

# 甘肃康县阳坝岩体岩石成因及壳-幔相互作用

秦江锋, 赖绍聪, 白莉

(西北大学地质学系, 陕西西安710069)

[摘要] 出露于甘肃康县南部阳坝镇一带的阳坝岩体具有典型的岩浆混合特征, 岩体中暗色微粒包体发育, 主要类型为暗色细粒-微粒闪长质及石英闪长质岩浆包体, 岩浆包体与寄主岩石界限清晰。岩浆包体具淬火结构: 角闪石呈长柱状, 黑云母呈长条片状, 磷灰石呈针状, 包体中出现石英颗粒集合体及发育熔蚀环的斜长石捕虏晶。岩石学、地球化学研究表明, 微粒闪长质包体的 $(La/Yb)_N$ 、 $Rb/Sr$  值都比寄主岩石高, 且亏损程度更大, 包体和寄主岩石的 $Mg^\#$ 高(寄主岩石 $Mg^\# = 50.8 \sim 54.5$ , 暗色包体 $Mg^\# = 55.6 \sim 60.1$ )。结合岩相学特征可以认为, 暗色微粒包体可能是幔源的高温偏基性岩浆侵入到花岗岩闪长质岩浆中淬火结晶的产物, 在此过程中, 花岗岩浆受到幔源物质混染, 表明在中三叠世, 扬子板块西北缘曾发生壳-幔混合作用。

[关键词] 阳坝岩体; 中三叠世; 岩浆混合; 壳-幔相互作用; 地壳增生; 甘肃省

[中图分类号] P588.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)02-0014-08

## Petrogenesis and Crust Mantle Interaction of Mid Triassic Yangba Pluton from Kangxian in Gansu Province

QIN Jiang feng, LAI Shao cong, BAI Li

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

**Abstract** The Yangba granodiorite pluton, located in Yangba Town, southern Kangxian, Gansu Province, NW China, presents the typical geological and petrographical features of mixing of two different magmas in composition. Melanocratic magmatic enclaves are well developed in the pluton. They are mainly fine grained or microgranular diorites and quartz diorites, and have clear contact border with host rocks. Some features suggest that the magmatic enclaves have quenched rim texture; long pillared hornblende; long sheeted biotite; acicular apatite; corrosion borders of plagioclase xenocrysts and quartz aggregates in the enclaves. The detailed studies of petrology and geochemistry conclude that the microgranular enclaves are characterized by higher  $(La/Yb)_N$  ( $32.82 \sim 51.78$ ), higher  $Rb/Sr$  ( $0.11 \sim 0.27$ ) and lower  $\delta(Eu)$  ( $0.75 \sim 0.84$ ) than host rock ( $(La/Yb)_N = 22.18 \sim 29.51$ ,  $Rb/Sr = 0.085 \sim 0.107$ ,  $\delta(Eu) = 0.84 \sim 0.89$ ). Hence, it is impossible to regard the microgranular enclaves as refractory residue. The high  $Mg^\#$  of both enclave and host rock (enclave  $Mg^\# = 55.6 \sim 60.1$ , host rock  $Mg^\# = 50.8 \sim 54.5$ ) suggest that the microgranular enclaves are mantle derived and host rocks are lower crust melts which are contaminated by mantle source materials. Combining with petrographical evidence, it can be inferred that the microgranular enclaves are the products of quenching and crystallization of hot, mantle derived mafic magma intruding granodiorite magma chamber. Therefore the hybrid petrogenesis of Yangba pluton suggests an important crust mantle interaction and crust vertical growth of northwestern Yangtze Plate during Mid Triassic.

**Key words:** Yangba Pluton; Mid Triassic; magmatic mixing; crust mantle interaction; crust growth; Gansu Province

[收稿日期] 2005 06 28

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(40234041); 西北大学地质学系国家基础科学人才培养基地创新基金项目(XDCX03 04)

[作者简介] 秦江锋(1982-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 从事岩石学研究。

0 引言

花岗岩是大陆地壳有别于大洋地壳最重要的物质组成标志, 对研究大陆地壳的生长与演化有重要意义。近年来, 壳幔相互作用在花岗岩形成及大陆地壳生长中的意义越来越引起人们的注意。壳-幔相互作用有多种方式, 岩浆混合作用是其中重要的一种, 因此, 将岩浆混合成因的花岗岩类岩石及其端元组分当作壳-幔深部过程的探针加以研究, 对于理解壳-幔相互作用及大陆地壳的生长地质问题有重要意义<sup>[1]</sup>。

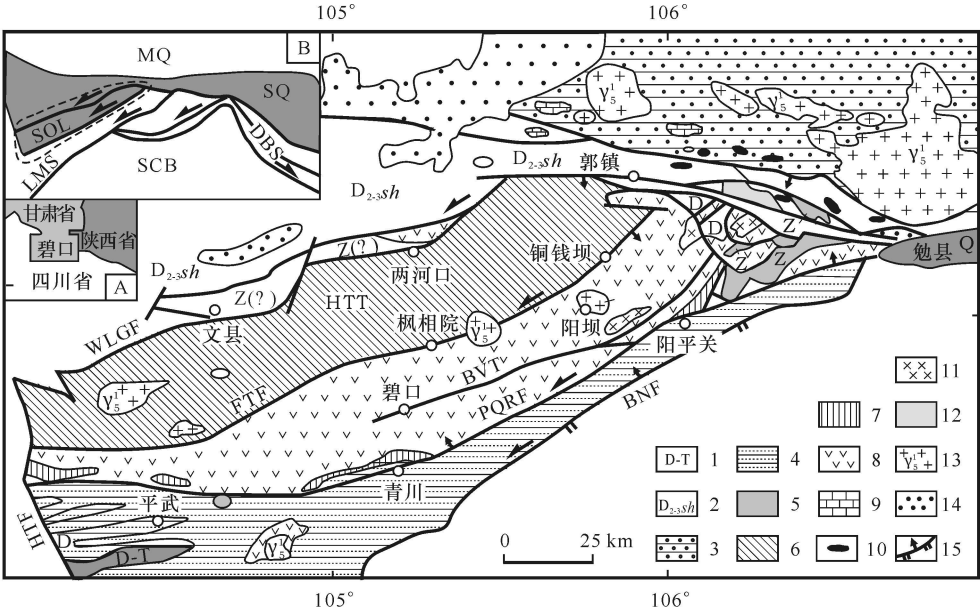
阳坝岩体是印支期侵位于碧口地体中部的小岩体(图 1)<sup>[2]</sup>, 岩体中有大量暗色微粒包体, 具有明显的岩浆混合特征。笔者通过对阳坝岩体中广泛发育的暗色微粒包体的研究, 探讨扬子板块西北缘中生代大地构造演化和壳-幔相互作用。

1 地质-岩石学特征

阳坝岩体位于甘肃省康县南部阳坝镇一带(E 105°45', N 33°0'), 岩体呈浑圆形, 分布面积约

30 km<sup>2</sup>。岩性为灰白色中细粒-中粒花岗闪长岩。岩体中大量发育(约占全岩体积的 10%)暗色微粒-细粒闪长质包体。包体形态多样, 如倒水滴状、不规则状, 最大 1 m×1.5 m, 最小 1 cm×2 cm, 一般为(2~3) cm~(4~10) cm, 多数具塑性变形, 包体与寄主岩石界线截然, 个别包体边部见钾长石浅色环带(图 2A), 还有的包体被石英斑岩脉切穿。岩体的围岩为新元古代的碧口群(Pt<sub>2-3</sub>b)变沉积-火山岩系<sup>[2-3]</sup>, 主要岩性为石英片岩, 在岩体边部有宽约 100 m 的接触角岩带, 其岩性为细粒-中粒的石英岩, 并已发生明显的钾长石化, 在岩体边部见有条带状的石英岩捕虏体。

寄主岩石呈灰白色, 新鲜无蚀变, 中细粒-中粒半自形结构, 块状构造。主要由斜长石(35%~40%)+碱性长石(25%~30%)+石英(15%~20%)+黑云母(12%左右)+普通角闪石(8%左右)组成。副矿物主要有磷灰石、锆石、榍石、斜黧帘石、褐帘石、磁铁矿等, 总含量约 2%。少数碱性长石颗粒发育熔蚀环, 在其与斜长石的接触边界上见交代蠕虫结构。磷灰石: 短柱状, 柱长约 0.8 mm, 长宽比约 3:1~5:1, 多以包裹体存在于长石颗粒中。



MQ - 中秦岭; SQ - 南秦岭; SCB - 华南板块; SQL - 西南秦岭; LMS - 龙门山; MCS - 米仓山; DBS - 大巴山; HTT - 横丹群油积岩系; BVT - 碧口群火山岩系; HTF - 虎崖-土城断裂; WLGF - 文县-两河口-郭镇断裂; FTF - 枫相院-铜钱坝断裂; PQYF - 平武-青川-平阳关断裂; BNF - 北川-南坝断裂; 1 - 泥盆系三叠系; 2 - 泥盆系三河群; 3 - 志留系白水江群; 4 - 志留系茂县群; 5 - 震旦系; 6 - 横丹群油积岩; 7 - 火山碎屑沉积岩; 8 - 碧口群火山岩; 9 - 灰岩块体; 10 - 超铁镁质-铁镁质岩片; 11 - 闪长岩; 12 - 太古代鱼洞子群; 13 - 中生代花岗岩; 14 - 侏罗系一白垩系; 15 - 断裂

图 1 碧口地区地质构造简图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Sketch Geological Map of Bikou Area

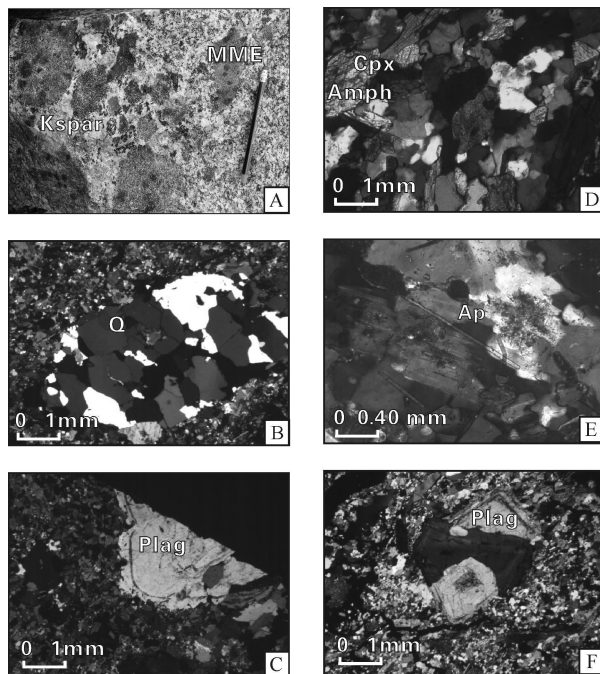
暗色微粒包体为灰黑色, 似斑状结构, 块状构造(图 2B)。斑晶约占岩石的 5%, 主要由斜长石、碱性长石、石英和角闪石组成。斜长石(图 2C, 图 F), 发育明显的熔蚀环, 粒径为 0.6~1 cm, 边缘多参差不齐或有圆滑现象, 有明显的内核( $A_n=20\sim25$ )和外环( $A_n=30\sim35$ )(费氏台测定), 两者由熔蚀环线分开, 内核受明显的绢云母化、钠黝帘石化, 包裹矿物多, 其中磷灰石长宽比约 5:1, 和寄主岩石中的磷灰石完全一致, 外环则干净无蚀变。在寄主岩与包体的边界上, 可见有斜长石斑晶横跨包体和寄主岩两侧, 它们之中可见细粒角闪石、黑云母等矿物的包裹体, 且这些包裹矿物的粒径要比包体岩石中矿物的粒径小。石英斑晶一般为它形颗粒的粒状集合体(图 2B), 粒径为 0.5~0.8 mm; 角闪石(图 2D), 自形-半自形柱状, 长 1~3 mm, 其中可见辉石的残余颗粒。基质为微粒-细粒半自形结构, 主要由斜长石(45%~50%)+角闪石(20%~25%)+黑云母(15%~20%)及少量碱性长石和石英(2%~5%)组成, 副矿物有磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石及帘石类矿物。斜长石多为它形微细晶, 粒径约 0.3 mm, 转动物台呈现与石英波状消光相类似的现象。碱性长石为它形, 受熔蚀, 粒度一般小于 1 mm。石英为它形填隙状, 粒径 0.1~0.3 mm。角闪石呈长柱状、针状, 柱长 0.4~0.6 mm, 长宽比达 8:1~10:1, 略具定向性。黑云母为长条片状, 长宽比 6:1~10:1, 最大达 20:1。磷灰石为自形针状(图 2E), 长宽比达 20:1~30:1, 多以包裹体存在于斜长石晶体中, 有时甚至贯穿多个长石颗粒并发生折断。

## 2 地球化学特征

暗色微粒包体和寄主岩石的主量与微量元素全岩成分测定, 分别用 X 荧光光谱仪(XRF)和电感耦合等离子质谱仪(ICP MS)测试完成, 实验误差小于 5%。分析结果见表 1。

### 2.1 主量元素岩石化学特征

寄主花岗闪长岩  $SiO_2$  67.26%~69.08%,  $TiO_2$  0.31%~0.36%,  $CaO$  2.68%~2.91%,  $MgO$  1.40%~1.76%,  $TFe_2O_3$  2.42%~2.96%。 $\sigma$  2.55~2.93; 高铝( $Al_2O_3$  15.81%~16.36%),  $A/CNK$  0.948~1.005, 表明岩石属准铝质-铝质系列(图 3)。碱含量偏高,  $Na_2O$  4.53%~4.98%,  $K_2O$



A - 索列特(Soret)扩散带阳坝岩体中发育的具有塑性变形特征的暗色微粒包体(MME)及其边部发育的钾长石浅色环带; B - 暗色微粒包体中的石英斑晶集合体, 石英它形粒状相互镶嵌; C - 暗色微粒包体中的碱性长石斑晶; D - 交代残余结构, 暗色微粒包体的角闪石斑晶中见有残余的辉石颗粒; E - 暗色微粒包体中的针状磷灰石; F - 暗色微粒包体中的斜长石斑晶, 其有明显的熔蚀环将长石斑晶分为内核和外环, 内核受明显的绢云母化, 外环干净无蚀变

图 2 阳坝花岗闪长岩岩体岩浆混合岩石的结构构造

Fig. 2 Texture and Structure Pictures of Magma Mixing of the Yangba Granodiorite Pluton

3.22%~3.84%,  $K_2O+Na_2O$  为 8.09%~8.69%,  $Na_2O/K_2O$  1.18~1.40,  $Mg^{\#}$  较高(50.8~54.5)。暗色微粒包体的岩石化学特征表明其为碱性岩石, 属于碱性系列和钾玄岩系列(图 5D),  $SiO_2$  56.39%~61.33%, 相当于安山质,  $TiO_2$  0.54%~0.93%,  $CaO$  4.33%~5.12%,  $MgO$  3.39%~4.16%,  $TFe_2O_3$  4.65%~5.75%。 $\sigma$  4.54~6.18; 高碱高钾,  $Na_2O$  3.31%~4.90%,  $K_2O$  4.22%~6.04%,  $K_2O+Na_2O$  9.11%~9.35%,  $K_2O/Na_2O$  0.87~1.75,  $Al_2O_3$  15.14%~17.36%,  $A/NCK<1$  (0.75~0.79), 属准铝质系列。 $Mg^{\#}$  高(55.6~60.1)(表 1)。

### 2.2 微量元素地球化学特征

暗色微粒包体相对于寄主岩石富集 Ni、Cr、Ti、Y、Zr、Hf、Rb、Ba、Th、U、Nb 等元素, 而相对贫 Co。在原始地幔标准化蛛网图上(图 4), 其具有相似的曲线分布型式, 表现为 Nb、Ta、P、Ti 的亏损,

表 1 阳坝岩体的主量与微量元素分析结果  
Tab. 1 Analytical Results of Major and Trace Element from the Yangba Pluton

岩性与 样品号	花岗岩长岩															闪长质包体				
	YBG-01	YBG-02	YBG-03	YBG-04	YBG-05	YBG-06	YBG-07	YBG-08	YBG-09	YBG-10	YBG-11	YBG-17	YBG-20	YBG-21	YBG-22	YBG-23	YBG-24			
SiO <sub>2</sub>	67.92	68.55	67.97	66.60	67.49	67.26	67.53	68.19	67.73	67.87	69.08	61.33	56.39	57.41	61.08	61.15	56.42			
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.32	0.30	0.36	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.30	0.26	0.56	0.92	0.79	0.57	0.54	0.93			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.87	16.05	16.36	16.18	15.84	15.81	15.96	15.66	16.23	16.04	16.48	15.14	17.36	16.01	15.21	15.14	17.36			
TF <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.68	2.62	2.38	2.96	2.65	2.84	2.55	2.53	2.42	2.47	2.05	4.69	5.69	5.69	4.65	4.49	5.75			
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10			
MgO	1.51	1.42	1.43	1.76	1.53	1.65	1.49	1.44	1.40	1.42	1.06	3.39	3.56	4.16	3.45	3.39	3.62			
CaO	2.80	2.68	2.89	2.91	2.75	2.90	2.70	2.71	2.76	2.72	2.29	4.33	5.14	4.80	4.45	4.42	5.12			
Na <sub>2</sub> O	4.80	4.56	4.92	4.73	4.59	4.66	4.53	4.56	4.76	4.64	4.98	3.41	4.90	4.07	3.31	3.35	4.89			
K <sub>2</sub> O	3.44	3.67	3.22	3.59	3.62	3.43	3.84	3.47	3.57	3.62	3.71	5.72	4.27	5.21	6.04	5.88	4.22			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.18	0.17	0.21	0.18	0.18	0.18	0.17	0.16	0.17	0.12	0.52	0.71	0.82	0.53	0.52	0.71			
LOS	0.36	0.36	0.34	0.38	0.44	0.38	0.35	0.41	0.45	0.41	0.40	0.34	0.48	0.63	0.58	0.53	0.58			
Total	99.93	100.46	100.03	99.73	99.51	99.52	99.52	99.52	99.84	99.71	100.47	99.52	99.52	99.68	99.97	99.51	99.70			
Mg <sup>#</sup>	53.00	52.00	54.50	54.30	53.50	53.70	53.80	53.20	53.60	53.40	50.80	59.00	55.60	59.30	59.70	60.10	55.70			
La	34.00	37.20	31.90	36.50	41.90	40.40	47.00	42.20	37.30	41.50	30.50	151.00	101.50	84.80	102.40	99.80	89.70			
Ce	65.80	69.90	59.20	68.50	80.30	77.20	85.60	76.70	70.50	76.80	55.20	293.00	192.00	162.00	195.00	193.00	166.00			
Pr	7.13	7.15	6.19	7.34	8.76	8.28	8.88	8.13	7.68	8.14	5.96	35.2	21.0	17.1	21.6	21.0	17.4			
Nd	27.20	26.00	22.80	27.00	33.20	31.80	33.10	30.50	29.20	30.40	22.50	122.00	79.70	62.60	81.90	78.70	64.00			
Sm	4.44	3.90	3.50	4.30	5.48	5.21	5.15	4.81	4.69	4.79	3.40	19.40	13.70	9.90	14.00	13.50	10.00			
Eu	1.15	1.06	0.96	1.08	1.41	1.33	1.35	1.24	1.21	1.29	0.94	4.42	3.09	2.55	3.29	3.17	2.61			
Gd	3.77	3.36	2.96	3.58	4.52	4.30	4.42	4.10	3.93	4.06	2.93	15.3	11.23	8.55	11.53	11.09	8.73			
Tb	0.42	0.36	0.32	0.40	0.55	0.52	0.51	0.48	0.47	0.47	0.34	1.54	1.25	0.95	1.28	1.22	0.97			
Dy	2.03	1.76	1.56	1.95	2.58	2.47	2.37	2.25	2.23	2.23	1.63	6.31	5.35	4.31	5.42	5.25	4.37			
Ho	0.38	0.31	0.28	0.35	0.44	0.43	0.42	0.39	0.39	0.39	0.29	0.90	0.83	0.72	0.82	0.81	0.72			
Er	0.99	0.83	0.75	0.92	1.21	1.17	1.12	1.06	1.07	1.07	0.81	2.40	2.13	1.92	2.12	2.05	1.93			
Tm	0.14	0.12	0.11	0.14	0.17	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	0.12	0.29	0.28	0.25	0.27	0.27	0.26			
Yb	0.96	0.82	0.74	0.92	1.20	1.18	1.11	1.06	1.07	1.09	0.85	1.89	1.83	1.67	1.78	1.76	1.71			

续表 1  
Tab. 1 (Continued)

岩性与 样品号	花岗岩长岩											闪长质包体						
	YBG-01	YBG-02	YBG-03	YBG-04	YBG-05	YBG-06	YBG-07	YBG-08	YBG-09	YBG-10	YBG-11	YBG-17	YBG-20	YBG-21	YBG-22	YBG-23	YBG-24	
Lu	0.16	0.13	0.12	0.15	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.15	0.27	0.27	0.25	0.26	0.26	0.26	0.25	
Cs	2.78	2.77	2.28	4.56	2.76	3.44	2.80	2.39	2.81	2.33	2.64	6.10	4.17	3.68	3.59	4.46		
Rb	86.20	81.70	89.20	98.00	95.50	100.00	88.70	96.70	95.30	96.90	95.40	126.00	231.00	230.00	208.00	125.00		
Ba	892	1 288	899	883	1 224	1 131	1 483	1 123	990	1 370	1 142	1 967	2 219	2 405	2 341	1 481		
Th	13.90	16.70	11.50	15.10	14.10	13.80	17.50	15.30	19.00	17.30	13.70	49.40	36.20	34.60	35.20	22.50		
U	1.95	1.74	1.79	1.56	2.13	2.57	2.11	1.62	2.10	2.02	1.58	4.98	3.67	4.71	3.37	3.58	4.34	
Ta	0.65	0.54	0.50	0.69	0.75	0.74	0.68	0.73	0.67	0.70	0.65	1.11	0.79	1.63	0.81	0.78	1.64	
Nb	9.53	8.50	8.17	10.30	10.60	10.40	9.28	9.09	9.27	8.83	8.44	21.1	14.6	30.1	14.9	14.2	30.7	
Sr	934	972	1 047	916	1 000	1 014	1 015	1 002	1 033	1 037	905	1 906	877	1 109	843	854	1 089	
Hf	3.70	3.59	3.35	3.61	3.92	4.51	3.98	4.14	3.88	4.31	4.15	7.79	6.83	5.90	6.22	6.38	5.99	
Zr	154	165	170	171	150	175	159	155	150	167	151	325	276	249	236	260	253	
Y	12.70	11.70	11.20	13.20	14.50	13.80	13.00	12.60	12.50	12.70	9.51	27.10	25.60	22.10	25.80	24.60	22.00	
Sc	5.32	4.53	5.02	5.14	5.37	5.93	4.99	5.17	4.69	5.21	3.19	13.7	12.5	12.6	12.3	11.5	13.1	
V	49.30	48.70	42.80	55.00	44.90	49.90	43.50	44.70	43.20	43.40	31.80	131.00	99.00	130.00	96.80	94.90	131.00	
Ni	16.90	16.10	15.70	17.30	16.90	15.80	14.00	15.50	13.50	14.70	10.60	22.20	32.50	13.70	31.90	30.80	12.10	
Cr	27.18	22.93	28.13	22.01	29.02	26.75	21.47	30.04	20.33	23.93	14.26	31.84	44.88	21.02	48.00	38.40	9.78	
Co	135	128	154	140	166	170	161	197	172	171	169	59.5	69.5	43.5	57.6	65.0	46.8	
Ga	19.80	19.70	20.60	20.30	19.70	20.10	19.40	20.20	20.50	20.80	20.40	23.40	21.00	22.20	20.00	19.70	22.40	
Ge	0.99	1.20	1.14	1.35	1.00	1.07	1.08	1.05	1.00	0.97	1.02	1.45	1.58	1.30	1.67	1.54	1.25	
K/Rb	331.303 3	372.786 0	299.414 1	303.851 9	314.498 9	284.133 1	359.399 6	297.724 8	310.684 1	309.841 12	322.547 96	376.316 33	153.515 63	400.160 26	217.484 47	234.471 79	279.308 02	
Sr/Y	73.76	83.35	93.15	69.19	69.13	73.42	78.29	79.74	82.51	81.66	95.21	70.23	34.20	50.27	32.69	34.70	49.40	
Y/Yb	13.20	14.28	15.10	14.35	12.07	11.72	11.67	11.81	11.70	11.69	11.13	14.35	14.00	13.19	14.51	13.97	12.86	
δ(Eu)	0.84	0.88	0.89	0.82	0.84	0.83	0.84	0.83	0.84	0.87	0.89	0.76	0.74	0.83	0.77	0.77	0.83	
(La/Yb) <sub>N</sub>	23.923 50	30.820 59	28.942 52	26.738 83	23.620 79	23.167 62	28.590 36	26.820 10	23.586 57	25.789 088	24.140 749	54.080 309	37.431 507	34.275 520	38.939 651	38.269 108	35.333 954	
Nb/Ta	14.642 16	15.789 30	16.191 77	14.925 85	14.140 17	14.177 49	13.627 27	12.428 09	13.767 31	12.638 211	13.007 911	18.958 667	18.531 983	18.439 868	18.315 352	18.136 871	18.703 540	

表中主量元素  $w_B/\%$ , 微量元素  $w_B/10^{-6}$ ,  $Mg^\# = Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+} + \text{全铁})) \times 100$

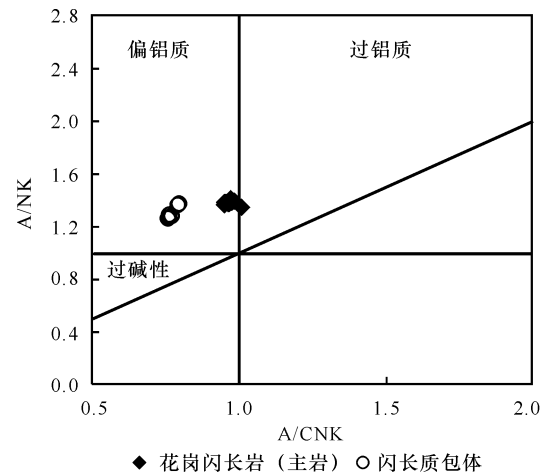
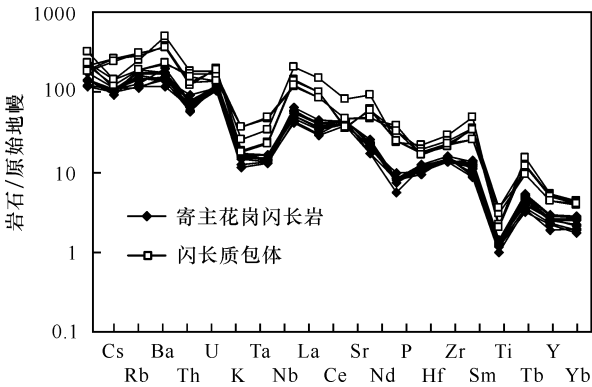


图 3 阳坝岩体 A/CNK - A/NK

Fig. 3 Diagram of A/CNK - A/NK for Yangba Pluton

但包体的 P 亏损程度较寄主岩石弱。寄主岩石表现出明显的 Sr 正异常, 说明岩浆经历了含磷、钛等矿物的分离结晶作用, 同时表明岩浆为地壳来源或曾受到地壳物质的强烈混染<sup>[4]</sup>。



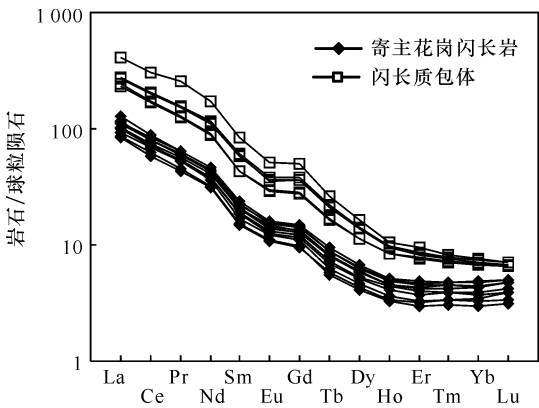
标准化值引自 Ring Wood, 1979 and Sun, 1982

图 4 阳坝岩体微量元素原始地幔标准化图

Fig. 4 Primitive Mantle Normalized Trace Element Patterns of Rocks from Yangba Pluton

2.3 稀土元素地球化学特征

寄主花岗岩的稀土含量中等,  $\Sigma\text{REE}$  (125.62 ~ 181.62)  $\times 10^{-6}$ , 平均为  $173 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土分异中等,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  22.18 ~ 29.51。 $\delta\text{Eu}$  0.84 ~ 0.89, 具有弱的负铕异常。稀土配分模式图上表现为相对平滑的右倾曲线(图 4)。包体稀土含量高,  $\Sigma\text{REE}$  (357.49 ~ 654.90)  $\times 10^{-6}$ , 平均为  $472 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土分异强烈,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  32.82 ~ 51.78。 $\delta\text{Eu}$  0.75 ~ 0.84, 具有中等-弱的负铕异常。由稀土配分模式图(图 5)可以看出, 包体和寄主岩石具有相似的曲线分布型式, 但包体的稀土含量总体偏高。



标准化值引自 Taylor and McLennan, 1985; Wanke, 1984

图 5 阳坝岩体稀土元素配分型式图

Fig. 5 Chondrite Normalized REE Patterns of Rocks from Yangba Pluton

3 讨论

3.1 岩体成因-岩浆混合作用

前人研究<sup>[5-15]</sup>表明, 不同成因类型的包体与一定成因类型的花岗岩有着密切的关系。花岗岩中微粒包体的成因大致可以总结为 3 种<sup>[16]</sup>:

- (1) 靠近寄主岩浆的围岩碎片或同生堆晶岩碎片。
- (2) 与长英质寄主岩浆发生混合的偏镁铁质混合岩浆泡(magma globules)。
- (3) 发生重结晶作用的难熔变质岩碎片和花岗岩岩浆的残余体。

如前所述, 岩体中的暗色微粒-细粒包体具有岩浆混合的典型特征:

(1) 包体具塑性变形特征(图 2A)且普遍发育淬火结构。针状角闪石和磷灰石、磷灰石和角闪石的这种结晶学特征是岩浆快速冷凝淬火的主要矿物学标志<sup>[6, 16-18]</sup>, 包体中的长石微晶也是淬火作用的标志。

(2) 闪长质包体中普遍发育大颗粒斜长石捕虏晶, 表明这种具有反环带结构和熔蚀环的斜长石, 其内核应是寄主岩浆结晶的产物, 而外环则是寄主岩浆中的斜长石在岩浆混合过程中迁移至温度较高的偏基性岩浆中后, 边部受熔蚀再生长的产物, 横跨包体和岩石两侧的长石斑晶中发育的细小的矿物包裹体也表明, 这些捕虏晶是酸性岩浆中早期结晶的长英质矿物搬运到包体中及其边缘的结果<sup>[8, 18, 21]</sup>。

(3) 包体周围的索列特(Soret)扩散分带(图 2A)(包体边部的黑云母富集边及周围的钾长石浅色环带)也表明, 包体岩浆温度较高且包体和岩石之间有明显的成分交换<sup>[22-23]</sup>。由以上特征可初步认为, 暗色微粒包体是高温偏基性岩浆侵入到花岗闪长质岩浆中淬冷的产物。

在化学成分变异图解上(图 6), 寄主岩石和包体具有明显的成分间断和不同演化趋势, 且包体较寄主花岗岩有高 Rb/Sr 值和( La/Yb)<sub>N</sub> 值及较低的  $\delta(Eu)$  值(岩石的 Rb/Sr 0.085 ~ 0.107, ( La/Yb)<sub>N</sub> 22.18 ~ 29.51,  $\delta(Eu)$  0.84 ~ 0.89。包体的 Rb/Sr 0.11 ~ 0.27, ( La/Yb)<sub>N</sub> 32.82 ~ 51.78,  $\delta(Eu)$  0.75 ~ 0.84), 这些特征都表明包体是和寄主岩石不同源的岩浆演化的产物<sup>[24]</sup>。

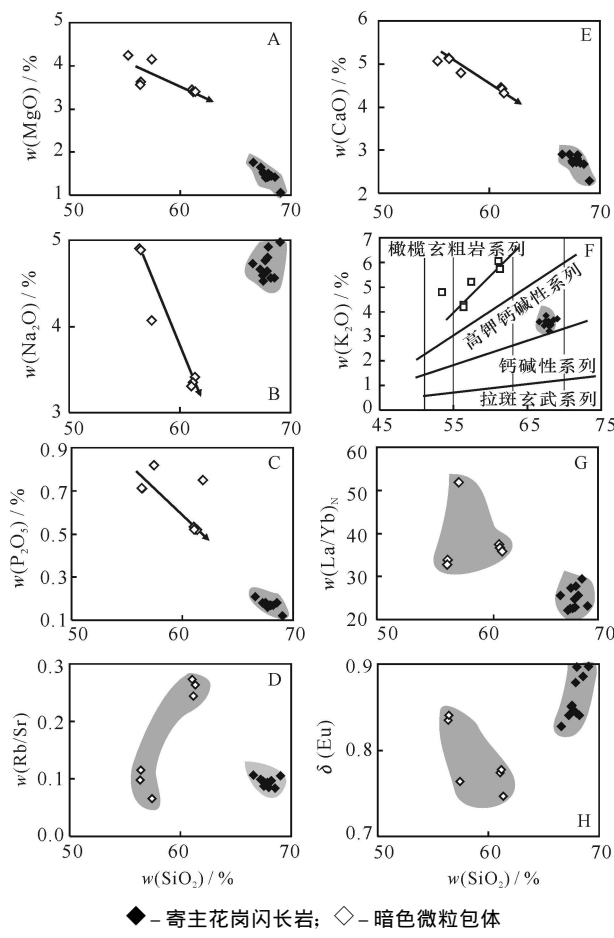


图 6 寄主花岗闪长岩与暗色微粒包体的哈克图解

Fig. 6 Harker Diagrams of Elements for Host Granodiorite and Mafic Microgranular Endaves

在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解上, 暗色微粒包体都落于橄榄玄粗岩系列(shoshonite)区域内, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值除 YBG-21 和 YBG-24 样品外, 其余样品值均大于 1, 与碱性玄武岩相比, 包体岩石贫 Fe 和 Ti

(TF<sub>Fe2O3</sub> < 6%; TiO<sub>2</sub> ≤ 1%)。因此有理由认为, 包体岩石属于橄榄玄粗岩系列。据前人研究, 橄榄玄粗岩可源于富集地幔或玄武岩的高压分离结晶<sup>[25-26]</sup>, 结合包体的高 Mg<sup>#</sup> (55.6 ~ 60.1) 特征, 可认为其更有可能起源于富集地幔, 因为 MORB 的 Mg<sup>#</sup> 约为 60, 其分离结晶产物的 Mg<sup>#</sup> 应远低于 60 (为 45)<sup>[27-28]</sup>。

因此可以推断, 阳坝花岗闪长岩岩体为深部壳-幔混合作用的产物。

### 3.2 构造意义讨论

前人的工作表明, 阳坝岩体的成岩年龄为 220 Ma 左右<sup>[2, 29]</sup>, 该年龄正好处于勉略洋完全闭合, 并已发生陆-陆俯冲碰撞<sup>[30]</sup>。岩体的壳-幔混合成因则表明, 220 Ma 前, 扬子板块西北缘的碧口地块上曾有明显的幔源岩浆底侵作用。研究表明, 在俯冲碰撞的动力学背景下, 容易发生幔源岩浆对下地壳的底侵作用<sup>[31-32]</sup>。底侵岩浆带来的大量热量导致下地壳物质发生熔融, 形成大规模的花岗质岩浆, 同时在造山环境下, 不断上升的幔源岩浆注入到花岗质岩浆房中, 并与之发生不同程度的混合及结晶作用, 便形成阳坝岩体。

阳坝岩体的壳-幔混合成因表明, 扬子板块西北缘在中三叠世有一次重要的地壳垂向增生事件。

## 4 结论

通过深入的地质学、岩石学研究, 确定出露于阳坝镇一带的阳坝岩体是壳-幔混合成因, 暗色微粒-细粒包体是高温的基性岩浆进入较低温的花岗闪长质岩浆中淬火结晶的产物。岩体的壳-幔混合成因代表了一次幔源岩浆底侵作用, 幔源岩浆上升导致下地壳的部分熔融, 由此所形成的花岗闪长质岩浆与幔源岩浆发生混合作用, 形成具有高 Mg<sup>#</sup> 特征的阳坝岩体。结合前人关于阳坝岩体的年代学资料, 研究表明, 阳坝岩体的岩浆混合成因代表了一次重要的壳-幔相互作用, 同时表明扬子板块西北缘在中三叠世有一次重要的地壳垂向增生事件。

野外工作得到了李永飞的协助, 数据测试由西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成, 在此一并表示感谢。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaozhua, et al. Mixing

1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- Events Between the Crust and Mantle derived Magma in Eastern Kunlun: Evidence from Zircon SHRIMP II Chronology[ J ]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49( 8): 828 - 834.
- [ 2 ] 秦克令, 何世平, 宋述光. 碧口地体同位素年代学及其意义[ J ]. 西北地质科学, 1992, 13( 2): 97 - 109.
- [ 3 ] 闫全人, Ander D H, 王宗起, 等. 扬子板块西北缘碧口群火山岩系的 SHRIMP 年代, Sr - Nd - Pb 同位素特征及其意义[ J ]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23( 1): 1 - 11.
- [ 4 ] 孙德有, 吴福元, 林强, 等. 张广才岭燕山早期白石山岩体成因与壳幔相互作用[ J ]. 岩石学报, 2001, 17( 2): 227 - 235.
- [ 5 ] Didier J. Contribution of Enclaves to Understanding of Origin and Evolution of Granitic Magma[ J ]. Geologische Rundschau, 1987, 76( 1): 41 - 50.
- [ 6 ] Vernon R H. Microgranitoid Enclaves: Globules of Hybrid Magma Quenched in Aplutonic Enviroment[ J ]. Nature, 1984, 304: 483.
- [ 7 ] Chappell B W, White A J R, Wyborn D. The Importance of Residual Source Material( Restite) in Granite Petrogenesis[ J ]. J Petrol, 1987, 28: 1111 - 1138.
- [ 8 ] Dider J, Barbarin B. Macroscopic Features of Mafic Microgranular Enclaves[ C ] // Dider J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 1991, 253 - 262.
- [ 9 ] Giampiero E Poli, Simone Tommmasini. Model for the Origin and Significance of Microgranular Enclaves in Calc alkaline Granitoids[ J ]. J Petrol, 1991, 32( 3): 657 - 666.
- [ 10 ] 马昌前, 王人镜, 邱家骧. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志——包体[ J ]. 地质论评, 1992, 38( 2): 109 - 119.
- [ 11 ] Elburg M A. Evidence of Isotopic Equilibration Between Microgranitoid Enclaves and Host Granodiorite, Warburton Granodiorite, Lachlan Fold Belt, Australia[ J ]. Lithos, 1996, 38: 1 - 22.
- [ 12 ] Silva M M V G, Neiva A M R, Whitehouse M J. Geochemistry of Enclaves and Host Granite from the Nelas Area, Central Portugal[ J ]. Lithos, 2000, 50: 153 - 170.
- [ 13 ] Dahlquist J A. Mafic Microgranular Enclaves: Early Segregation from Metaaluminous Magma( Sierra de Chepes), Pampean Ranges, NW Argentina[ J ]. Journal of South American Earth Science, 2002, 15: 645 - 655.
- [ 14 ] 李永军, 李注苍, 丁仁平, 等. 西秦岭温泉花岗岩岩体岩石学特征及其岩浆混合标志[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 3): 7 - 12.
- [ 15 ] 李永军, 赵仁夫, 李注苍. 岩浆混合花岗岩微量元素成因图解尝试——以西秦岭温泉岩体为例[ J ]. 西安工程学院学报, 2002, 24( 3): 7 - 11.
- [ 16 ] Mass R, Nicholls I A, Legg C. Igneous and Metamorphic Enclaves in the S Type Deddick Granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, Geochemical, and Nd - Sr Isotopic Evidence for Crustal Melting and Magma Mixing[ J ]. J Petrol, 1997, 38( 7): 815 - 842.
- [ 17 ] Wyllie P J. The Habit of Apatite in Synthetic Systems in Igneous Rocks[ J ]. J Petrol, 1962, 3: 238.
- [ 18 ] Vernon R H. K Feldspar Megacryst in Granite phenocryst not Porphyroblasts[ J ]. Earth Science Review, 1986( 23): 1 - 63.
- [ 19 ] Hibbard M J. Textural Anatomy of Twelve Magma mixed Granitoid System[ C ] // Dider J, Barbarin B. Enclaves, Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 1991, 431 - 444.
- [ 20 ] Sparks R S J, Marshall L A. Thermal and Mechanical Constraints on Mixing Between Mafic and Silicic[ J ]. J Volcanol Geotherm Res, 1986, 29: 99.
- [ 21 ] 王晓露, 王涛, 卢欣祥, 等. 北秦岭老君山、秦岭梁环斑结构花岗岩岩浆混合的岩相学证据及其意义[ J ]. 地质通报, 2002, 21( 8/9): 523 - 529.
- [ 22 ] Blundy J D, Sparks R S J. Petrogenesis of Mafic Inclusion in Granitoids of the Adamello Massif, Italy[ J ]. J Petrol, 1992, 33( 5): 1039 - 1101.
- [ 23 ] 曲晓明, 王鹤年, 饶冰. 郭家岭花岗闪长岩岩体中闪长质包体的成因研究[ J ]. 矿物学报, 1997, 17( 3): 302 - 309.
- [ 24 ] Reid J B J, Evans O C, Fates D G. Magma Mixing in Granitic Rocks of the Central Sierra Nevada, California[ J ]. Earth Plan Sci Lett, 1983( 66): 243 - 261.
- [ 25 ] Turner S, A maud N, Liu J Q, et al. Post collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implication for Convective Thinning of the Lithosphere and Source of Ocean Island Basalt[ J ]. J Petrol, 1996, 37( 1): 45 - 71.
- [ 26 ] Meen J K. Formation of Shoshonites from Calc alkaline Basalt Magmas: Geochemical and Experimental Constraints from the Type Locality[ J ]. Contr Mineral Petrol, 1987, 97: 333 - 351.
- [ 27 ] 肖龙, Rapp R P, 许继锋. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[ J ]. 岩石学报, 2004, 20( 2): 219 - 228.
- [ 28 ] Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction Between Slab derived Melt and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa[ J ]. Chemical Geology, 1999, 160: 335 - 356.
- [ 29 ] 陈好寿. 西北地区某些花岗岩及变质岩同位素年龄数据讨论[ J ]. 地质学报, 1975( 1): 45 - 60.
- [ 30 ] Lai Shaocong, Zhangguowei, Dong Yunpeng. Geochemistry and Regional Distribution of Ophiolites and Associated Volcanics in Mianlie suture, Qinling Dabie Mountains[ J ]. Science in China: Ser D, 2004, 47( 4): 289 - 299.
- [ 31 ] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙[ M ]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [ 32 ] 金振民, 高山. 底侵作用及其壳幔演化动力学意义[ J ]. 地质科技情报, 1996, 15( 2): 1 - 7.