

河南舞阳南部张士英岩体的地球化学 与成因及其构造意义

李创举, 包志伟

(中国科学院 广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 张士英岩体岩石类型以石英二长岩、石英正长岩为主。岩体属于准铝质的高钾 - 钾玄岩系列 (Al_2O_3 为 14.8% ~ 16.7%, $A/CNK = 0.77 \sim 1.02$, K_2O/Na_2O 在 1.00 ~ 1.43 之间), 稀土元素总量在 261.7 ~ 381.0 $\mu g/g$ 之间, 轻稀土元素相对富集, 稀土元素球粒陨石标准化模式呈右倾平滑曲线, $(La/Yb)_N$ 比值为 28 ~ 50, 具有轻微的 Eu 负异常, Eu/Eu^* 比值在 0.73 ~ 0.87 之间。微量元素组成上表现为 Sr, Ba, Nb, Ta 的亏损, 而 Th, U 相对富集。 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 初始平均值为 0.709, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -13.9 ~ -19.9, Nd 的模式年龄为 1.48 ~ 2.10 Ga。岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(124.2 \pm 0.5) Ma$ 为早白垩世岩浆作用的产物。岩体侵位的区域地质背景为华北克拉通白垩纪大规模岩石圈转型和减薄时期, 岩石的微量元素及同位素特征表明, 岩体主要来源于下地壳物质的部分熔融, 但有年轻地幔物质的加入。反映在区域强烈伸展拉张和岩石圈减薄背景下, 软流圈地幔岩浆底侵所造成的下地壳部分熔融及壳幔混合过程。

关键词: 正长岩; 张士英岩体; 早白垩世; 岩石圈减薄; 华北克拉通; 河南省

中图分类号: P595; P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2010)03-0435-09

0 引言

华北克拉通南缘的秦岭 - 大别造山带, 从新元古代以来发生了一系列的碱性岩浆活动, 尤其在中生代晚侏罗 - 早白垩世。不少学者曾对该地区的不同时代的碱性侵入岩的岩石学和地球化学特征进行探讨 (包志伟等, 2008; 张正伟等, 1989, 2002; 邱家骧等, 1990; 曾广策, 1990)。近年来的一些研究表明, 在华北克拉通南缘存在一系列形成于早白垩世与岩石圈减薄或转型有关的岩浆岩类 (王冬艳等, 2005; 杨德彬等, 2007)。张士英岩体位于舞阳南部, 刘振宏等 (2004) 认为张士英岩体和太山庙、角子山等岩体同属 A 型花岗岩。叶会寿等 (2008) 研究结果表明太山庙岩体 (SHRMP 锆石 U-Pb 年龄 $(115 \pm 2) Ma$) 具有铝质 A 型花岗岩特征; 周红升等

(2008) 对河南省泌阳春水附近黄山、祖师顶和角子山三个碱性花岗岩体 (SHRMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(132.8 \pm 0.8) Ma$, $(131.9 \pm 1.1) Ma$ 和 $(120.9 \pm 0.8) Ma$) 进行了较为系统的研究, 认为岩体都具有 A 型花岗岩特征。前人曾对张士英岩体的岩体的岩石化学和地球化学特征进行过研究但不够系统, 同时也缺少精确同位素定年资料 (张正伟等, 2000)。对该岩体系统的岩石学和地球化学研究对探讨东秦岭 - 华北克拉通南缘构造演化及华北岩石圈减薄过程具有重要的意义。本文通过对张士英岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定, 综合岩体的主量和微量元素地球化学特征、Sr-Nd-Pb 的同位素特征来分析岩浆的物质源区特征、成岩过程以及形成构造背景。

收稿日期: 2009-10-14; 改回日期: 2010-01-25

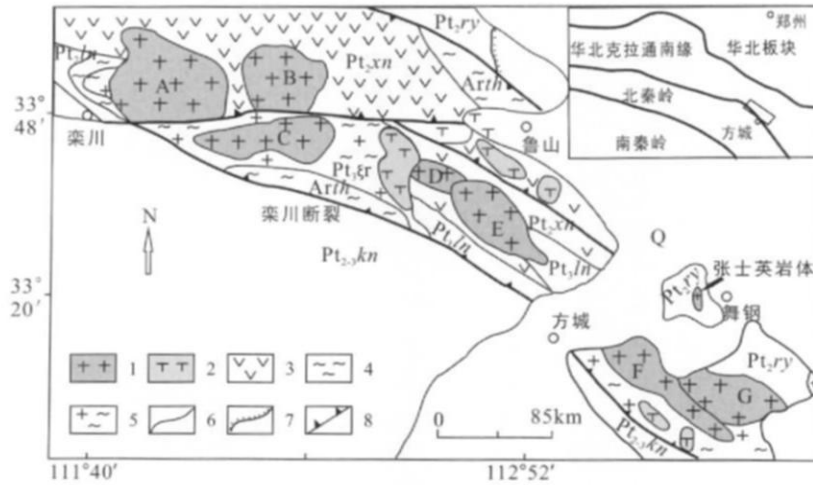
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 40672070)。

第一作者简介: 李创举 (1984-), 男, 博士生, 矿床地球化学专业。Email: lichuangju123@163.com

1 区域地质概况

岩体位于河南舞钢 - 方城之间, 构造上处于华北克拉通南缘(图 1)。区内出露有新太古代太华群变质岩; 中元古代汝阳群为海相碎屑岩 - 碳酸盐岩建造(孙枢等, 1981); 新元古代栾川群位于岩体

西北部。岩体侵位于中元古代汝阳群。岩体南端分布有早白垩世的黄山、祖师顶、角子山等 A 型花岗岩体。岩体产于栾川断裂带北侧, 同一断裂带中还分布有合峪、二郎庙、交口、黄山、角子山等晚燕山期侵入体。



Q. 第四系; Pt_4 栾川群; $Pt_{3,2}$ 宽坪群; Pt_2 汝阳群; Pt_1 熊耳群; A_{mt} 太华群; $Pt_3\xi_r$ 中元古代正长花岗岩; A 合峪岩体; B 泰山庙岩体; C 二郎庙岩体; D 鸡冢岩体; E 交口岩体; F 祖师顶岩体; G 角子山岩体; 1. A 型花岗岩; 2 正长岩; 3 中基性火山岩; 4 片麻岩; 5 片麻状花岗岩; 6 地质界线; 7. 不整合线; 8. 逆冲断层。

图 1 华北克拉通南缘地质简图

Fig 1 Simplified geological map of the southern margin of North China craton

岩体主体为角闪石英正长岩, 边缘为细粒正长岩; 主要矿物组成钾长石, 含量 30% ~ 60%; 斜长石主要为含钠质的钠长石或钠更长石, 约 25%; 石英 5% ~ 15%; 暗色矿物为角闪石 (主要为钠质或钙质的, 如钠铁闪石、阳起石质角闪石)、金云母、含铁黑云母。副矿物为锆石、独居石、磁铁矿等。

2 样品锆石测年

2.1 样品测定和锆石定年

样品主量、微量和 Nd 同位素测定在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室分别采用 Rigaku 100e 型荧光光谱仪 (XRF)、PE Elan 6000 型电感耦合等离子体 - 质谱仪 (ICP-MS) 及 Micromass Isoprobe 型 MC-ICPMS 测定。

为对岩体进行精确同位素定年, 我们选取新鲜的石英正长岩岩石样品进行锆石分选, 先将新鲜的岩石样品粉碎至 120 目以下, 用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石, 再在双目镜下用手工方法逐个精选锆石颗粒, 未用任何化学试剂。本次锆石定

年样品与主量元素和微量元素分析的样品相对应。锆石阴极发光图像拍摄在中国科学院广州地球化学研究所 JXA-8100 电子探针仪上完成。LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。ICP-MS 为 Agilent 公司生产的四级杆 ICP-MS Agilent 7500a 激光剥蚀系统为德国 Landa Physk 公司的 Geolas 2005 深紫外 (DUV) 193nm ArF 准分子 (excimer) 激光剥蚀系统。实验中采用 He 作为剥蚀的载气, 激光斑束直径为 32μm。参考物质为美国国家标准技术协会研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM 610 锆石 U-Pb 年龄的测定采用国际标准锆石 91500 作为外标进行校正, 每隔五个分析点测一次标样, 保证标准和样品的仪器条件一致。在样品分析前后以及每隔 20 个测点各测一次 NIST SRM 610 以 Si 做内标, 测定锆石中的 U、Th、Pb 的含量, 详细的分析流程及有关参数见 Yuan et al (2004) 及 Liu et al (2008)。元素的比率和元素的含量用 GLITTER (4.0 版) 来处理, 年龄的计算和谐和图用 Isoplot (3.00 版) (Ludwig 2003) 来完成。

表 1 张士英岩体样品 HF-30 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定结果

Table 1 U-Pb isotopic dating results for zircons from the Zhangshiyi quartz syenite

样号	²³² Th	²³⁸ U	U /Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
				Ratio	1σ	Ratio	1σ	Ratio	1σ	Age	1σ	Age	1σ	Age	1σ
HF-30-1	817.82	495.12	0.60541	0.04715	0.00089	0.1272	0.00242	0.01956	0.00022	56.4	44.76	121.6	2.18	124.9	1.41
HF-30-2	1194.82	290.14	0.24283	0.0455	0.00103	0.12289	0.00279	0.01959	0.00023	0.1	25.03	117.7	2.52	125.1	1.45
HF-30-3	323.27	157.16	0.48616	0.04823	0.00146	0.13112	0.00394	0.01971	0.00025	110.7	70.15	125.1	3.54	125.9	1.56
HF-30-4	833.66	326.73	0.39192	0.04856	0.00104	0.13143	0.00281	0.01963	0.00023	126.7	49.51	125.4	2.52	125.3	1.45
HF-30-5	373.79	135.07	0.36135	0.05125	0.00202	0.13676	0.00531	0.01935	0.00027	251.9	88.39	130.2	4.75	123.6	1.69
HF-30-6	935.23	283.56	0.3032	0.04842	0.00116	0.13022	0.0031	0.0195	0.00023	120	55.35	124.3	2.79	124.5	1.47
HF-30-7	593.93	332.5	0.55983	0.05156	0.00237	0.13713	0.00619	0.01929	0.00028	265.9	102.05	130.5	5.53	123.2	1.80
HF-30-8	144.16	73.73	0.51145	0.04484	0.00345	0.1212	0.00917	0.0196	0.00037	0.1	113.64	116.2	8.3	125.1	2.37
HF-30-9	884.26	377.78	0.42723	0.04774	0.00116	0.12672	0.00307	0.01925	0.00023	85.5	57.52	121.1	2.76	122.9	1.46
HF-30-10	204.47	82.49	0.40343	0.04994	0.00208	0.13536	0.00555	0.01966	0.00028	192.4	94.21	128.9	4.96	125.5	1.76
HF-30-11	138.15	76.02	0.55027	0.04369	0.00224	0.11803	0.00596	0.01959	0.00030	0.1	0	113.3	5.41	125.1	1.87
HF-30-12	322.48	181.26	0.56208	0.04908	0.00139	0.13322	0.00374	0.01969	0.00024	151.8	65.01	127	3.35	125.7	1.54
HF-30-13	697.21	281.69	0.40402	0.04603	0.00129	0.12203	0.0034	0.01923	0.00024	0.1	64.78	116.9	3.08	122.8	1.5
HF-30-14	1559.99	920.82	0.59027	0.04837	0.00091	0.1286	0.00244	0.01928	0.00022	117.5	43.71	122.8	2.19	123.1	1.41
HF-30-15	494.68	328.69	0.66445	0.0482	0.0013	0.12966	0.00347	0.01951	0.00024	109	62.45	123.8	3.12	124.6	1.52
HF-30-16	531.1	233.4	0.43947	0.04719	0.00131	0.12598	0.00347	0.01936	0.00024	58.2	65.35	120.5	3.13	123.6	1.52
HF-30-17	230.58	128.48	0.5572	0.04947	0.00242	0.13214	0.00635	0.01937	0.00029	170.2	110.51	126	5.7	123.7	1.86
HF-30-18	571.26	241.68	0.42306	0.04956	0.00148	0.13302	0.00392	0.01947	0.00025	174.3	68.03	126.8	3.52	124.3	1.56
HF-30-19	377.67	264.89	0.70138	0.04987	0.00183	0.13433	0.00487	0.01954	0.00027	189	83.44	128	4.36	124.7	1.68
HF-30-20	1044.63	402.23	0.38505	0.05175	0.00126	0.13707	0.00332	0.01921	0.00023	274.4	54.74	130.4	2.97	122.7	1.48

2 2 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定结果

共测定 20 颗锆石的 20 个数据点, 测试结果见表 1。锆石多呈短柱状, 晶型比较完好, CL 图像显示清晰的韵律环带(图 2a), 成分也相对均一, 明显为岩浆锆石。该样品所测锆石中并未发现继承性锆石, Th/U 含量分别在 138~ 1560μg/g, 74~ 921μg/g 之间, Th/U 比值 1.43~ 4.16, 在锆石 U-Pb 谐和图上(图 2b), 20 个数据点均集中在谐和线上或其附近, 它们的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 123Ma 到 126Ma 之间, 加权平均值为 (124.2 ± 0.5) Ma, SWD = 0.53, 此年龄值应为岩体的结晶年龄。

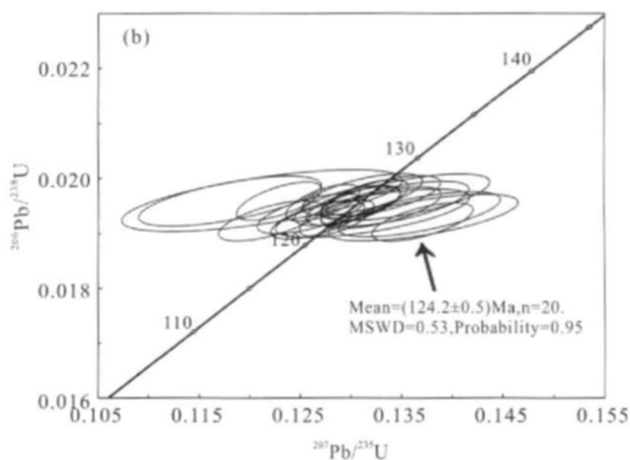
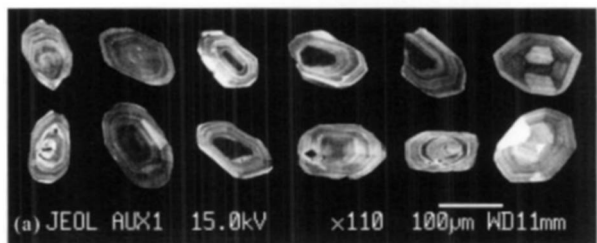


图 2 样品 HF-30 的部分锆石 CL 图像 (a) 和锆石 U-Pb 年龄谐和图 (b)

Fig 2 CL images of zircons and U-Pb concordant diagrams of zircons from the Zhangshiyi quartz syenite

3 岩石地球化学特征

3 1 岩体的主量、微量和稀土元素特征

岩体的主量、微量和稀土元素组成见表 2。该岩体主要岩石类型为角闪石英正长岩, 边缘为花岗斑岩。SiO₂ 含量 58% ~ 69%, Na₂O + K₂O 含量为 8.5% ~ 11%, K₂O 为 4.46% ~ 5.98%, K₂O/Na₂O 比值为 1.00~ 1.43, 均大于 1, 在 SiO₂-K₂O 图解中(图 3b), 样品点均落在钾玄岩系列中; 在 TAS 图解中, 样品点落在正长岩或石英二长岩的区域(图 3a); 岩石具有较低的 CaO 含量(0.72% ~ 4.8%); Al₂O₃ 含量在 14.8% ~ 16.7% 之间, CNK 在 0.77~

表 2 张士英岩体样品主量、微量和稀土元素组成

Table 2 Major and trace element contents of the Zhangshiying quartz syenite

主量元素 (%)					
Sample No	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4	HF-30
SiO ₂	66.26	67.12	58.09	67.44	68.21
TiO ₂	0.48	0.50	0.75	0.45	0.32
Al ₂ O ₃	15.07	14.85	16.20	15.19	16.70
Fe ₂ O ₃	2.12	2.22	4.12	1.22	1.44
FeO	0.72	0.75	2.25	1.20	0.00
MnO	0.09	0.05	0.13	0.05	0.05
MgO	0.45	1.00	2.58	0.82	0.17
CaO	1.48	2.02	4.80	1.96	0.718
Na ₂ O	4.12	4.38	4.46	4.48	5.20
K ₂ O	5.90	5.20	4.46	5.30	5.98
P ₂ O ₅	0.25	0.23	0.78	0.20	0.04
LOI	2.24	0.42	0.97	0.58	0.34
Total	99.18	98.74	99.59	98.89	99.18
A/CNK	0.95	0.90	0.77	0.91	1.02
A/NK	1.14	1.16	1.33	1.16	1.11
ALK	10.02	9.58	8.92	9.78	11.18
稀土与微量元素 (μg/g)					
La	81.0	74.8	96.8	79.2	95.5
Ce	113	136	145	139	191
Pr	11.6	14.0	18.4	14.4	18.8
Nd	36.2	48.4	70.4	48.4	55.1
Sm	4.56	7.35	11.6	7.77	7.12
Eu	1.09	1.54	2.69	1.58	1.57
Gd	4.08	5.40	7.80	5.60	5.08
Tb	0.80	0.60	0.60	0.60	0.56
Dy	3.64	3.64	5.07	3.77	2.73
Ho	0.60	0.66	0.88	0.66	0.49
Er	2.46	1.95	2.35	2.05	1.30
Tm	0.40	0.40	0.60	0.40	0.20
Yb	1.96	1.95	2.00	2.00	1.37
Lu	0.30	0.40	0.60	0.40	0.23
Y	15.0	19.0	26.0	19.2	13.3
Sr	380	600	899	555	147
Rb	213	193	168	193	99.9
Ba	1849	1478	2157	1438	534
Th	42.7	42.0	25.5	47.0	33.7
Nb	29.8	37.6	30.8	37.1	22.0
Ta					1.18
Hf	6.70	7.80	9.00	7.90	9.54
Zr	249	269	319	258	359
ΣREE	261.69	297.09	364.79	305.83	381.05
ΣLREE/ΣHREE	17	19	17	19	31
Eu/Eu*	0.77	0.75	0.87	0.73	0.80
(La/Yb) _N	30	28	35	28	50

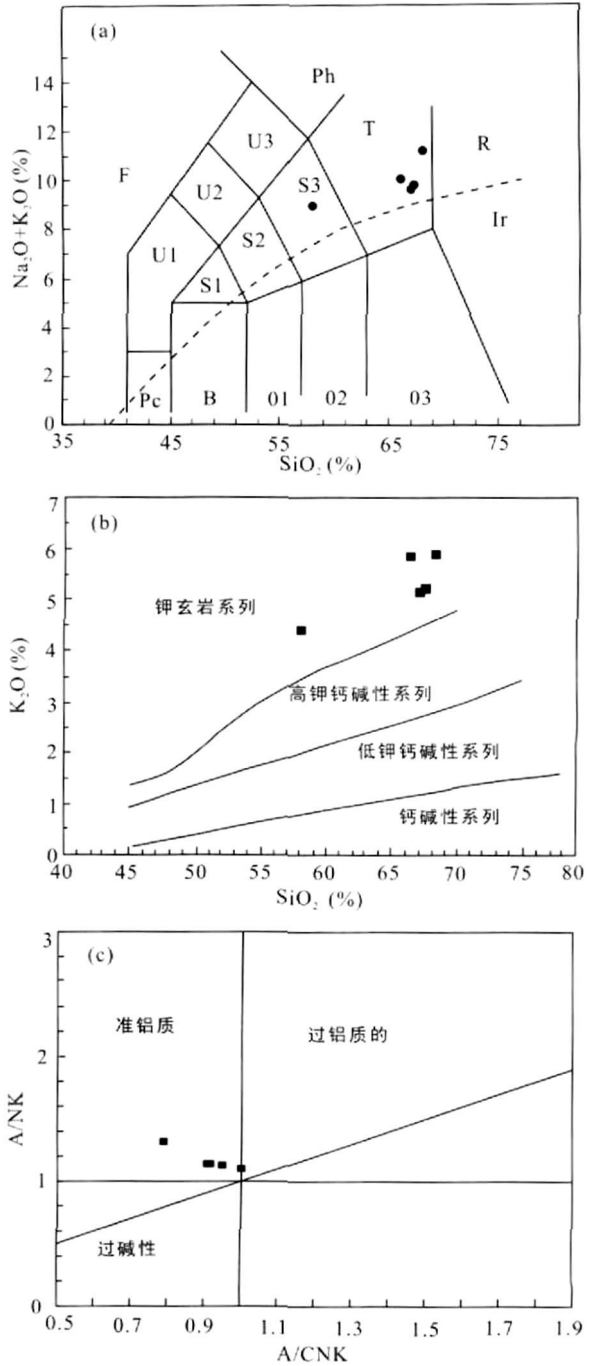


图 3 张士英岩体 TAS图解 (a), SiO₂-K₂O图解 (b) 和 A/CNK-A/NK图解 (c)

Fig 3 SiO₂ vs K₂O + Na₂O, A/CNK vs A/NK (after Maniar and Piccolj 1989), and SiO₂ vs K₂O plots (after Peccerillo and Taylor, 1976) for the syenite

1.02 之间, A/NK 指数为 1.11~1.33 之间, 四个样品点落入准铝质区域 (图 3c); MgO 含量为 0.17%~2.5%; 铁镁比值变化较大, Mg[#] (Mg/(Mg+Fe)) 为 0.19~0.44, FeO^{*}/MgO (FeO^{*} = FeO + 0.9Fe₂O₃)

比值为 2.5~8.1, 高于全球花岗岩的平均值。

岩石 REE 总量在 261.7~381.0 μg/g 之间, 相对富集 LREE, LREE/HREE 值在 17~31 之间; 在球粒陨石标准化模式图上, 所有样品均表现为右倾平

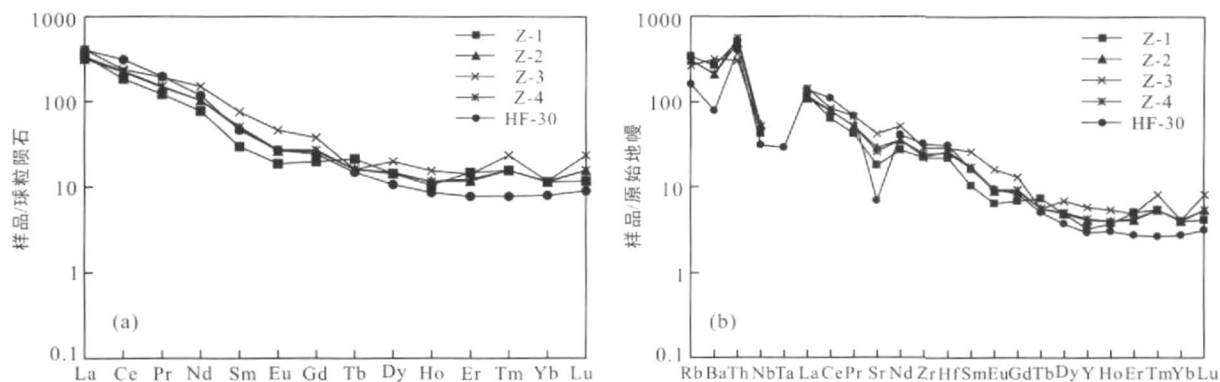


图 4 张士英岩体样品球粒陨石标准化的稀土元素模式图 (a)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (b)

Fig 4 Chondrite-norm alized REE patterns and primitive mantle norm alized trace element spider diagrams of the Zhangshiyang quartz syenite

滑型 (图 4a), 轻稀土明显富集, $(La/Sm)_N$ 值为 8~18, $(La/Yb)_N$ 比值为 28~50, 但重稀土分异较弱。Eu 负异常不显著, Eu/Eu^* 比值在 0.73~0.87 之间。

在微量元素对原始地幔标准化蛛网图中 (图 4b), 样品亏损 Ba, Sr, Nb, Ta, 而 Th, U, Zr, Hf 相对富集; $(Rb/Nb)_N$ 比值为 4.6~7.2, 明显高于大陆壳的 $(Rb/Nb)_N$ 比值 (2.2~4.7), 说明陆壳物质的贡献较大, 导致 Rb 的含量相对增大。岩石强烈富集大离子亲石元素和高场强元素, Ba, Sr 的显著亏损可能与斜长石的分离结晶有关; 岩石明显的 Nb, Ta 负异常表明岩浆来源较深, 可能发生在金红石相稳定区, 源区部分熔融时富 Nb, Ta 的矿物相如金红石和榍石等作为残留相存在 (赵振华, 2007)。

总体来说, 张士英石英正长岩属于中酸性的、准铝质的、钾玄质的石英正长岩。富集轻稀土元素等大离子亲石元素和高场强元素 (如 Zr, Hf)、Ba, Sr 亏

损, 这和该地区太山庙-叶庄-角子山 A 型花岗岩特征相似, 但是该岩体的 Eu 负异常不显著, 并具有显著的 Nb, Ta 亏损特征。

3.2 Sr-Nd 同位素特征

我们根据新获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 124Ma, 对文献中所报道的 Rb-Sr 同位素数据进行了重新计算 (张正伟等, 2000), 结果 (表 3) 表明 Sr 初始值 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 为 0.709 ± 0.003 , Rb/Sr 比值小于 0.42, 岩石较新鲜, 其 Sr 同位素初始比值反映其源区物质主要为壳源; 岩石 Nd 同位素组成亦清楚地表明其壳源特征, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -13.9~-19.9, 岩石样品的 Nd 模式年龄较年轻, 变化范围为 1.48~2.10Ga, Nd 模式年龄明显小于基底太华群的年龄, 表明岩浆不可能是区域基底简单部分熔融的结果, 在其形成演化过程中有年轻地幔物质的加入。

表 3 张士英岩体的 Nd 同位素组成

Table 3 Nd isotopic compositions of the Zhangshiyang quartz syenite

Sample No	Sm ($\mu g/g$)	Nd ($\mu g/g$)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2 σ	$\epsilon_{Nd}(t)$	$Nd_{DM}(Ga)$
张 Rb-10	3.380	21.08	0.09700	0.511536	20	-19.9	2.100
HF-30	7.115	55.14	0.07803	0.511828	7	-13.9	1.483

注: 张 Rb-10 数据引用张正伟等 (2000)。

4 讨论

4.1 岩体成因与源区

有关正长岩的成因及其地球动力学意义, 前人进行了大量的研究, 但也一直存在很多争议。正长岩的成因大致可以分成三类, (1) 壳源成因: 认为正长岩岩浆来源于高温高压条件下的长英质地壳物

质的部分熔融 (Huang and Wyllie, 1981); (2) 幔源成因: 认为正长岩岩浆是碱性玄武岩岩浆结晶分异的产物 (Yang et al., 2005); (3) 壳幔混源成因: 认为幔源硅不饱和的碱性岩浆和壳源花岗质岩浆混合形成或者壳幔混合岩浆发生结晶分异形成 (Zhao et al., 1995)。

张士英正长岩较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值 (平均

0.709) 和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素特征 ($\epsilon_{Nd}(t) = -13.9 \sim -19.9$) 以及相对贫放射性成因铅的 Pb 同位素特征 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.14 \sim 17.24$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.41 \sim 15.62$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.86 \sim 38.60$), 均表明岩体主要源于下地壳物质的部分熔融。较年轻的全岩 Nd 模式年龄表明有年轻地幔物质的加入。

其他学者对秦岭-大别造山带早白垩世花岗类的研究, 也指出其壳源特征, 但对源区地壳物质的性质具有不同的认识 (张本仁等, 2002; 周红升等, 2008)。张本仁等 (2002) 认为华北板块南缘晚燕山期花岗岩类为浅源深成因, 岩体为新元古变质火山岩俯冲下插到地壳部位发生部分熔融并可能与周围岩石形成混合岩浆。而周红升等 (2008) 通过对邻近张士英岩体的祖师顶-黄山-角子山花岗岩体 Nd 同位素以及岩体稀土特征的详细研究, 提出岩体可能是早期俯冲的北秦岭早元古代地层秦岭群负片麻岩部分熔融的产物。然而, 张士英岩体及其他早白垩世花岗岩贫放射性成因铅的特征与华北克拉通基底岩石相似 (张宏飞等, 1997), 源区不太可能是俯冲的秦岭群负片麻岩, 基本上可以排除扬子北缘俯冲地壳的部分熔融。

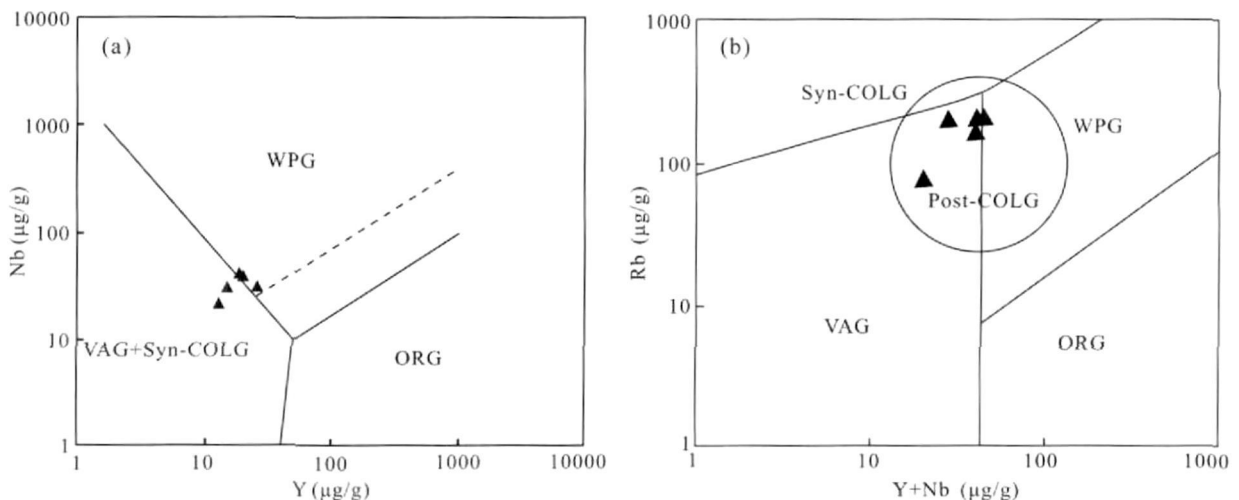
华北地壳主体形成于 2.5~3.8 Ga 的太古宙, 华北南缘太古宙基底太华群片麻岩-麻粒岩的 Nd 模式年龄为 2.50~2.93 Ga (李曙光等, 1987), 120 Ma 左右的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -25 (张本仁等, 2002)。而张士英岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -13.9~ -19.9, Nd 模式年龄 1.48~2.10 Ga, 说明岩体不可能是基底太华群部分熔融的产物。虽然部分熔融及岩浆结晶

分异过程中 Sm, Nd 的分馏可能导致 Nd 模式年龄稍稍年轻 (张本仁等, 2002), 但张士英岩体 Nd 模式年龄显著低于基底太华群的年龄, 这表明可能有年轻地幔物质的参与。另外, 有学者对该岩体中存在的包体做了云母与角闪石的矿物分析以及包体同位素组成特征的分析, 同样也证明了岩体形成过程中有富集地幔物质的参与 (向君峰, 2009); 岩体的 $Sr\text{-}Nd$ 同位素特征和大多数华北中生代花岗岩一致, 具有 BC1 源区特征 (张旗等, 2008), 这也反应了岩体形成过程中或形成源区中有新生地幔物质的加入。

张士英岩体的微量元素和同位素地球化学特征表明岩体主要源于下地壳物质的部分熔融但有年轻地幔物质的加入, 其显著亏损 Nb, Ta 的特征显示部分熔融发生的部位较深, 残留相中包含金红石和 (或) 榍石等矿物。

4.2 构造意义

前人研究表明, 碱性岩通常产于碰撞后、裂谷或板内伸展构造背景之下 (Bonin et al., 1998; Yang et al., 2005), 可提供碰撞后或者板内拉张背景下大陆岩石圈壳幔相互作用与岩浆演化过程等一些重要信息 (Barbarin, 1999; Mushkin et al., 2003)。花岗岩构造环境判别图解亦显示张士英岩体形成于碰撞后伸展环境 (图 5a 和 5b)。结合现有的早白垩世区域地球动力学演化有关研究成果, 该阶段的构造背景应为华北克拉通在中-晚侏罗世“多向汇聚”构造体制后大陆岩石圈伸展、岩石圈巨量减薄和克拉通破坏的重要时期 (Gao et al., 1996, 2003; 徐义



VAG. 火山弧花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; SYN-COLG. 同碰撞花岗岩。

图 5 花岗岩的 Y-Nb (a) 和 Rb-(Y+Nb) (b) 构造判别图解

Fig 5 Y vs Nb and Rb vs (Y+Nb) discrimination diagrams for the syenite (after Pearce et al., 1984 and Pearce, 1996)

刚, 2004; 2006; Wu et al., 2005; 陈斌等, 2005; 周新华等, 2005; 周新华, 2006; 路凤香等, 2006; Deng et al., 2007; 董树文等, 2007)。张士英岩体的形成可能与早白垩世巨厚岩石圈的垮塌、软流圈地幔玄武质岩浆上涌和底侵作用导致华北克拉通南缘下地壳物质的部分熔融及其与幔源玄武质岩浆混合有关。

早白垩世张士英正长岩及其他同期沿华北克拉通南缘分布的造山后 - 非造山花岗岩岩体的侵位, 说明当时的构造背景已由挤压转变为伸展体制; 这和整个华北东部早白垩世大面积花岗岩的形成时代一致, 反映了当时岩石圈的拆沉减薄以及岩石圈地幔的转型 (吴福元等, 2003; 林舸等, 2008)。同时, 早白垩世强烈的壳幔相互作用及火山 - 岩浆活动也与华北周缘大规模的金属成矿作用事件的时代相一致 (毛景文和王志良, 2000; Yang et al., 2003)。因此, 我们认为张士英岩体是早白垩世华北克拉通岩石圈伸展减薄、壳幔相互作用背景下的产物。

5 结 论

(1) 张士英岩体主体岩石为高碱、准铝质、钾玄质的石英正长岩; 岩石明显富集轻稀土等大离子亲石元素和高场强元素 (Zr/Hf); 岩石球粒陨石标准化模式呈平滑的右倾曲线, Eu 负异常不明显; 较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值 (平均值为 0.709) 和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-13.9 ~ -19.9) 表明岩浆主要源于下地壳物质的部分熔融; 岩石显著的 $Nb-Ta$ 亏损可能表明发生部分熔融的部位很深的金红石稳定区; 岩石较年轻的 Nd 模式年龄及包体组成表明有部分地幔物质的参与。

(2) 张士英岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(124.2 \pm 0.5) Ma$ 代表岩浆结晶年龄。岩体形成于早白垩世华北克拉通岩石圈伸展 - 减薄 - 改造的高峰时期; 随着巨厚岩石圈的垮塌和软流圈地幔的上涌, 底侵玄武质岩浆引发下地壳物质的部分熔融并发生玄武质岩浆与下地壳部分熔融所形成岩浆的混合等作用, 岩浆的上升、分异形成了具有 A 型花岗岩特征的张士英正长岩体。张士英岩体及其他同期 A 型花岗质岩浆岩的形成表明早白垩世强烈的壳幔相互作用。

致谢: 感谢河南省地质调查院白国典工程师在野外工作期间的支持、中国科学院广州地球化学研究所唐功建博士在室内分析方面的帮助和两位审稿老师提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References):

- 包志伟, 王强, 白国典, 赵振华, 宋要武, 柳小明. 2008 东秦岭方城新元古代碱性正长岩形成时代及其动力学意义. 科学通报, 53 (6): 64-694.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 荒川洋二. 2005 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. 岩石学报, 21 (1): 13-24.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴. 2007 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81 (11): 1449-1461.
- 李曙光, S R Hart, 郭安林, 张国伟. 1987 河南中部登封群全岩 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义. 科学通报, 22: 1728-1731.
- 林舸, 赵崇斌, 肖焕钦, 陈广浩, 闫义, 张德圣, 刘士林, 陈运平. 2008 华北克拉通构造活化的动力学机制与模型. 大地构造与成矿学, 32 (2): 133-142.
- 刘振宏, 王世炎, 张良, 杨长秀, 武太安, 崔霄峰. 2004 华北陆块南缘燕山期陆内造山岩浆活动特征. 地质调查与研究, 27 (1): 35-42.
- 路凤香, 郑建平, 邵济安, 张瑞生, 陈美华, 余淳梅. 2006 华北东部中生代晚期 - 新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. 地学前缘, 13 (2): 86-92.
- 毛景文, 王志良. 2000 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨. 矿床地质, 19 (4): 289-296.
- 邱家骥, 曾广策, 许继锋. 1990 秦巴地区碱性正长岩地质特征及含矿性. 北京: 地质出版社: 1-167.
- 孙枢, 从柏林, 李继亮. 1981 豫陕中晚元古代沉积盆地. 地质科学, 26 (4): 314-322.
- 王冬艳, 裴福萍, 许文良, 王清海, 杨德彬. 2005 华北地块南缘中段中生代花岗质岩石的 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年代学研究. 大地构造与成矿学, 29 (2): 262-268.
- 吴福元, 葛文春, 孙德友, 郭春丽. 2003 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10 (3): 51-60.
- 向君峰. 2009 河南中部张士英岩体的成因研究. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文.
- 徐义刚. 2004 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. 高校地质学报, 10 (3): 324-331.
- 徐义刚. 2006 太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关. 地球科学, 31 (1): 14-23.
- 杨德彬, 许文良, 王清海, 裴福萍, 纪伟强. 2007 蚌埠隆起区中生代花岗岩的岩石成因: 锆石 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 23 (2): 381-392.
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚. 2008 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 地质论评, 54 (5): 699-711.
- 曾广策. 1990 河南省嵩县南部碱性正长岩类的岩石特征及构造环境. 地球科学, 15 (6): 635-641.
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 韩吟文. 2002 秦岭造山带地球化学.

- 北京: 科学出版社: 1-187.
- 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 骆庭川, 陈岳龙. 1997 秦岭造山带花岗岩类长石铅同位素组成及其构造学意义. *地质学报*, 71 (2): 142-149
- 张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四. *岩石学报*, 24 (6): 1193-1204
- 张正伟, 卢欣祥, 董有. 1989 东秦岭花岗岩类岩石化学. *河南地质*, 7 (3): 56-77
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 谢静. 2002 东秦岭北部富碱侵入岩岩石化学与分布特征. *岩石学报*, 18 (4): 468-474
- 张正伟, 朱炳泉, 常向阳. 2000 东秦岭北部富碱侵入岩钕、锶、铅同位素特征及构造意义. *地球化学*, 29 (5): 455-461
- 赵振华. 2007 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题. *大地构造与成矿学*, 31 (1): 92-103
- 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩类: 年代学, 地球化学及其启示. *岩石学报*, 24 (1): 49-64
- 周新华, 张宏福, 英基丰, 陈立辉. 2005 大陆俯冲后效作用的地球化学记录——中生代岩石圈地幔源区特征变异的讨论. *岩石学报*, 21 (4): 1255-1263
- 周新华. 2006 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. *地学前缘*, 13 (2): 50-64
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605-626
- Bonin B, Azzouni-Sekka I A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45: 45-70
- Deng J F, Su S G, Ni Y L, Liu C, Zhao G C, Zhao X G, Zhou S and Wu Z X. 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96: 22-35
- Huang W L and Wyllie P J. 1981. Phase relationships of S-type granite with H₂O to 35 kbar. Muscovite granite from Harney peak, South Dakota. *Journal of Geophysical Research*, 86: 10515-10529
- Gao S, Kern H, Jin Z M, Zhang H F and Zhang B R. 2003. Poisson ration of eclogite: Implication for lower crustal delamination of orogens. *Science in China (D)*, 46: 909-918
- Gao S, Zhang B R and Wang D P. 1996. Geochemical evidence for the Proterozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze cratons. *Precam Res*, 80: 23-48
- Li Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu K J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34-43
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology center special publication*, 4: 1-70
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol Soc Am Bull*, 101 (5): 635-643
- Mushkin A, Navon O, Halicz L, Hartmann G and Stein M. 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, Southern Israel. *J Petrol*, 44: 815-832
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25 (4): 956-983
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120-125
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O and Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *EPSL*, 233: 103-119
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib Mineral Petrol*, 58: 63-81
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostand Newsl*, 28: 353-370
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H and Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 214: 99-125
- Yang J H, Wu F Y and Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 23: 125-152
- Zhao J X, Shimizu K, Ellis D J and Sheraton J W. 1995. Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamoto mountains, East Antarctica: Implication for the origin of syenitic magmas. *Geochim Cosmochim Acta*, 59: 1363-1385

LA-ICPMS Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of the Zhangshiying Syenite From South of Wuyang Henan Province

LI Chuangju and BAO Zhiwei

(Key Laboratory for Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 Guangdong, China)

Abstract The Zhangshiying syenite is located to the south of Wuyang Henan Province and tectonically on the southern margin of the North China craton. The syenite intrusion consists mainly of quartz monzonite and quartz syenite. The rocks are of metaluminous and high-K-shoshonitic ($Al_2O_3 = 14.8\% \sim 16.7\%$, $Al/CNK = 0.98 \sim 1.10$, $K_2O/Na_2O = 1.00 \sim 1.43$), which are rather high in rare earth elements (ranging from $261.7 \mu g/g$ to $381.0 \mu g/g$), and characterized by relative enrichment of LREE with $(La/Yb)_N$ ratio of $28 \sim 50$ and weak negative Eu anomalies ($Eu/Eu^* = 0.73 \sim 0.87$), and show smooth right dipping chondrite normalized REE patterns. The rocks are significantly depleted in Sr, Ba, Nb, Ta and relatively enriched in Th and U. The isotopic compositions of the rocks strongly suggest a crustal origin regarding the high $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ ratios (0.709), low $\epsilon_{Nd}(t)$ value ($-13.9 \sim -19.9$) with Nd model ages range from $1.48 Ga$ to $2.10 Ga$. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating gives a crystallization age of $(124.2 \pm 0.50) Ma$. The syenite was formed in early Cretaceous under large-scale lithospheric thinning and transformation tectonic regime of the North China craton. Trace elements and isotopic characteristics of the rocks suggest that the magma was generated through partial melting of the lower crust with involvement of juvenile mantle material. The syenite might have been formed through partial melting of the lower crust coupled with involvement of juvenile mantle material and high degree fractional crystallization, which was triggered by underplating of asthenospheric magma under the extensive extension and lithospheric thinning tectonic settings.

Keywords syenite; Early Cretaceous; lithospheric thinning; North China Craton; Zhangshiying; Henan Province