



淡色花岗岩岩石化学特征及蚌埠淡色花岗岩

郭素淑, 李曙光*

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: lsg@ustc.edu.cn

2009-02-13 收稿, 2009-03-25 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 40634023)

摘要 淡色花岗岩具有相对窄的 SiO_2 变化范围(70.5%~75.5%), 且相同 SiO_2 时淡色花岗岩具有相对高的 Al_2O_3 (>13.5%) 含量和相对低的 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 含量(<2.5%). 这些岩石化学特征反映了淡色花岗岩较普通花岗岩具有较低的熔融温度和较少分离结晶作用影响. 据此, 提出有效区别淡色花岗岩与普通花岗岩的 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 判别图. 本文报道了蚌埠地区荆山-涂山-蚂蚁山侏罗纪花岗岩侵入体的主要元素组成, 并通过对比其与高喜马拉雅淡色花岗岩的矿物学和岩石化学特征, 判定蚌埠荆山-涂山-蚂蚁山岩体为一淡色花岗岩带. 蚌埠淡色花岗岩的 $\text{Mg}^\#$ 值较低, 与高喜马拉雅淡色花岗岩类似, 指示其源区为华南俯冲陆壳在地壳深度、低温脱水熔融的成因.

关键词

淡色花岗岩

岩石化学

高喜马拉雅淡色花岗岩

蚌埠淡色花岗岩

淡色花岗岩是大陆碰撞过程中地壳低比例部分熔融的一种少含暗色矿物, 主要由石英和碱性长石组成, 因而颜色浅淡的特殊花岗岩类. 关于它的岩石及地球化学特征最近已有文评述^[1]. 淡色花岗岩是碰撞造山带陆壳物质脱水低比例熔融产物, 因此它在研究碰撞造山过程中有特殊意义. 喜马拉雅造山带的淡色花岗岩十分发育, 并得到地质界的广泛关注和研究^[2~17]. 喜马拉雅造山带的淡色花岗岩主要发育在高喜马拉雅结晶岩系内^[17], 并被推测为折返(或塑性挤出)的印度俯冲板片(高喜马拉雅岩系)在壳内熔融的产物. 因此, 淡色花岗岩可用来示踪和探讨大陆碰撞过程中俯冲陆壳物质的运动及部分熔融的发生.

然而, 除喜马拉雅造山带范围内广泛发现淡色花岗岩外, 世界上其他碰撞造山带地区只有极少数淡色花岗岩的报道^[18~24]. 这可能与过去缺少明确区分淡色花岗岩和普通花岗岩的岩石化学指标、因而一些淡色花岗岩未能鉴别出来有关. 如本文报道的蚌埠淡色花岗岩以前被定名为“混合花岗岩”. 可见, 寻找正确有效地鉴别淡色花岗岩的岩石化学指标是十分必要的. 在总结大量花岗岩主要元素实验数据的

基础上, 本文提出鉴别淡色花岗岩与普通花岗岩的 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 判别图, 并依据淡色花岗岩与一般花岗岩的主要区别标志对淡色花岗岩的成因意义做了简要探讨.

秦岭-大别造山带是华北和华南陆块碰撞形成的造山带, 前人未曾报道与该碰撞造山过程相关的淡色花岗岩. 本文报道了华北陆块南缘蚌埠隆起地区荆山-涂山-蚂蚁山岩体的矿物学组成特征和主要元素组成, 并将其与已发表的高喜马拉雅淡色花岗岩进行对比, 认为二者各项特点十分相似, 荆山-涂山-蚂蚁山岩体应为一淡色花岗岩带, 可称之为蚌埠淡色花岗岩带. 本文还进一步探讨了该蚌埠淡色花岗岩带的成因与华北和华南陆块碰撞过程的关系.

1 蚌埠淡色花岗岩带地质背景

蚌埠隆起位于华北陆块的东南部边缘, 东临郯庐断裂带, 南临大别造山带北部的合肥盆地, 总体呈东西向带状展布(图 1). 蚌埠隆起广泛出露太古代五河群变质基底岩石. 锆石 U-Pb 年代学研究表明五河群杂岩经历过早元古代(18~19 亿年)麻粒岩相变质作用^[25,26]. 荆山、涂山和蚂蚁山花岗岩体自西向东侵位

引用格式: 郭素淑, 李曙光. 淡色花岗岩岩石化学特征及蚌埠淡色花岗岩. 科学通报, 2009, 54(8): 1111~1116

Guo S S, Li S G. Petrochemical characteristics of leucogranite and a case study of Bengbu leucogranites. Chinese Sci Bull, 2009, 54(11): 1923–1930, doi: 10.1007/s11434-009-0355-4

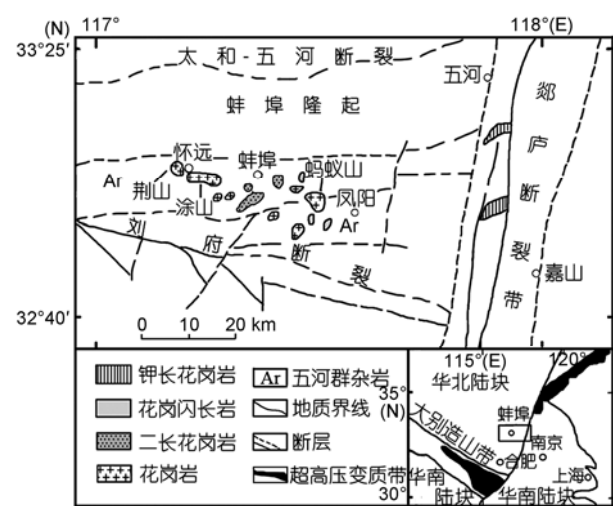


图 1 蚌埠地区地质简图
据文献[25]修改

于五河群变质杂岩中. 3 个岩体在岩性上类似, 都是含石榴子石花岗岩. 荆山岩体的锆石 U-Pb 年代学研究表明它们为晚侏罗世花岗岩侵入体[27].

荆山岩体位于安徽省蚌埠市西郊的怀远县, 蚌埠隆起的西部. 岩体露头呈近等轴的椭圆形, 侵入的围岩为五河群变质杂岩, 岩体内发育有闪长质岩脉、花岗斑岩脉(斑晶为钾长石, 直径 0.5~2.5 cm), 和辉绿岩脉. 围绕岩体露头采集了 9 个岩石样品, 采样点坐标列于表 1 中. 岩石手标本为灰白色, 块状构造, 略具片麻状, 中粗粒-中细粒花岗结构, 岩性为含石榴子石黑云母淡色花岗岩.

涂山岩体位于荆山岩体东邻, 与荆山岩体仅为淮河相隔. 涂山岩体呈东西向展布的长条形, 亦侵入五河群杂岩. 其岩性与荆山岩体类似, 为含石榴子石花岗岩. 在岩体西南露头的山脚至山顶部位连续采

表 1 荆山-涂山-蚂蚁山淡色花岗岩主要元素组成(wt%)^{a)}

地理位置	32°57'13"N 117°11'8.5"E			32°57'9.4"N 117°11'7.4"E			32°57'16.7"N 117°10'53.1"E		
样品编号	06JS-4	06JS-5	06JS-6	06JS-8	06JS-9	06JS-10	06JS-11	06JS-13	06JS-14
SiO ₂	73.40	73.94	74.22	73.56	74.96	74.52	75.04	74.16	74.62
Al ₂ O ₃	14.09	14.25	14.64	14.32	13.71	13.86	13.97	14.24	14.04
TiO ₂	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.02	0.07	0.02
Fe ₂ O ₃	0.60	0.32	0.32	0.61	0.32	0.42	0.30	0.40	0.53
FeO	0.43	0.43	0.24	0.17	0.36	0.46	0.29	0.50	0.17
CaO	1.47	1.35	1.30	1.60	1.35	1.32	1.35	1.39	1.01
MgO	0.10	0.11	0.09	0.11	0.16	0.10	0.06	0.15	0.05
K ₂ O	4.35	3.98	3.69	4.03	4.10	4.03	4.13	3.84	3.68
Na ₂ O	4.11	4.25	4.33	4.41	4.03	4.09	4.34	4.25	4.93
MnO	0.042	0.072	0.025	0.058	0.036	0.058	0.088	0.032	0.018
P ₂ O ₅	0.06	0.15	0.06	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.02
灼失量	0.81	0.59	0.57	0.68	0.45	0.75	0.68	0.75	0.57
总和	99.29	99.27	99.32	99.50	99.43	99.49	100.11	99.57	99.49
σ	2.35	2.19	2.06	2.33	2.07	2.09	2.24	2.10	2.34
ASI	1.00	1.05	1.09	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.01
Mg [#]	15.5	21.5	23.3	21.4	30.6	17.5	16.0	23.7	12.1

地理位置	32°56'4.5"N 117°12'53.6"E		32°56'06"N 117°12'55.1"E		32°53'38.8"N 117°31'26.9"E		32°53'39.7"N 117°31'19.1"E	
样品编号	06TS-2	06TS-3	06TS-4	06TS-5	06MYS-1	06MYS-2	06MYS-3	06MYS-4
SiO ₂	74.56	74.76	75.14	75.08	74.50	75.44	75.22	74.04
Al ₂ O ₃	14.20	13.94	14.04	13.73	14.95	13.58	13.41	14.49
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.01	0.05	0.02	0.04	0.05
Fe ₂ O ₃	0.00	0.20	0.12	0.02	0.16	0.39	0.17	0.37
FeO	0.22	0.26	0.20	0.57	0.07	0.24	0.24	0.17
CaO	1.39	1.34	1.47	1.43	0.55	0.76	0.80	1.18
MgO	0.08	0.07	0.07	0.08	0.04	0.06	0.06	0.08
K ₂ O	4.10	3.50	3.90	4.25	2.94	4.48	4.90	3.81
Na ₂ O	4.10	4.94	4.22	3.94	6.70	3.88	3.50	4.33
MnO	0.019	0.128	0.035	0.023	0.017	0.059	0.025	0.027
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00	0.03
灼失量	0.46	0.73	0.55	0.50	0.76	0.85	0.86	0.88
总和	99.09	99.62	99.62	99.54	100.36	99.46	98.95	98.98
σ	2.13	2.24	2.05	2.09	2.95	2.15	2.19	2.13
ASI	1.04	0.97	1.02	1.01	0.98	1.08	1.07	1.08
Mg [#]	-	22.1	28.8	19.5	25.0	15.3	21.4	22.1

a) $\sigma = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43) \text{ wt\%}$; $ASI = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O - 1.67 \times P_2O_5)$ 分子比值; $Mg^{\#} = MgO / (MgO + TFeO)$ 分子比值

集了 4 个岩石样品, 采样点坐标列于表 1 中。

蚂蚁山岩体位于安徽省凤阳县门台镇附近, 岩体露头呈不规则的椭圆状, 侵入的围岩为五河群杂岩。样品为含石榴子石花岗岩, 粒度较荆山、涂山岩体略粗, 为中粗粒花岗结构。于岩体不同部位采集了 4 个岩石样品, 采样点坐标列于表 1 中。

2 岩石学主要特征

据显微镜下岩石薄片观察, 荆山花岗岩主要矿物组合为斜长石(35%~40%)、钾长石(25%~32%)、石英(~30%)、少量暗色矿物黑云母(1%~3%)、暗红色石榴子石(<1%), 以及副矿物锆石、磷灰石和不透明矿物磁铁矿(<1%)。涂山、蚂蚁山花岗岩的矿物组合与荆山花岗岩相似, 但暗色矿物含量较荆山花岗岩少。

荆山(06JS-)、涂山(06TS-)、蚂蚁山(06MYS-)岩体共 17 个样品的主要元素组成由河北省区域地质矿产研究所廊坊实验室分析获得, 其中 FeO 含量用滴定法获得。所有样品的主要元素组成列于表 1。分析结果表明, 3 个岩体主量元素含量基本一致且在很小的区间内变化, 具有富 SiO_2 (73.40%~75.44%), Al_2O_3 (13.41%~14.95%), 总碱量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)高(8.02%~8.61%), 低 CaO ($\leq 1.60\%$), MgO ($\leq 0.16\%$), $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ ($\leq 1.03\%$)和 Ti ($\text{TiO}_2 \leq 0.07\%$)的特点。Mg# 不高(12.1~30.6), 表明花岗岩熔体未曾与地幔相互作用。

上述矿物学组成与岩石化学指标与已报道的高喜马拉雅淡色花岗岩非常类似, 据此判断蚌埠花岗岩有可能是一种淡色花岗岩。

3 淡色花岗岩岩石化学判别图

但仅仅依靠矿物学组成和某几个单一氧化物

含量还不能很好地区别淡色花岗岩和一般花岗岩, 因为二者各项指标均有一定范围, 重叠的情况很普遍。为了有效地区分普通花岗岩和淡色花岗岩, 笔者提出 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 判别图(图 2)。

从文献中搜集了秦岭-大巴山、大别山、华北和南岭地区的花岗岩主要元素组成数据 286 个^[28~41], 它们包括 I、S、A 各种类型花岗岩, 但没有淡色花岗岩, 以便观察普通花岗岩的共性。淡色花岗岩的主要元素组成数据共 94 个, 除 8 个石榴子石型淡色花岗岩样品产于纳米比亚和印度境内的挤压背景下, 其余均来自被很好研究的喜马拉雅山高喜马拉雅地区。这些样品的主要元素数据被投影到 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 判别图中(图 2)。由图 2 可见, 普通花岗岩的 SiO_2 范围很宽, 在 70%~80% 的区间变化, 并在 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 图上呈显著的负相关趋势。这种负相关趋势指示了贫硅-富铁镁暗色矿物分离结晶作用对花岗岩浆组成演化的控制作用, 并产生了高 SiO_2 ($>76\%$)花岗岩。而高喜马拉雅淡色花岗岩的 SiO_2 含量变化则小得多, 其 SiO_2 含量大于 70.5%, 小于 75.5%, 反映淡色花岗岩浆的贫硅-富铁镁暗色矿物分离结晶作用不显著, 它在 Al_2O_3 - SiO_2 图上显示在较小 SiO_2 变化范围(70.5%~75.5%)内具较高斜率的负相关趋势, 这可能与斜长石含量变化有关。值得注意的是, 虽然淡色花岗岩与普通花岗岩的 Al_2O_3 含量和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 含量均有较大变化范围和一定重叠, 但在相同 SiO_2 的情况下, 淡色花岗岩的 Al_2O_3 含量显著高于普通花岗岩, 而 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 含量显著低于普通花岗岩, 从而在 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 图上淡色花岗岩形成不同于普通花岗岩的演化趋势(图 2)。这说明淡色花岗岩的初始岩浆是一

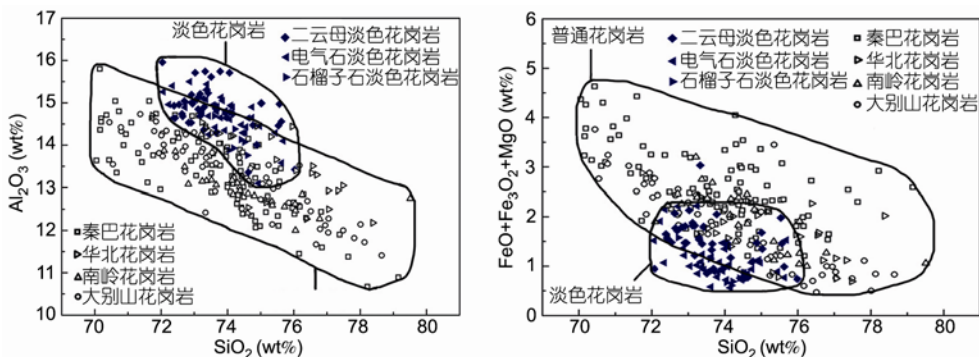


图 2 淡色花岗岩和普通花岗岩的 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 判别图

数据来自文献^[3,6,7,9,11,13,21,24,28~41]。标示两类花岗岩分布范围的曲线依据绝大多数数据勾画, 个别数据落在范围之外可能是分析或岩石定名误差所致

种不同于普通花岗岩的富 Al_2O_3 、贫 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 岩浆。高喜马拉雅淡色花岗岩的岩石研究表明,其岩浆是变泥质岩石经黑(白)云母脱水熔融形成,其熔融温度较低($T \leq 727^\circ\text{C}$)^[7,42]。尽管根据源区性质(变沉积岩),高喜马拉雅淡色花岗岩应属于S型花岗岩,但是它较普通S型花岗岩更富 Al_2O_3 、贫 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 的特征说明淡色花岗岩与普通花岗岩的差异主要不是反映了源区性质的差异,而是熔融条件的差异。低温脱水熔融的较低熔融温度有可能是造成淡色花岗岩更富 Al_2O_3 、贫 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ 特征的主要原因。如果这一解释是正确的话,则淡色花岗岩和普通花岗岩在 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 图上形成不同的演化趋势实质反映了两类花岗岩成因上的差异。因此,图2可以用做这两类不同成因花岗岩浆的判别图。需要指出的是在应用此判别图时要对被判别岩体做系统的采样分析以避免个别样品的随机性偏离。

将本文报道的蚌埠淡色花岗岩主要元素数据投入 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 图中,清楚地显示蚌埠侏罗纪花岗岩落入高喜马拉雅淡色花岗岩范围内,并在 Al_2O_3 - SiO_2 图中显示与高喜马拉雅淡色花岗岩相似的高斜率负相关趋势(图3),这表明应用 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 岩石化学判别图并结合岩石的矿物组成,可以很好地证明荆山、涂山和蚂蚁山侵入体是淡色花岗岩,它们在蚌埠隆起构成一淡色花岗岩带。

4 蚌埠淡色花岗岩带厘定的地质意义

已有工作证明蚌埠花岗岩含有的继承锆石年龄为~750和~230 Ma^[27],与大别山超高压变质岩的原岩年龄和变质年龄一致^[43,44],也与华南俯冲陆壳部

分熔融成因的大别山花岗岩所含继承锆石一致^[45]。这表明蚌埠淡色花岗岩的源区是经过三叠纪变质的华南俯冲陆壳并在晚侏罗世就位于华北陆块之下^[27]。探讨华南俯冲陆壳是如何运移到位于华北陆块内部的蚌埠地区深部则是一个令人感兴趣的科学问题。参考青藏高原陆壳增厚机制研究所提出的模型,华南俯冲陆壳运移到蚌埠地区深部有两种可能方式:(1)通过平俯冲,华南俯冲陆壳板底垫托于华北陆块南缘岩石圈之下^[46];(2)华南俯冲陆壳被注入到华北陆块南缘的下地壳中^[47,48]。“板底垫托”模式要求华南俯冲陆壳沿华北岩石圈地幔底部平俯冲,它受地幔加热发生高温部分熔融产生埃达克岩浆或普通花岗岩浆而不是淡色花岗岩浆^[49],并且该岩浆上升时要与通过的岩石圈地幔发生相互作用从而具有高 $\text{Mg}^\#$ 特征^[46,50]。与此相反,“注入地壳”模式的部分熔融所需热能主要来自地壳运动的剪切加热(shear heating)^[51],熔融温度低,且岩浆上升过程中不会与地幔发生相互作用。因此,岩浆熔融温度和 $\text{Mg}^\#$ 值是判断蚌埠淡色花岗岩的源区(华南俯冲陆壳)在侏罗纪深部产状的主要依据。

前已述淡色花岗岩的岩石化学特征反映了它们的脱水低温熔融特征。此外,低 $\text{Mg}^\#$ 也是淡色花岗岩的固有性质,例如,尽管高喜马拉雅淡色花岗岩的 $\text{Mg}^\#$ 显示较宽的变化范围,但均低于46,主体集中在35以下(图4)。蚌埠淡色花岗岩也具有低 $\text{Mg}^\#$ 的特点,除一个样品稍高外(30.6),其余均小于30(图4)。如果高喜马拉雅淡色花岗岩被认为是折返的印度俯冲板片在壳内熔融的产物,而具有与之类似甚至更低 $\text{Mg}^\#$ 的蚌埠淡色花岗岩无疑也是壳内熔融的结果,那

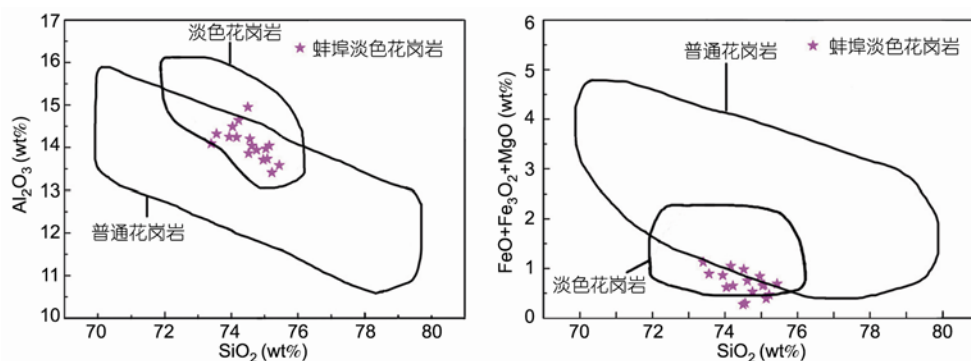


图3 蚌埠淡色花岗岩的 Al_2O_3 - SiO_2 和 $\text{TFeO}+\text{MgO}$ - SiO_2 岩石化学判别图

图中显示蚌埠花岗岩绝大多数样品落入淡色花岗岩区

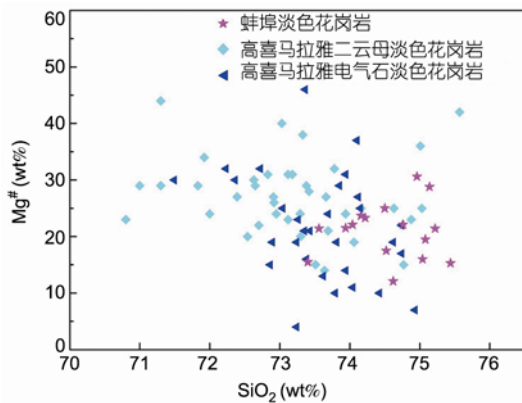


图4 蚌埠淡色花岗岩与高喜马拉雅淡色花岗岩的 $Mg^{\#}$ - SiO_2 图

它们均具有低 $Mg^{\#}$ 值。数据来自文献[3,6,7,9,11,13]

么, 华南俯冲陆壳就不可能是底垫(underplating)的方式深俯冲到华北板块之下, 较有可能是以注入进华

北下地壳(injection)的方式导致华北陆块南缘地壳增厚。

5 结论

(1) 蚌埠荆山-涂山-蚂蚁山晚侏罗世侵入体为淡色花岗岩, 它们构成华北陆块南缘一淡色花岗岩带。

(2) 淡色花岗岩的 SiO_2 变化范围较小(70.5%~75.5%)。在给定 SiO_2 时, 淡色花岗岩较普通花岗岩有较高的 Al_2O_3 和较低的 $TFeO+MgO$ 含量, 这可能反映了其脱水低温熔融条件。利用 Al_2O_3 - SiO_2 和 $TFeO+MgO$ - SiO_2 判别图可有效区别淡色花岗岩与普通花岗岩。

(3) 蚌埠淡色花岗岩的源区是在大陆碰撞过程中注入到华北下地壳内的华南俯冲陆壳。这一华南俯冲陆壳向华北地壳内的注入过程是导致华北陆块南缘中生代地壳增厚的主要机制。

致谢 感谢刘贻灿教授对野外工作的全程参与。

参考文献

- 郭素淑, 李曙光. 淡色花岗岩的岩石学和地球化学特征及其成因. 地学前缘, 2007, 14(6): 290—298
- Le Fort P, Cuney C, Deniel C, et al. Crustal generation of the Himalayan leucogranites. Tectonophysics, 1987, 134(1-3): 39—57[doi]
- Debon F, Le Fort P, Sheppard S M F, et al. The four pluton belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic, and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section. J Petrol, 1986, 27(1): 219—250
- Guillot S, Le Fort P. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites. Lithos, 1995, 35(3-4): 221—234[doi]
- Harrison T M, Ryerson F J, Le Fort P, et al. A Late Miocene-Pliocene origin for the central Himalayan inverted metamorphism. Earth Planet Sci Lett, 1997, 146(1-2): E1—E7[doi]
- Barbey P, Brouand M, Le Fort P, et al. Granite-migmatite genetic link: The example of the Manaslu granite and Tibetan slab migmatites in central Nepal. Lithos, 1996, 38(1-2): 63—79[doi]
- Visonà D, Lombardo B. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal-Tibet). Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating? Lithos, 2002, 62(3-4): 125—250[doi]
- Inger S, Harris N B W. Tectonothermal evolution of the High Himalayan Crystalline Sequence, Langtang Valley, northern Nepal. J Metamorph Geol, 1992, 10(3): 439—452[doi]
- Inger S, Harris N. Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. J Petrol, 1993, 34(2): 345—368
- Harris N, Ayres M, Massey J. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite: Implications for the extraction of Himalayan leucogranite magmas. Geophys Res, 1995, 100(B8): 15767—15777[doi]
- Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, et al. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement. J Geol, 1997, 105(3): 295—317
- 张金阳, 廖群安, 李德威. 西藏定结地区高喜马拉雅淡色花岗岩的地球化学特征与岩浆源区研究. 地质科技情报, 2003, 22(3): 9—14
- Ayres M, Harris N. Rec fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: Constraints from Himalayan leucogranites. Chem Geol, 1997, 139(1-4): 249—269[doi]
- Scailliet B, France-Lanord C, Le Fort P. Badrinath-Gangotri plutons (Garhwal, India): Petrological and geochemical evidence for fractionation processes in a high Himalayan leucogranite. J Volcan Geothermal Res, 1990, 44(1-2): 163—188[doi]
- 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. 地质论评, 2001, 47(3): 294—300
- 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. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(6): 695—701
- 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、岩石成因及其构造意义. 地球科学——中国地质

- 大学学报, 2005, 30(3): 275—288
- 18 陈斌, 翟明国, 邵济安. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(11): 898—907
 - 19 Nabelek P I, Russ-Nabelek C, Denison J R. The generation and crystallization conditions of the Proterozoic Harney Peak leucogranite, Black Hills, South Dakota, USA: petrologic and geochemical constraints. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 110(2-3): 173—191[[doi](#)]
 - 20 Nabelek P I, Bartlett C D. Petrologic and geochemical links between the post-collisional Proterozoic Harney Peak leucogranite, South Dakota, USA, and its source rocks. *Lithos*, 1998, 45(1-4): 71—85[[doi](#)]
 - 21 van de Fliedert T, Jung S, Masberg P, et al. Lower crustal melting and the role of open-system processes in the genesis of syn-orogenic quartz diorite-granite-leucogranite associations: Constraints from Sr-Nd-O isotopes from the Bandombaai complex, Namibia. *Lithos*, 2003, 67(3-4): 205—226[[doi](#)]
 - 22 Pressley R A, Brown M. The Phillips Pluton, Maine, USA: Evidence of heterogeneous crustal sources and implications for granite ascent and emplacement mechanisms in convergent orogens. *Lithos*, 1999, 46(3): 335—366[[doi](#)]
 - 23 Solar G S, Brown M. Petrogenesis of migmatites in Maine, USA: Possible source of prealuminous leucogranite in plutons? *J Petrol*, 2001, 42(4): 789—823[[doi](#)]
 - 24 Braun I, Raith M, Ravinera Kumar G R. Dehydration-melting phenomena in Leptynitic gneisses and the generation of leucogranites: A case study from the Kerala Khondalite belt, Southern India. *J Petrol*, 1996, 37(6): 1285—1305[[doi](#)]
 - 25 郭素淑, 李曙光. 华北克拉通东南缘古元古代变质和岩浆事件的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(5)
 - 26 Liu Y C, Wang A D, Rolfo F, et al. Geochronological and petrological constraints on Palaeoproterozoic granulite facies metamorphism in southeastern margin of the North China Craton. *J Metamorph Geol*, 2009, 27(2): 125—138[[doi](#)]
 - 27 许文良, 王清海, 杨德彬, 等. 蚌埠荆山“混合花岗岩” SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(5): 423—428
 - 28 尚瑞钧, 严阵, 等. 秦巴花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998
 - 29 钱春起, 路玉林, 刘丽利. 大别山超高压变质带燕山期花岗岩地球化学特征及成因探讨. 中国地质, 2004, 31(2): 147—154
 - 30 Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 2002, 186(3-4): 281—299[[doi](#)]
 - 31 Xu H J, Ma C Q, Ye K. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. *Chem Geol*, 2007, 240(3-4): 238—259
 - 32 徐小军, 赵子福, 郑永飞, 等. 大别造山带天柱山燕山期中酸性岩浆岩元素和同位素地球化学研究. 岩石学报, 2005, 21(3): 607—622
 - 33 马昌前, 杨坤光, 许长海, 等. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理. 岩石学报, 1999, 15(3): 379—395
 - 34 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(9): 817—827
 - 35 Chen B, Jahn Bor-ming, Wei C J. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex. *Lithos*, 2002, 60(1-2): 67—88[[doi](#)]
 - 36 Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, et al. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231(3): 214—235[[doi](#)]
 - 37 齐瑞荣, 黄增保, 金霞. 甘肃北山大石山 A 型花岗岩体的地球化学特征及构造意义. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(2): 90—96
 - 38 许保良, 阎国翰, 徐振邦, 等. 冀北燕山期三个系列花岗岩类岩石的地球化学特征及其成因学意义. 岩石学报, 1999, 15(2): 208—216
 - 39 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 南岭西段花山-姑婆山 A 型花岗岩类杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因. 地质学报, 2006, 80(4): 529—542
 - 40 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的地球化学及成因研究. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(2): 97—109
 - 41 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石冈岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩. 地质学报, 2005, 79(4): 503—514
 - 42 Montel J M. A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of granitic magmas. *Chem Geol*, 1993, 110(1-3): 127—146[[doi](#)]
 - 43 Li S G, Xiao Y L, Liu D L, et al. Collision of the North China and Yangtz Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109(1-4): 89—111[[doi](#)]
 - 44 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53(18): 2129—2152
 - 45 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 2007, 93(3-4): 248—272[[doi](#)]
 - 46 Chemenda A I, Burg J P, Mattauer M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: Geopoe based on new modeling, geological and geophysical data. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 174: 397—409[[doi](#)]
 - 47 Westaway R. Crustal volume balance during the India-Eurasia collision and altitude of the Tibetan plateau: A working hypothesis. *J Geophys Res*, 1995, 100(B8): 15173—15192[[doi](#)]
 - 48 Zhao W L, Morgan W J. Uplift of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 1985, 4(4): 359—369[[doi](#)]
 - 49 Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Sci Rev*, 2005, 68(3-4): 173—196[[doi](#)]
 - 50 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem Geol*, 1999, 160(4): 335—356[[doi](#)]
 - 51 Harrison T M, Lovera O M, Grove M. New insights into the origin of two contrasting Himalayan granite belts. *Geology*, 1997, 25(10): 899—902[[doi](#)]