	2.70	2.41	9.27	0.27
TYC-43	0.49	1.36	0.22	1.46	0.20	1.2	1.3	3.5	3.7	3.3	13	26.59	8.60	35.19	7.8	2.47	1.06	2.80	0.37
TYC-44	0.43	1.12	0.18	1.06	0.14	1.6	1.9	10.3	6.3	3.8	6	38.81	8.32	47.13	4.9	2.39	1.93	5.48	0.31
TYC-46	0.45	1.34	0.22	1.37	0.19	1.5	1.3	5.3	3.9	3.4	13	26.39	8.46	34.85	8.3	2.31	1.15	2.83	0.36
TYC-48	0.45	1.21	0.17	1.02	0.14	1.5	1.5	3.3	5.4	2.7	11	32.46	8.03	40.49	8.6	2.26	1.73	4.85	0.37

注: LOI 为烧失量; A/NK= $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, A/CNK= $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$; $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}}+\text{Gd}_{\text{N}})$, 其中 N 表示球粒陨石标准化, 数值引自文献[67]。

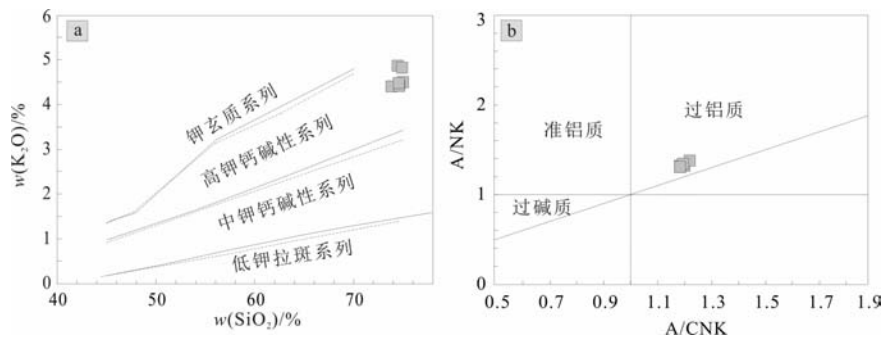


图 4 冲巴淡色花岗岩的 SiO₂-K₂O (a)和 A/CNK-A/NK 分类图解(b)
Fig. 4 The SiO₂ versus K₂O diagram (a) and A/CNK versus A/NK diagram (b) of the Chongba leucogranites

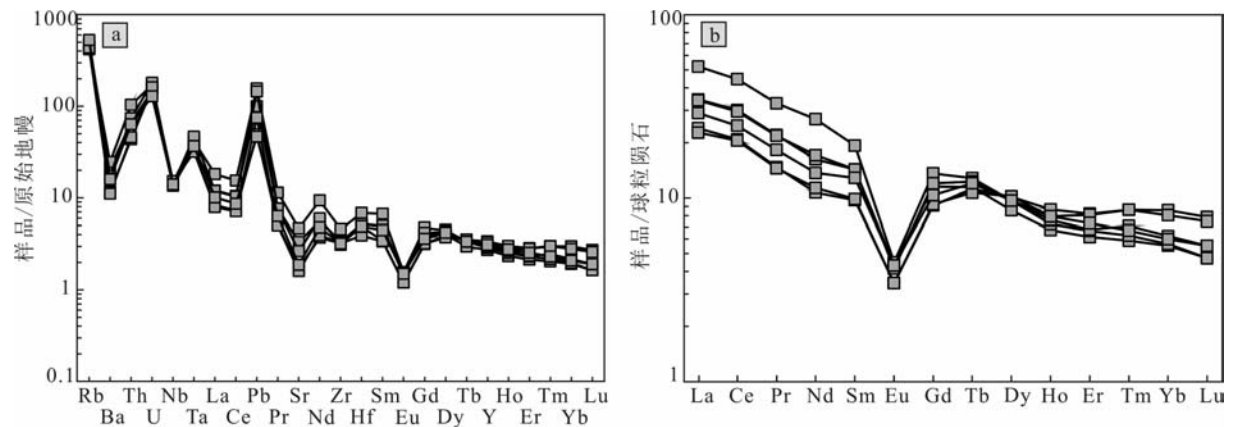


图 5 冲巴淡色花岗岩的原始地幔标准化蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)
(原始地幔和球粒陨石数值引自文献[67])
Fig. 5 Primitive mantle(PM)-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized rare earth element distribution patterns(b) of the Chongba leucogranites

表 2 淡色花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素分析数据

Table 2 The whole-rock Sr and Nd isotopic compositions of the Chongba leucogranites

样品号	T/Ma	w(Rb)/ 10 ⁻⁶	w(Sr)/ 10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ _m	I _{Sr}	w(Sm)/ 10 ⁻⁶	w(Nd)/ 10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ _m	T _{DM} / Ma	ε _{Nd} (t)
TYC-42	12	267.3	97.3	7.759 51	0.764 521	0.000 004	0.763 199	2.96	12.60	0.149 046	0.511 780	0.000 003	2 169	-16.7
TYC-43	12	281.8	36.1	22.048 65	0.779 943	0.000 045	0.776 186	1.49	5.00	0.189 067	0.511 781	0.000 008	2 131	-16.7
TYC-44	12	268.6	55.4	13.694 45	0.771 333	0.000 193	0.768 999	2.19	8.00	0.173 682	0.511 803	0.000 003	2 121	-16.3
TYC-46	12	278.4	33.6	23.403 36	0.779 168	0.000 007	0.775 180	1.51	5.30	0.180 759	0.511 780	0.000 003	2 149	-16.7
TYC-48	12	337.0	39.3	24.220 64	0.782 927	0.000 032	0.778 799	1.97	6.40	0.195 293	0.511 799	0.000 004	2 084	-16.4

注：⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 由通过 ICP-MS 测试的微量元素 Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量计算所得，计算公式为⁸⁷Rb/⁸⁶Sr=Rb/Sr×2.981，¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=Sm/Nd×[0.531 497+0.142 521×(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s]。(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t=(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_s+⁸⁷Rb/⁸⁶Sr(e^{λ_{Rb}t}-1)，(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_t=(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s+¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd(e^{λ_{Sm}t}-1)；ε_{Nd}=[(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_s/(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}-1]×10⁴，f_{Sm/Nd}=(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}-1。(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.512 638，(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.196 7，(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.513 15，(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.213 7；λ_{Rb}=1.42×10⁻¹²a⁻¹[68]，λ_{Sm}=6.54×10⁻¹²a⁻¹[69]。两阶段模式年龄 T_{DM} 的计算见文献[70]。

4 讨论

4.1 冲巴淡色花岗岩的源岩

大喜马拉雅淡色花岗岩的源岩问题一直具有争议,前人从地球化学和实验岩石学等方面进行

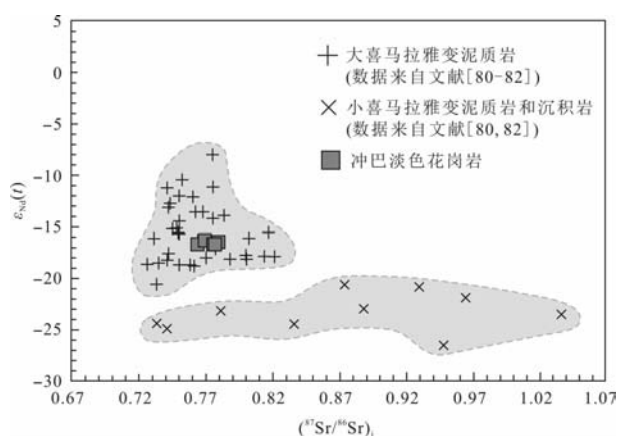
了相关的研究:(1)杨晓松等^[71]通过高温高压岩石学模拟实验发现,GHC 内黑云斜长片麻岩在温度为 770~980 ℃,压力为 1.0~1.4 GPa,无外来流体参与的条件 下发生部分熔融,形成与大喜马拉雅淡色花岗岩成分类似的熔体,且部分熔融残留物质与 GHC 下地壳麻粒岩成分相当,据此认为淡色花岗

岩的源岩为 GHC 黑云斜长片麻岩^[72]。(2)Knesel 和 Davidson^[73]通过对 GHC 内变泥质岩的实验岩石学研究发现,变泥质岩早期发生白云母脱水部分熔融,形成花岗质熔体。该熔体成分与前人^[2,6,24,31,42-43,45,74-76]研究的大喜马拉雅淡色花岗岩地球化学特征相吻合,因此,认为大喜马拉雅淡色花岗岩的源岩应该为 GHC 变泥质岩。

冲巴淡色花岗岩主要的矿物组成为石英、斜长石、白云母、黑云母,且云母含量较高,在地球化学特征上表现为高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量,相对富集大离子亲石元素 Rb 及放射性生热元素 Th 和 U,亏损高场强元素 Ba、Nb、Sr、Zr,这些与壳源 S 型花岗岩的特征相吻合^[77]。样品的 A/CNK 较高(1.18~1.22),表现为强过铝质的特征,CaO/ Na_2O 比值较低(0.18~0.20)。实验岩石学研究表明,泥质岩部分熔融形成 CaO/ Na_2O 小于 0.30 的强过铝质花岗岩^[78]。样品 Rb/Sr 比值(2.6~8.6)较高,远高于大陆地壳的平均值 0.24^[79],而且具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.763 199~0.778 799)比值和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-16.7~-16.3),两阶段亏损地幔模式年龄 T_{DM_2} 介于 2 169~2 084 Ma,暗示源岩来自古老的大陆地壳。综上分析,认为冲巴淡色花岗岩的源岩可能为古老大陆地壳中的泥质岩。为了精确限定其源岩,将冲巴淡色花岗岩 Sr、Nd 同位素与前人发表的 GHC 变泥质岩、LHS 变质沉积岩进行对比(图 6),结果显示所有样品的 Sr、Nd 同位素值均位于 GHC 变泥质岩区域中。另外,冲巴淡色花岗岩的两阶段亏损地幔模式年龄 T_{DM_2} (2 169~2 084 Ma)与 GHC 变泥质岩的相同^[80-82],且与 GHC 变泥质岩中碎屑锆石获得的 2 100 Ma 的峰值年龄相符^[83],暗示其可能来自 GHC 变泥质岩的部分熔融。综上所述,认为冲巴淡色花岗岩的源岩为 GHC 变泥质岩。

4.2 冲巴淡色花岗岩的成因机制

大喜马拉雅淡色花岗岩主要来自 GHC 变泥质岩的部分熔融,然而其熔融机制还有争议,目前来看争议的焦点主要集中在是否有外来流体参与了部分熔融^[4,40,45,47,73,76]。Knesel 和 Davidson^[73]对 GHC 变泥质岩进行部分熔融实验,研究发现单一源区的变泥质岩早期在无水条件下发生白云母脱水熔融,形成一套低 Sr、高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值的淡色花岗岩;后期随着早期熔融过程中形成的含水流体的加入,发生水致部分熔融,形成一套高 Sr、低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值的花岗岩。前人曾对采自冲巴淡色花岗岩体南部的



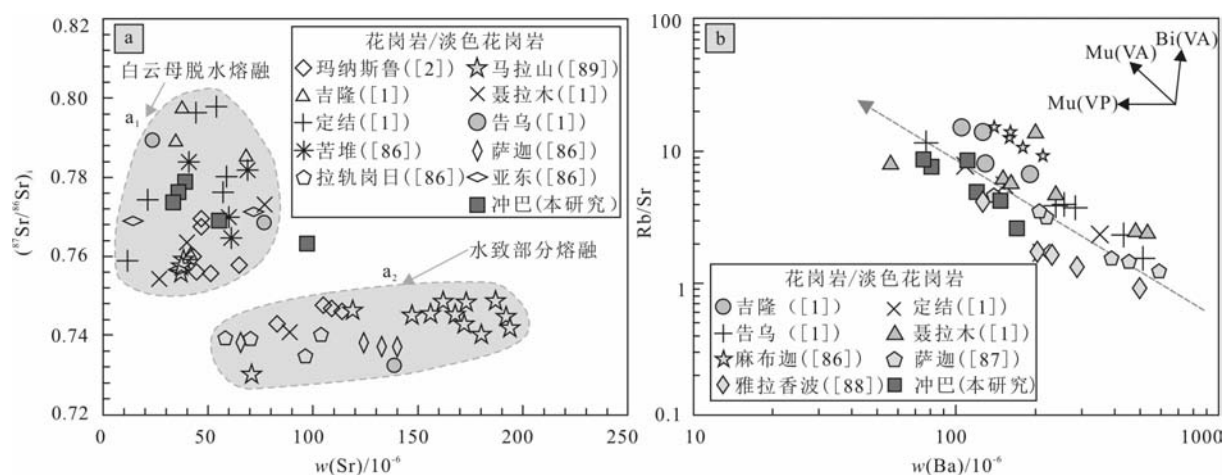
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以 $t=12$ Ma 计算。

图 6 冲巴淡色花岗岩、GHC 变泥质岩和 LHS 变泥质岩/沉积岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图

Fig. 6 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the Chongba leucogranites, GHC metapelites and LHS metapelite/sedimentary rocks

样品进行了定年,结果显示其年龄约为 12 Ma^[84],这一年龄可以与其他地区大喜马拉雅淡色花岗岩年龄对比,是同一期岩浆作用的产物。本文搜集已经发表的分布于不同地区、年龄基本相同的淡色花岗岩^[6,22,67-68]的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 数据,统一以 $t=12$ Ma 进行重新计算并投在 Sr- $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 系统图中。从图中可以看出,花岗岩明显落入 a_1 和 a_2 两个不同的区域中(图 7a),其中 a_1 区域内花岗岩具有高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.75~0.80)和低的 Sr 含量($(10\sim80)\times 10^{-6}$),对应于部分熔融实验中无水条件下白云母脱水熔融形成的熔体。而 a_2 区域中花岗岩具有低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.72~0.75)和高的 Sr 含量($(50\sim200)\times 10^{-6}$),对应于部分熔融实验中水致部分熔融形成的熔体(图 7a)。冲巴淡色花岗岩具有高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和低 Sr 的特征,在 Sr- $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 系统图中落入无水条件下白云母脱水熔融的 a_1 区域内(图 7a),暗示其为无水条件下白云母脱水熔融的产物。

实验岩石学研究^[47,73]和理论计算^[7,85]表明,随着温压条件和含水量的变化,变泥质岩在无水或含水条件下发生从白云母到黑云母的递进部分熔融,形成性质各异、具有复杂 Rb-Sr 成分组成的花岗质熔体^[7,40,73]。在变泥质岩中,Rb 主要赋存于云母中,而 Sr 主要赋存于长石中,且云母具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 同位素组成和 Rb/Sr 比值,因此在无水条件下,白云母脱水熔融会形成具有高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、低的 Sr 含量和高的 Rb/Sr 比值的熔体^[73,76]。冲巴淡色花岗岩具有较低的 Sr、较高的 Rb 和 Rb/



(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 以 $t=12$ Ma 计算,不同地区花岗岩位置见图 1。

图 7 冲巴淡色花岗岩和喜马拉雅造山带内花岗岩的 Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (a) 和 Ba-Rb/Sr 图 (b)
Fig. 7 Sr versus (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i diagram (a) and Ba versus Rb/Sr diagram (b) of the Chongba leucogranites and other granites from Himalayan orogen

Sr 值(≥ 2.6),在 Ba-Rb/Sr 图中(图 7b),Rb/Sr 值随着 Ba 含量的增加而减少,二者呈负相关,与其他地区的淡色花岗岩具有相同的特征^[1,86-88](图 7b),且 Rb/Sr 比值随 Ba 含量变化的趋势与缺乏蒸汽相的白云母脱水熔融的趋势相吻合^[76](图 7b),与 Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 系统分析结果一致。变泥质岩部分熔融时参与熔融的矿物主要是云母和斜长石,冲巴淡色花岗岩具有强的负 Eu 异常,说明源区的斜长石残留下来,因此,部分熔融时源区主要发生白云母脱水熔融。综上所述,冲巴淡色花岗岩是 GHC 变泥质岩在无水条件下白云母脱水熔融的产物。

4.3 构造动力学意义

喜马拉雅造山带发育多种类型的花岗岩组合,它们的形成与印度-欧亚大陆碰撞之后的不同陆内构造过程相联系,反映了不同的构造背景和动力学过程。如 >35 Ma 的二云母花岗岩和淡色花岗岩其结晶时代与喜马拉雅变质岩进变质时代(45~39 Ma)^[90-91]相同,是地壳逆冲增厚条件下部分熔融的产物^[64,92],这些熔体的形成使地壳弱化,并强烈影响着与 STDS 相关的中下地壳的伸展拆离,被认为是触发 STDS 启动的重要因素。另一类为中新世(26~13 Ma)^[93]的淡色花岗岩,以大喜马拉雅淡色花岗岩为代表,其以高 Rb 低 Sr、高 Rb/Sr、(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 和低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为特征,结晶时代与喜马拉雅峰期变质时代一致,杨晓松等^[71]认为,这类淡色花岗岩与碰撞后地壳伸展导致的快速隆升和减压熔融有关,而 Harris 和 Massey^[41]则认为其形成于大喜马拉雅构

造楔的迅速折返的减压环境下。

淡色花岗岩源自含水矿物分解导致的部分熔融,而温度和压力在这一过程中是主要的控制因素。冲巴淡色花岗岩的锆石 Ti 饱和温度介于 640~750 °C^[84],这一温度低于淡色花岗岩的正常液相线温度,在缺少深部热源的证据以及剪切摩擦构造生热和地壳岩石放射性同位素衰变生热无法形成大规模岩浆作用的情况下^[49],源区岩石要发生含水矿物脱水熔融,压力减小成为部分熔融的必要条件,而 STDS 的启动不仅可以使深部压力减小,还为岩浆提供了良好的上侵通道,可能与淡色花岗岩的形成有密切关系。已有的研究表明,STDS 强烈活动的时间为 26~13 Ma^[93-94],与大喜马拉雅淡色花岗岩的结晶时间一致,且大喜马拉雅淡色花岗岩主要沿 STDS 主拆离断层分布,很好地佐证了以上结论。冲巴淡色花岗岩的地球化学特征与中新世淡色花岗岩相同,其结晶时代(约 12 Ma^[84])也与 STDS 强烈活动的时代吻合,从构造-岩浆作用综合考虑,冲巴淡色花岗岩可能形成于 STDS 启动之后的地壳伸展减薄背景下,反映了构造减压导致的深部变泥质岩中含水矿物(白云母)脱水熔融的动力学过程。

5 结论

(1)藏南冲巴淡色花岗岩为高钾钙碱性过铝质花岗岩,岩石富集大离子亲石元素 Rb 及放射性生热元素 Th 和 U,亏损高场强元素 Ba、Nb、Sr 和 Zr,

轻重稀土元素分异相对较弱,具有强烈的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.27\sim0.37$);具有较高的 Rb/Sr 比值和较低的 CaO/Na₂O 比值, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 0.763 199~0.778 799 和 -16.7~-16.3。

(2)冲巴淡色花岗岩的源岩为 GHC 变泥质岩,其形成与 STDS 的伸展拆离有关,STDS 伸展拆离导致的构造减压引发了 GHC 变泥质岩发生无水条件下的白云母脱水部分熔融。

样品前期处理方面得到北京大学地球与空间科学学院朱文萍博士的指导和帮助,地球化学数据处理得到合肥工业大学资源与环境工程学院王志强博士的指导,审稿专家提出宝贵的修改意见对提高本文质量起到重要作用,在此一并感谢。

参考文献

- [1] Guo Z F, Wilson M. The Himalayan leucogranites: Constraints on the nature of their crustal source region and geodynamic setting[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 360-376.
- [2] Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, et al. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, central Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(1): 3-19.
- [3] Lee J, Dinklage B R, Wang W S, et al. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints[J]. *Tectonics*, 2000, 19(5): 872-895.
- [4] Le Fort P. Himalayas, the collided range: Present knowledge of the continental arc[J]. *American Journal of Science*, 1975, 275: 1-44.
- [5] Searle M P, Godin L. 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*, 2003, 111(5): 505-523.
- [6] Searle M P, Parrish R R, Hodges K V. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement[J]. *Journal of Geology*, 1997, 105(5): 295-317.
- [7] Zeng L S, Gao L E, Xie K J, et al. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickening lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303(3/4): 251-266.
- [8] 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]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(1): 71-95.
- [9] Chambers J, Parrish R R, Argles T, et al. 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*, 2011, 30(2): TC2005. doi: 10.1029/2010TC002784.
- [10] Coleman M E. U-Pb constraints on Oligocene-Miocene deformation and anatexis within the Central Himalaya, Marsyandi valley, Nepal[J]. *American Journal of Science*, 1998, 298(7): 553-571.
- [11] Copeland P, Harrison T M, Le Fort P. Age and cooling history of the Manaslu granite-implications for Himalayan tectonics[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1990, 44(1/2): 33-50.
- [12] 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, Dzaka Chu section, eastern Himalaya[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29(11): 1781-1797.
- [13] Godin L, Grujic D, Law R D, et al. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: An introduction[M]//Law R D, Searle M P, Godin L. *Geological Society Special Publication*. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006, 268(1): 1-23.
- [14] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 1995, 14(3): 658-676.
- [15] Harrison T M, McKeegan K D, Le Fort P. Detection of inherited monazite in the Manaslu leucogranite by $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ion microprobe dating-crystallization age and tectonic implication[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133(3/4): 271-282.
- [16] Harrison T M, Lovera O M, Grove M. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts[J]. *Geology*, 1997, 25(10): 899-902.
- [17] Hodges K V. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 324-350.
- [18] 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]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(8): 785-808.
- [19] Larson K P, Godin L, Davis J D, et al. Out-of-sequence deformation and expansion of the Himalayan orogenic wedge: Insight from the Changgo culmination, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 2010, 29(4): 1-30.
- [20] Lee J H, Whitehouse M J. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages[J]. *Geology*, 2007, 35(1): 45-48.
- [21] 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[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 292(1/2): 1-16.
- [22] Liu X B, Liu X H, Leloup P H, et al. Ductile deformation within Upper Himalaya Crystalline Sequence and geological implications, in Nyalam area, Southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(26): 3469-3481.
- [23] Mitsuishi M, Simon R W, Aoya M, 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 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 325/326: 10-20.
- [24] Sachan H K, Kohn M J, Saxena A, et al. The Malarileucogranite, Garhwal Himalaya, northern India: Chemistry, age, and tectonic implications [J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(11/12): 1865-1876.
- [25] 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]. Journal of Geological Society, London, 2003, 160(3): 345-366.
- [26] Yan D P, Zhou M F, Robinson P T, et al. Constraining the mid-crustal channel flow beneath the Tibetan Plateau: Data from the Nielaxiongbo gneiss dome, SE Tibet[J]. International Geology Review, 2012, 54(6): 615-632.
- [27] 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[J]. Science in China: Series D, 2009, 52(8): 1046-1058.
- [28] Zeng L S, Liu J, Gao L E, et al. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(1): 104-112.
- [29] Zhang H F, Harris N, Parrish R, et al. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 228(1/2): 195-212.
- [30] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135-148.
- [31] 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[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 1961-1972.
- [32] 刘小兵, 刘小汉, Leloup P H, 等. 藏南聂拉木高喜马拉雅结晶岩系上部韧性变形年代学及地质意义[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1562-1574.
- [33] Edwards M, Harrison T. 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, 1997, 25(6): 543-546.
- [34] Murphy M A, Harrison T M. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk Valley, south Tibet[J]. Geology, 1999, 27(9): 831-834.
- [35] Schneider D, Edwards M, Kidd W, et al. Early Miocene anatexis identified in the western syntaxis, Pakistan Himalaya [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 167(3/4): 121-129.
- [36] 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[J]. Geology, 2000, 28(5): 403-406.
- [37] Kellett D A, Godin L. Pre-Miocene deformation of the Himalayan superstructure, Hidden valley, central Nepal[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166(2): 261-275.
- [38] Zhang J J, Santosh M, Wang X X, et al. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision[J]. Gondwana Research, 2012, 21(4): 939-960.
- [39] Daniel C, Vidal P, Fernandez A, et al. Isotopic study of the Manaslu granite (Himalaya, Nepal): Inferences of the age and source of Himalayan leucogranites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 96(1): 78-92.
- [40] Harris N, Inger S. Trace element modeling of pelite-derived granites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 110(1): 46-56.
- [41] Harris N, Massey J. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites[J]. Tectonics, 1994, 13(6): 1537-1546.
- [42] Guillot S, Le Fort P. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites[J]. Lithos, 1995, 35(3/4): 221-234.
- [43] Le Fort P, Cuney M, Deniel C, et al. Crustal generation of Himalayan leucogranite[J]. Tectonophysics, 1987, 134(1/2/3): 39-57.
- [44] Visonà D, Lombardo B. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal-Tibet): Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating [J]? Lithos, 2002, 62(3/4): 125-150.
- [45] Harris N, Ayres M, Massey J. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite: Implications for the extraction of Himalayan leucogranite magma[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(8): 15767-15777.
- [46] Harrison T M, Grove M, Lovera O M, et al. A model for the origin of Himalayan anatexis and inverted metamorphism [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(11): 27017-27032.
- [47] Patiño Douce A, Harris N. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. Journal of Petrology, 1998, 39(4): 689-710.
- [48] Davidson C, Grujic D E, Hollister L S, et al. Metamorphic reactions related to decompression and synkinematic intrusion of leucogranite, High Himalayan Crystallines, Bhutan[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1997, 15(5): 593-612.

- [49] Nabelek P I, Liu M. Petrologic and thermal constraints on the origin of leucogranites in collisional orogens[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 2004, 95: 73-85.
- [50] Brookfield M E. The Himalayan passive margin from Precambrian to Cretaceous[J]. Sedimentary Geology, 1993, 84 (1/2/3/4): 1-35.
- [51] 张进江. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. 地质通报, 2007, 26(6): 639-649.
- [52] 张进江, 郭磊, 张波. 北喜马拉雅穹窿带雅拉香波穹窿的构造组成和运动学特征[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 16-30.
- [53] 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 等. 馬拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系-北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3535-3544.
- [54] 郭磊, 张进江, 张波. 北喜马拉雅然巴穹窿的构造、运动学特征、年代学及演化[J]. 自然科学进展, 2008, 18(6): 640-650.
- [55] Chen Z, Liu Y, Hodges K V, et al. The Kangmar Dome: A metamorphic core complex core in southern Xizang (Tibet) [J]. Science, 1990, 250: 1552-1556.
- [56] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results[J]. Science, 1996, 274: 1684-1696.
- [57] Guillot S, Pochat S, Zakarian N, et al. Metamorphic evolution of the Kangmar dome: Implications for the internal Himalayan zones[J]. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule a-Sciences De La Terre Et Des Planetes, 1998, 327(9): 577-582.
- [58] Lee J, Hacker B, Wang Y. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(12): 2297-2316.
- [59] 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[M]// Law R D, Searle M P, Godin L. Geological Society Special Publication. Bath: The Geological Society Publishing House, 2006, 268 (1): 471-495.
- [60] Aoya M, Wallis S R, Terada K, et al. North-south extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement[J]. Geology, 2005, 33(11): 853-856.
- [61] Larson K P, Godin L. Kinematics of the Greater Himalayan sequence, Dhaulagiri Himal: Implications for the structural framework of central Nepal[J]. Journal of the Geological Society, London, 2009, 166(1): 25-43.
- [62] Wagner T, Lee J, Hacker B R, et al. Kinematics and vorticity in Kangmar Dome, southern Tibet: Testing midcrustal channel flow models for the Himalaya[J]. Tectonics, 2010, 29(6): TC6011. doi: 10.1029/2010TC002736.
- [63] King J, Harris N, Argles T, et al. Contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath southern Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123(1/2): 218-239.
- [64] Aikman A B, Harrison T M, Ding L. Evidence for early (>44 Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274(1/2): 14-23.
- [65] Chakungal J. 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]. Halifax: Dalhousie University, 2006: 169.
- [66] 濮巍, 赵葵东, 凌洪飞, 等. 新一代高精度高灵敏度的热电离质谱仪 (Triton TI) 的 Nd 同位素测定[J]. 地球学报, 2004, 25(2): 271-374.
- [67] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process[J]. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [68] Steiger R H, Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977, 36(3): 359-362.
- [69] Lugmair G W, Harti K. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 39(3): 349-357.
- [70] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. Chemistry Geology, 1999, 157(1/2): 119-146.
- [71] 杨晓松, 金振民, Huenges E, 等. 高喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 246-250.
- [72] 杨晓松, 金振民. 西藏亚东淡色花岗岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素研究: 关于其年龄和源岩的证据[J]. 地质评论, 2001, 47 (3): 294-300.
- [73] Knesel K M, Davidson J P. Insights into collisional magmatism from isotopic fingerprints of melting reactions[J]. Science, 2002, 296: 2206-2208.
- [74] Stern C R, Kligfield R, Schelling D, et al. The Bhagirathi leucogranite of the High Himalaya (Garhwal, India): Age, petrogenesis and tectonic implications[J]. Geological Society of America Special Papers, 1989, 232: 33-45.
- [75] Scaillet B, France-Lanord C, Le Fort P. Badrinath-Gangotri plutons (Garhwal, India): Petrological and geochemical evi-

- dence for fractionation processes in a High Himalayan leucogranite[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1990, 44(1/2): 163-188.
- [76] Inger S, Harris N. Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya [J]. Journal of Petrology, 1993, 34(2): 345-368.
- [77] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1989: 1-535.
- [78] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45(1/2/3/4): 29-44.
- [79] Taylor S R, Mcleannan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1-312.
- [80] Ahmad T, Harris N, Bickle M, et al. Isotopic constraints on the structural relationships between the Lesser Himalayan Series and the High Himalayan Crystalline Series, Garhwal Himalaya[J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(3): 467-477.
- [81] Miller C, Thoni M, Frank W, et al. The early Paleozoic magmatic event in the Northwest Himalaya, India: Source, tectonic setting and age of emplacement[J]. Geological Magazine, 2001, 138(3): 237-251.
- [82] Richards A, Argles T, Harris N, et al. Himalayan architecture constrained by isotopic tracers from clastic sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 236(3/4): 773-796.
- [83] Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, et al. Geologic and U-Th-Pb geochronology evidence for early Paleozoic tectonism in the Kathmandu thrust sheet, central Nepal Himalaya [J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(1/2): 185-198.
- [84] Kellett D A, Grujic D, Erdmann S. Miocene structural reorganization of the South Tibetan detachment, eastern Himalaya: Implications for continental collision [J]. Lithosphere, 2009, 1(5): 259-281.
- [85] Zeng L S, Asimow P, Saleeby J B. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(4): 3671-3682.
- [86] 张宏飞, Harris N, Parrish R, 等. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比、岩石成因及构造意义[J]. 地球科学, 2005, 30(3): 275-288.
- [87] 张金阳, 廖群安, 李德威, 等. 藏南萨迦拉轨岗日淡色花岗岩特征及与变质核杂岩的关系[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(6): 695-700.
- [88] 曾令森, 刘静, 高利娥, 等. 藏南也拉香波穹窿早渐新世地壳深熔作用及其地质意义[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 373-381.
- [89] Gao L E, Zeng L S. 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, 2014, 130: 136-155.
- [90] Catlos E J, Harrison T M, Manning C E, et al. Records of the evolution of the Himalayan orogeny from in situ Th-Pb ion microprobe dating of monazite: Eastern Nepal and western Garhwal[J]. Journal of Asian Earth Science, 2002, 20(5): 459-479.
- [91] 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[J]. Tectonics, 2009, 28: TC1002. doi: 10.1029/2008TC002256.
- [92] Zeng L S, Saleeby J B, Asimow P. Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: A record from the Goat Ranch migmatite complex, southern Sierra Nevada batholith, California [J]. Geology, 2005, 33(1): 53-56.
- [93] 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 1-36.
- [94] 王晓先, 张进江, 刘江, 等. 中新世中期喜马拉雅造山带构造体制的转换[J]. 科学通报, 2012, 57(33): 3162-3172.