

南秦岭宁陕地区花岗岩类 Pb Sr Nd 同位素组成及其深部地质信息

张宏飞 欧阳建平 凌文黎

(中国地质大学地球化学研究所, 武汉 430074)

陈岳龙

(中国地质大学地质矿产系, 北京 100083)

主题词 南秦岭 宁陕岩体群 同位素示踪 岩浆源区 深部地壳组成

提要 本文报道了南秦岭印支期(—200Ma)宁陕岩体群中8个花岗岩类岩体的Pb Sr Nd同位素组成。宁陕岩体群花岗岩类岩石以低放射成因Pb同位素组成为特征,初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$),比值变化于0.70495—0.70908之间, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化于-2.41—-8.55之间, Nd同位素模式年龄(T_{DM})变化于1.20—1.71Ga之间,从该岩体群的东部到西部,呈现 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 逐渐降低而 T_{DM} 逐渐增高的规律变化。宁陕岩体群的岩浆源区主要来自于南秦岭的深部地壳,在岩浆源区中,类似南秦岭耀岭河群的基性火山岩占有主要比例,南秦岭较古老的地壳物质仅有少量参与,然而,从该岩体群的东部到西部,这种古老地壳物质参与比例逐渐增高。根据花岗岩对深部地壳物质组成的指示,佛坪穹窿的深部地壳主要由垫托于佛坪群之下的晚元古代基性岩浆物质组成。从该穹窿的东部到西部,地壳深部含有古老地壳物质的比例逐渐增高,由此反映佛坪穹窿的深部地壳物质呈现出东西分带,具南北向构造,这不同于佛坪穹窿地表浅部物质的环形分布特征。

在秦岭造山带的演化过程中,南秦岭发育于扬子克拉通北部边缘从震旦到早古生代的被动大陆边缘,并于印支期与华北板块发生陆-陆碰撞^[1]。在此过程中,南秦岭有大量的花岗岩类岩浆活动,其中以宁陕岩体群最为引人注目。自八十年代以来,该岩体群的地质、岩石学及矿物学特征已得到较为详细的研究^[2,3],并且有关该岩体群的岩石元素地球化学特征也得到了系统的总结^[4]。而有关该岩体群成岩物质来源的同位素示踪研究仅有零星报道^[5]。先前的岩体成因模型认为宁陕岩体群是陆壳碎屑物质改造的产物^[2,3],形成于大陆碰撞的构造环境,属碰撞型花岗岩类^[4],然而,南秦岭这类碰撞型花岗岩主要为钙碱性准铝质岩石,大部分岩石 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,在岩石地球化学类型上主要属I型花岗岩类,少数具有I-S型过渡类型^[4]。这些特征清楚地表明南秦岭这类碰撞型花岗岩不同于世界其它地区的碰撞型花岗岩^[6,7],具有明显的特殊性。为查明这一特殊性,本文在系统研究宁陕岩体群主要岩体花岗岩类岩石Pb Sr Nd同位素地球化学特征的基础上,分析了这些花岗岩类岩石的成岩物质来源,同时根据花岗岩类岩石对地壳深部物质组成的示踪,对南秦岭深部地壳的组成及性质作出限制。

本文为地矿部开放研究实验室基金和自然科学基金及国家教委基金资助项目的一部分。

本文于1996年6月来稿,1996年9月改回。

1 地质简述

研究区位于秦岭商丹断裂和巴山弧型断裂之间的南秦岭造山带中,西起陕西勉略地区,东至陕西宁陕地区(图 1)。在该范围内,从西向东,出露有光头山(面积 900km²)、留坝(面积 60km²)、西坝(面积 135km²)、华阳(面积 420km²)、五龙(面积 1800km²)、东河台子(面积 107km²)、老城(面积 520km²)和胭脂坝(面积 530km²)等岩体,总面积达 5000km²左右,前人称该岩体群为宁陕岩体群^[2]。在岩石类型上,留坝、西坝、东河台子和老城岩体主要为石英闪长岩,少量为花岗闪长岩;华阳和胭脂坝岩体为二长花岗岩,光头山岩体为黑云母斜长花岗岩。以上岩石均为块状构造,中细粒—中粗粒花岗结构。而五龙岩体岩性变化多样,见有黑云母斜长花岗岩、花岗闪长岩和二长花岗岩等,岩石具有弱片麻状构造(前人称之为混合花岗岩^[2])。宁陕岩体群的北部围岩主要为泥盆系砂岩、灰岩、片岩和大理岩等,南部围岩主要为寒武纪到石炭纪地层,其中以泥盆纪地层为主,岩性包括砂岩、片岩、板岩、千枚岩、灰岩、白云质灰岩和大理岩等。在五龙岩体内部分布有佛坪群,岩性主要为黑云母斜长片麻岩,少量斜长角闪岩。上述岩体除五龙岩体与围岩同时见有侵入接触关系和混合过渡关系外,其余岩体与围岩均为侵入接触。据地质观察和推断^[2],西坝、留坝、东河台子和老城岩体为早期岩浆活动的产物,而光头山、华阳、五龙和胭脂坝岩体为晚期岩浆活动的产物。同位素地质定年表明,西坝、光头山、华阳和胭脂坝岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 220Ma、198Ma、188Ma 和 243Ma,并且上述岩体经统一的 U-Pb 等时线处理获得年龄为 202Ma^[3]。新近获得的留坝、西坝和光头山岩体的锆石年龄介于 205—215Ma 之间(李曙光,私人通讯),胭脂坝和老城岩体的全岩 Rb-Sr 等时年龄分别为 183±2Ma 和 182±51Ma^①。以上可见,宁陕岩体群是印支期岩浆活动的产物,与地质分析相一致。

在宁陕岩体群的内部及周边地区,分布有许多前寒武纪的岩块,其中包括位于宁陕岩体群西南部的鱼洞子群、碧口群,位于宁陕岩体群五龙岩体内部的佛坪群和位于宁陕岩体群东部的郧西群和耀岭河群,它们构成了南秦岭的基底^[1]。

2 样品测试

本文中花岗岩类及有关岩石的 Pb、Sr、Nd 同位素样品均由笔者在地矿部“壳幔体系组成、物质交换及动力学研究”开放实验室制备,并在该实验室 MAT-261 质谱仪上完成测试。Pb 同位素比值的测试精度为 0.1%,NBS981 的测定值: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.91449\pm 25(2\sigma)$; $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值的精度好于 0.5%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的精度好于 0.004%,Sr 同位素比值的质谱分馏校正采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$,NBS987 标样的测定值: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71025\pm 2$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 的精度好于 0.1%, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的精度好于 0.002%,Nd 同位素比值的质谱分馏校正采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$,GBW04411(国家标样)的测定值: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512740\pm 8$,La Jolla 的测定值: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511860\pm 10$ 。花岗岩类的 Sr 同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i和 Nd 同位素初始比值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i采

① 张宗清,秦岭造山带重大地质事件年表,1996。

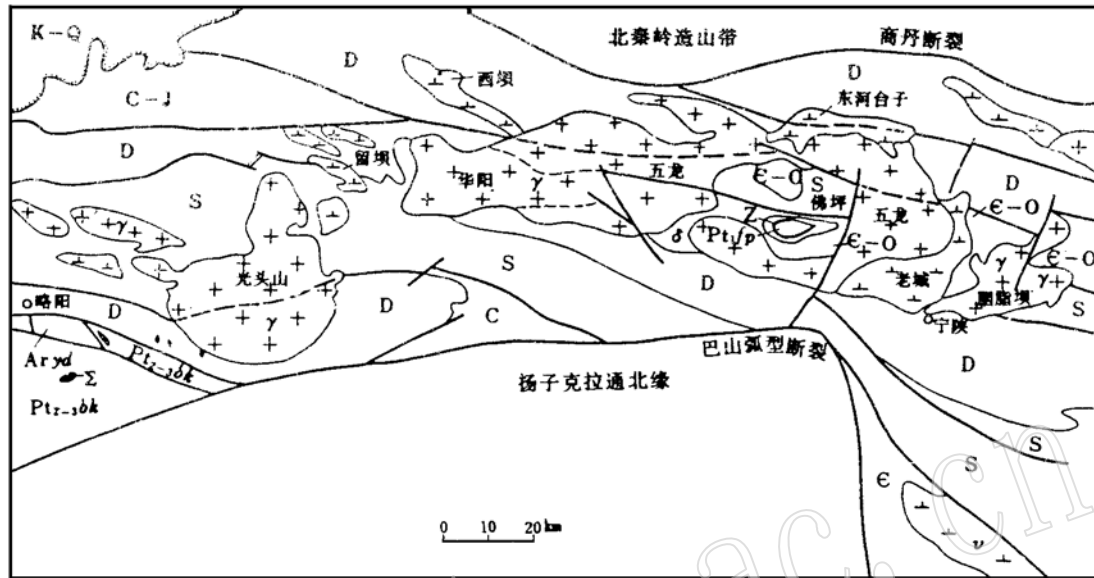


图1 南秦岭宁陕—略阳地区地质图 (据文献 [8] 简化)

Fig. 1 Geological map of Ningshan Lueyang area of South Qinling

K-Q- 白垩系-第四系; C-J- 石灰系-侏罗系; D- 泥盆系; S- 志留系; E-O- 寒武系-奥陶系; Z- 震旦系; Pt_{2-3k}- 中晚元古宙碧口群; Pt₁₆- 早元古宙佛坪群; Ar_{yd}- 太古宙鱼洞子2; γ- 二长花岗岩、斜长花岗岩、黑云母花岗岩; υ- 石英闪长岩、花岗岩长岩; Σ- 基性、超基性岩; - - - 实测和推测断层; —— 地质界线

用 $t = 200\text{Ma}$ 作一计算, 其中 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 计算为 ϵ 单位, 在 20Ma 的年龄误差范围内, 计算的 Nd 同位素初始比值一般小于 0.3 个 ϵ 单位, 计算参数为 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(0) = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}(0) = 0.1967$ 。考虑到花岗岩类岩石在岩浆过程中 Sm/Nd 比值的分馏, 用二阶段模式计算相对于亏损地幔的 Nd 同位素模式年龄 (T_{DM}), 计算公式^[9]:

$$T_{\text{DM}} = (1/\lambda) \times \ln \left[1 + \frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} - (e^{\lambda t} - 1) [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}}] - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}}{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}} \right]$$

式中: $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.21357$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} = 0.12$, $\lambda = 0.654 \times 10^{-11}$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}}$ 和 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}}$ 分别为样品的测定值。其它岩石的 T_{DM} 计算采用单阶段模型。

3 结果

宁陕岩体群花岗质岩石及其有关岩石的 Pb Sr Nd 同位素组成分别列于表 1 和表 2。

表 1 宁陕岩体群花岗岩全岩及长石 Pb 同位素组成

Table 1 Pb isotopic composition of granite whole rock and feldspar samples from the Ningshan rock body group

岩体	样号	岩石类型	测定对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
胭脂坝	Yzb- 8	二长花岗岩	全岩	17. 781 ±14	15. 485 ±12	37. 709 ±31
老城	Lc- 5	石英闪长岩	长石	17. 613 ±15	15. 442 ±11	37. 527 ±20
东河台子	Dh- 2	石英闪长岩	全岩	18. 040 ±6	15. 507 ±5	37. 787 ±13
五龙	W- 5	斜长花岗岩	全岩	17. 834 ±20	15. 441 ±17	37. 557 ±42
五龙	9423	二长花岗岩	长石	17. 359 ±13	15. 410 ±11	36. 829 ±27
华阳	Hy- 8	二长花岗岩	全岩	17. 914 ±7	15. 507 ±6	37. 800 ±15
西坝	Xb- 8	石英闪长岩	全岩	17. 942 ±29	15. 477 ±25	37. 856 ±64
留坝	Lb- 8	石英闪长岩	全岩	17. 968 ±30	15. 456 ±24	37. 665 ±58
光头山	Gt- 9	斜长花岗岩	长石	17. 801 ±12	15. 404 ±10	37. 544 ±25
光头山	9411	斜长花岗岩	长石	17. 615 ±10	15. 510 ±9	37. 287 ±22

3.1 Pb 同位素

花岗岩全岩的 Pb 同位素组成代表岩石现今的 Pb 同位素比值, 而花岗岩中长石 Pb 的同位素组成则近似代表岩浆结晶时的 Pb 同位素初始比值^[10]。由表 1 可见, 宁陕岩体中五龙、华阳、东河台子、西坝、留坝和胭脂坝岩体全岩具有较为相似的 Pb 同位素组成, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值仅变化于 17. 781—18. 040, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 15. 444—15. 507, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 37. 557—37. 865。从该岩体群五龙、光头山和老城岩体中长石 Pb 同位素组成看, 它们亦具有较为相似的 Pb 同位素组成, 其中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 17. 359—17. 801, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 15. 410—15. 510, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化于 36. 829—37. 527。宁陕岩体群花岗质岩石全岩与长石同位素组成比较, 前者略高放射成因 Pb, 后者相对贫放射成因 Pb, 反映全岩含有微量的 U 和 Th 组分, 然而总体特征显示宁陕岩体群以低放射成因 Pb 同位素组成为特征。

3.2 Sr 和 Nd 同位素

宁陕岩体群花岗质岩石在 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图上 (图 2), 样品间的相关关系不好, 说明各岩体可能并不是岩浆统一演化的产物, 大部分样品位于 200Ma 参考等时线的上方 (取岩石初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 比值为 0. 706)。在 $t=200\text{Ma}$ 时, 计算的宁陕岩体群中各岩石的初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 比值表明 (表 2), 除了留坝岩体石英闪长岩为 0. 70908 外, 其余岩体岩石变化于 0. 70495—0. 70743 之间, 不同岩石类型之间和在空间上, 初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 比值无明显差异。老城、西坝和留坝岩体岩石的初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 比值与黄萱报道的结果 (分别为 0. 70518、0. 70678 和 0. 70766) 基本一致 (用 $t=200\text{Ma}$ 重新计算)^[5]。

宁陕岩体群花岗质岩石在 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}-^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图上 (图 3) 同样没有出现样品间的相关关系。在 $t=200\text{Ma}$ 时, 计算的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 (表 2) 具有较宽的变化范围。 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 最低值出现在西部光头山岩体黑云母斜长花岗岩中 (其中 2 个样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 - 2. 41 和 - 4. 04), 其它岩体的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于上述两岩体之间。西坝、留坝、老城和胭脂坝岩体的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值亦与黄萱报道的结果 (各岩体 1 个样品分别为 - 7. 83、- 6. 29、- 5. 19 和 - 3. 89)

表2 宁陕岩体群花岗岩类和其它有关岩石的 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of granitoids and other related rocks in the Ningshan rock body group

岩体或岩群	样号	岩类	Rb (10^{-6})	Sr (10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)^*$	T_{DM}^{**} (Ga)
胭脂坝	Yzb-8	1	170	310	1.5493	0.71051 ± 3	0.70610	4.70	28.2	0.1031	0.512308 ± 10	-4.05	1.33
胭脂坝	Yzb-6	1	128	300	1.2071	0.70903 ± 2	0.70559	4.84	26.5	0.1152	0.512408 ± 20	-2.41	1.20
老城	Lc-8	2	128	896	0.4030	0.70624 ± 3	0.70510	3.54	21.8	0.1022	0.512287 ± 9	-4.44	1.37
老城	Lc-5	2	116	849	0.3853	0.70649 ± 2	0.70539	4.04	25.9	0.09853	0.512253 ± 12	-5.01	1.41
东河台子	Dh-2	2	128	805	0.4483	0.70878 ± 6	0.70751	4.59	24.5	0.1181	0.512258 ± 14	-5.41	1.45
五龙	Wl-5	3	219	279	2.2218	0.71227 ± 4	0.70596	4.59	26.4	0.1116	0.512290 ± 8	-4.61	1.38
五龙	9423	1	201	307	1.8507	0.71021 ± 3	0.70495	6.26	36.6	0.1079	0.512286 ± 9	-4.60	1.38
华阳	Hy-8	1	109	529	0.5808	0.70773 ± 4	0.70608	1.30	5.7	0.1433	0.512257 ± 15	-6.07	1.50
西坝	Xb-8	2	136	563	0.6812	0.70858 ± 2	0.70664	3.22	19.0	0.1068	0.512168 ± 9	-6.88	1.57
留坝	Lu-8	2	84	643	0.3707	0.71014 ± 2	0.70908	2.08	11.2	0.1175	0.512148 ± 9	-7.54	1.62
光头山	Gt-13	3	115	587	0.5526	0.70802 ± 4	0.70644	2.30	12.7	0.1143	0.512103 ± 10	-8.34	1.69
光头山	Gt-9	3	148	551	0.7588	0.70959 ± 2	0.70743	2.90	15.1	0.1210	0.512101 ± 18	-8.55	1.71
佛坪群	93186	4						11.40	60.1	0.1145	0.511826 ± 14	-13.75	1.86
佛坪群	93187	4						4.16	21.6	0.1165	0.511962 ± 24	-13.75	2.03
鱼洞子群	93207	4	72	322	0.6322	0.73032 ± 2	0.72852	3.81	19.4	0.1236	0.511304 ± 10	-24.17	3.11
鱼洞子群	93114	5	0.44	584	0.0021	0.71491 ± 1	0.71491	0.20	0.9	0.1353	0.511719 ± 12	-16.37	2.77
鱼洞子群	93237	6	17	595	0.0798	0.70502 ± 2	0.70479	0.44	2.3	0.1221	0.511222 ± 12	-25.73	3.19

岩石类型: 1 二长花岗岩; 2 石英闪长岩; 3 斜长花岗岩; 4 黑云斜长片麻岩; 5 斜长角闪岩; 6 变粒岩

* ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 采用 $t = 2000\text{Ma}$ 作统一计算; ** T_{DM} 的计算见文中说明。

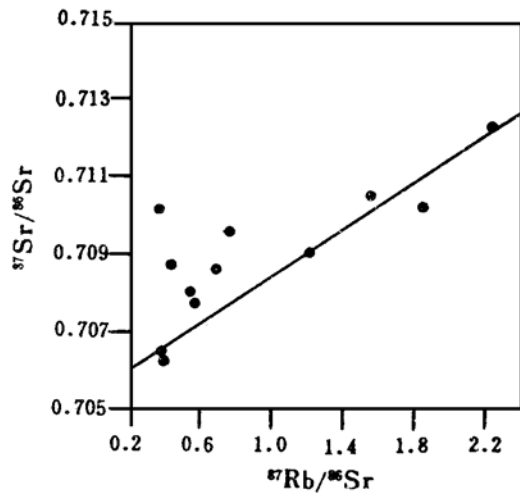


图 2 宁陕地区花岗岩类 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图
Fig. 2 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram
of granitoids in Ningshan area

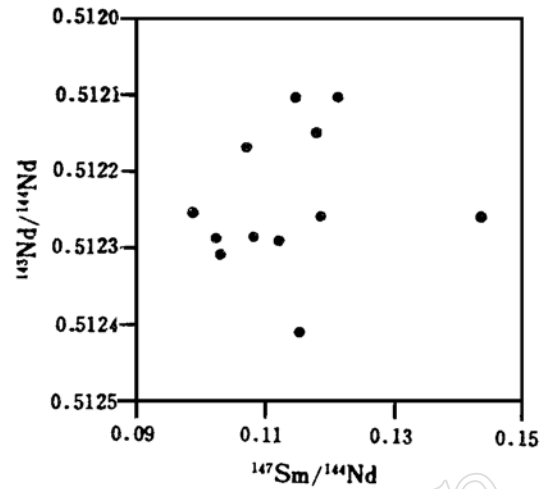


图 3 宁陕地区花岗岩类 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图
Fig. 3 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
diagram of granitoids in Ningshan area

基本一致(用 $t = 200\text{Ma}$ 重新计算)^[5]。宁陕岩体群花岗质岩石的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值与岩石类型的关系并不密切。然而, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 的空间变化是相当明显的。从宁陕岩体群的东部到西部, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值从胭脂坝(- 2.40 和 - 4.04) — 老城(- 4.44 和 - 5.01) — 五龙(- 4.62 和 - 4.60) — 东河台子(- 5.41) — 华阳(- 6.07) — 西坝(- 6.88) — 留坝(- 7.54) — 光头山(- 8.34 和 - 8.55) 出现逐渐降低的规律变化。宁陕岩体群花岗质岩石的 Nd 同位素模式年龄(T_{DM}) 介于 1.20—1.70Ga 之间, 同样出现由东向西逐渐增高的规律变化。

4 讨论

4.1 岩浆物质来源

宁陕岩体群花岗质岩石全岩和长石以低放射成因 Pb 同位素组成为特征, 在图 4 中, 样品点清楚地位于下地壳 Pb 同位素组成范围内, 与位于南秦岭泥盆系中沉积黄铁矿的 Pb 同位素组成(3 个样品的平均 Pb 同位素组成: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 19.471$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.660$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.200$)^[4] 相比, 两者存在很大的差别。另一方面, 宁陕岩体群与东部同属印支期的南秦岭东江口岩体群相比, 两者具有非常相似的长石 Pb 同位素组成(后者 5 个长石样品的平均 Pb 同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.530$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.439$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.527$), 而后者已经多元同位素示踪研究证明岩浆物质来自于下部地壳^[12]。因此, 从 Pb 同位素组成特征看, 宁陕岩体群的岩浆物质应来自于地壳深部。

宁陕岩体群花岗质岩石具有较低的初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值(留坝岩体为 0.70908, 其它岩体变化于 0.70495—0.70751 之间), 反映岩浆主要来自于幔源派生物质或地壳中成熟度不高的基性火成物质, 这与宁陕岩体群花岗质岩石具有 I 型花岗岩的地球化学特征相一致^[4]。同时, 宁陕岩体群花岗质岩石 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 具有较低的负值(变化于 - 2.41— - 8.84), 清楚地揭示岩浆应主要来自于地壳物质。这方面可从 Nd 同位素模式年龄(T_{DM}) 作进一步考察, 宁陕岩体群花岗质岩石的 T_{DM} 值(变化于 1.20—1.71Ga 之间) 明显大于该岩体群的形成时代(200Ma 左右),

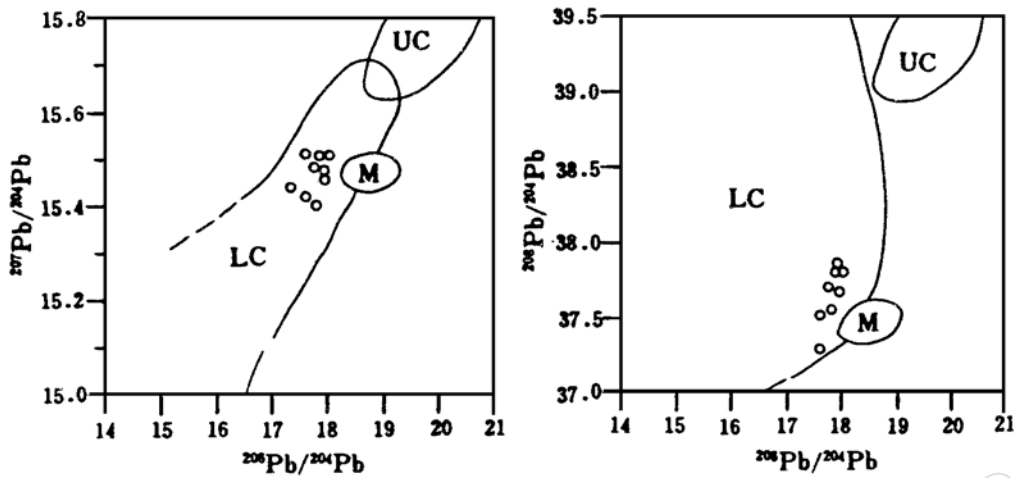


图 4 宁陕地区花岗岩类全岩和长石 Pb 同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig. 4 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of granitoid whole rock and feldspar samples of Ningshan area (UC, LC 和 M 分别代表上地壳、下地壳和地幔, 其 Pb 同位素组成范围据文献 [11])

这同样反映宁陕岩体群的岩浆应主要来自于地壳物质, 同时指示这种岩浆源区物质在地壳中的存留时代大约在中晚元古代。

在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ — $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 关系图上 (图 5), 宁陕岩体群花岗质岩石均分布于第 IV 象限。这除了反映岩浆物质来自于地壳外, 同时在样品点展布上还反映岩浆源区中具有两端员 (或两端员) 的混合趋势。对于这种混合趋势, 有两种不同的解释: (1) 岩浆源区中直接参与的地幔物质和地壳物质的混合; (2) 岩浆源区中不同地壳物质的混合。对于情况 (1), 考虑到南秦岭总体上在前印支期处于被动大陆边缘, 而在被动陆缘上的壳幔交换是较弱的, 同时考虑到在印支期宁陕岩体群形成于大陆碰撞的构造环境^[4], 从形成机制上讲, 宁陕岩体群是由于陆-陆碰撞引起地壳增厚而诱发的地壳物质部分熔融的产物, 因此在这种构造背景下地幔物质直接参与岩浆形成的可能性是很小的, 区内缺乏相近时代的火山岩浆活动也可有力地证明这一点。由此看来, 在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ — $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 关系图上所出现的混合趋势主要反映岩浆源区中不同地壳物质组成端员的混合。

在南秦岭基底岩石中, 分布于宁陕岩体群西南侧的鱼洞子群 ($2688 \pm 84\text{Ma}$, Sm-Nd; $2657 \pm 9\text{Ma}$, U-Pb)^① 是南秦岭目前出露最古老的岩块, 由表 2 数据看, 在相当于宁陕岩体群形成时 ($t = 200\text{Ma}$), 该岩块中黑云母斜长片麻岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.72852$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -24.31$, $T_{\text{DM}} = 3.11\text{Ga}$; 变粒岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.70502$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -25.73$, $T_{\text{DM}} = 3.19\text{Ga}$; 斜长角闪岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.71491$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -16.37$, $T_{\text{DM}} = 2.77\text{Ga}$ 。由此可见, 鱼洞子群岩石不可能作为宁陕岩体群岩浆的主要源区物质, 位于宁陕岩体群五龙岩体内部的佛坪群 (1900Ma , Sm-Nd)^②,

① 张宗清, 秦岭造山带重大地质事件年表, 1996。

其主要由黑云母斜长片麻岩类岩石组成, 在 $t = 200\text{Ma}$ 时, 计算得到 2 个片麻岩类样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 -13.75 和 -11.14 , T_{DM} 值分别为 2.03Ga 和 1.86Ga (表 2), 显然, 佛坪群岩石也不可能作为宁陕岩体群花岗岩类的主要源岩。位于宁陕岩体东部的陕西群火山岩 ($1010 \pm 41\text{Ma}$, Sm-Nd, $\epsilon\text{Nd}(1010) = +5.8 \pm 0.4$)^[5] 和耀岭河群火山岩 ($1019 \pm 81\text{Ma}$, Sm-Nd, $\epsilon\text{Nd}(1019) = +5.8 \pm 0.4$) 为同时同源的产物, 根据黄萱资料^[5] 计算, 在 $t = 200\text{Ma}$ 时, 耀岭河群基性火山岩 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 在 0.7058 左右, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化于 -2.50 — 4.00 之间, T_{DM} 变化于 1.26 — 1.43Ga 之间, 这与宁陕岩体群花岗岩质岩石 Sr、Nd 同位素示踪的源区组成相接近。上述资料还表明, 从南秦岭的东部到西部, 随着基底岩石的形成时代逐渐偏老, 基底岩石的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值逐渐降低, T_{DM} 值逐渐增高的规律变化是相当明显的, 这与宁陕岩体群花岗质

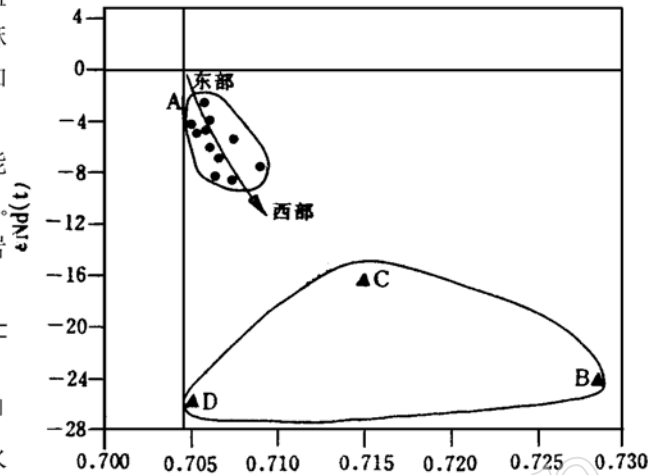


图 5 宁陕地区花岗岩类 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 关系图 ($t = 200\text{Ma}$)

Fig. 5 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ diagram of granitoids Ningshan area

(图中黑圆点为宁陕地区花岗岩类, A(黑方块)代表耀岭河群基性火山岩(据文献[5]资料计算), B、C和D(黑三角)分别代表鱼洞子群黑云母斜长片麻岩、斜长角闪岩和变粒岩)

岩石从东部到西部 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 和 T_{DM} 的变化规律相一致。这种偶合性有力地说明宁陕岩体群的岩浆源区物质组成主要受南秦岭基底物质所控制。由于缺乏与图 5 中端员 A 相配套的 Sr 和 Nd 元素含量数据, 因此尚不能进行简单两端员混合计算, 但从图 5 不难判断, 在宁陕岩群花岗质岩浆源区中, 类似耀岭河群基性火山岩的端员物质(图 5 中 A) 占主要组成比例, 而相对更古老的地壳物质(如鱼洞子群物质) 参与岩浆形成的比例不高。然而从宁陕岩体群的东部到西部, 岩浆源区中这种古老地壳物质的组成比例逐渐增高。以上宁陕岩体群岩浆源区分析表明, 由于岩浆源区中含有较高比例的类似耀岭河群的基性岩浆物质, 从而造成这类碰撞型花岗岩在地球化学特征上不同于其它地区主要由地壳碎屑物质熔融而成的碰撞型花岗岩。

4.2 佛坪穹窿的地壳深部组成

地表地质研究表明^[1], 早元古代佛坪群(Pt_1) 是佛坪椭圆形穹窿构造的核部, 其上缺失中、上元古代地层, 周边直接被震旦—泥盆系所披盖, 它又是个深层岩浆活动的中心, 同时还是个变质热中心, 从核部向外, 不受岩层和时代控制, 变质级别由高角闪岩相至低绿片岩相依次围绕穹窿成环带分布。然而, 对佛坪穹窿构造的深部地壳物质组成目前尚缺乏足够的了解。

现有研究已揭示^[13-15], 花岗质岩浆的形成主要是由于各种地质作用所诱发的大陆地壳物质部分熔融的产物, 其岩浆产生的主要场所是在中下地壳, 这在实验岩石学已得到证明^[16], 本文上述研究也已证明了这一点。因此, 花岗岩类是了解地壳深部物质组成的一个重要窗口, 根据花岗岩的同位素示踪可为岩石圈深部地质研究开辟一条新的途径而受到人们的重

视^[17-20]。

根据上述对宁陕岩体群花岗质岩石岩浆源区的同位素示踪研究,佛坪穹窿的核部佛坪群在岩浆源区中的贡献是较小的,而在岩浆源区中占主要比例的是类似耀岭河群基性岩浆物质,这表明佛坪群仅构成佛坪穹窿的上部地壳部分,在该穹窿的深部其分布是较为有限的,而在佛坪群地壳之下的深部地壳中,大量的应是类似耀岭河群基性岩浆物质(Pt_3)。由于这类物质在形成时代上明显晚于佛坪群(Pt_1)的形成时代,从而表明这类物质除了在东部以火山喷发的形式形成耀岭河群和隕西群火山岩外,在佛坪群之下这类物质当时是以岩浆底侵的方式加入到地壳中的。这一时期南秦岭地壳处于裂隙拉张期^[1,4],在这种构造体制下,地壳拉伸岩浆垫托是极为可能的。鉴于宁陕岩体群在岩浆源区物质组成上出现由东向西的规律变化,而并未出现类似佛坪穹窿地表物质组成的环形变化,从而认为佛坪穹窿深部地壳的物质分布形态不同于浅部地壳的物质分布形态。从佛坪穹窿的东部到西部,深部地壳中古老地壳物质的比例逐渐增大,由此反映的是东西向物质分带,具南北向构造,并表明在西部存在古陆核,这与西部存在着南秦岭最古老的岩块鱼洞子群是相符合的。

5 结论

(1) 宁陕岩体群花岗质岩石的 Pb、Sr、Nd 同位素地球化学特征表明岩浆源于深部地壳物质,在源区物质组成上,类似于南秦岭基底岩石中的耀岭河群基性火山岩占主要比例,而南秦岭基底中更古老的岩石物质仅有少量加入,从宁陕岩体群的东部到西部,岩浆中这种古老地壳物质加入的比例逐渐增高,并指示着宁陕岩体群的西部存在着古陆核。

(2) 具有碰撞型地质特征的宁陕岩体群花岗质岩石,在地球化学特征上不同于世界其它地区的碰撞型花岗岩,其原因在于宁陕岩体群岩浆物质中,含有较高比例的存留于地壳中的基性岩浆物质,从而不同于主要由地壳碎屑物质熔融而成的世界其它地区的碰撞型花岗岩。

(3) 根据花岗质岩石对佛坪穹窿深部地壳物质组成的示踪,位于佛坪穹窿核部的佛坪群在地壳深部是较为有限的,而在深部地壳中主要由垫托于佛坪群之下的晚元古代基性岩浆物质组成,物质组成类似于南秦岭耀岭河群基性火山岩。在深部地壳物质的分布形态上,主要反映东西向分带,南北向构造,而并未出现佛坪穹窿地表物质的环形分布形态特征。

参 考 文 献

- 1 张国伟,孟庆任. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学 B 辑, 1995.
- 2 严阵. 陕西省花岗岩. 西安: 西安交通大学出版社, 1985, 1- 321.
- 3 李先梓, 严阵, 卢欣洋. 秦岭-大别山花岗岩. 北京: 地质出版社, 1992, 1- 218.
- 4 张本仁, 骆庭川, 高山等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究, 武汉: 中国地质大学出版社, 1994, 1- 446.
- 5 Huang Xuan and Wu Liren. The study on the granitoids in Shanxi Province by Nd/Sr isotopes. In: Advances in Geosciences, China Ocean Press, Beijing, 1992, 211- 219.
- 6 Picher WS. Granites and yet more granites forty years on. Geologische Rundschau. 76(1): 51- 79.
- 7 Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrology, 25(4): 956- 983.
- 8 张二册, 1: 100 万秦岭-大巴山-大别山地质图. 地质出版社, 1992.

- 9 Liew TC, Hofmann AW. Precambrian crustal components, plutonic associations plate environment of the Hercynian Fold Belt of Central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study: *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 98: 129– 138.
- 10 张理刚. 长石铅和矿石铅同位素组成及其地质意义. *矿床地质*, 1988, 7(2): 55– 64.
- 11 Zartman RE, Doe BR. Plumbotectonics the model. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135–162.
- 12 张宏飞, 张本仁, 赵志丹等. 东秦岭商丹构造带陆壳的俯冲和碰撞: 花岗岩岩浆源区同位素示踪证据, *中国科学 D 辑*, 1996, (3).
- 13 Taylor S R and McLenna S M. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985, 1– 312.
- 14 Vellmer C, Wedepohl K H. Geochemical characterization and origin of granitoids from the South Bohemian Batholith in Lower Austria. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 118: 13– 32.
- 15 Clemens J D, Vielzeuf D. Constraints on melting and magma production in crust, *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 86: 287– 306.
- 16 Wyllie P J. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1984, A310: 439– 456.
- 17 Clayburn J A P. The crustal evolution of Central Scotland and the nature of the lower crust: Pb, Nd and Sr isotope evidence from Caledonian granites. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 41– 51.
- 18 Downes H D, Duthou J L. Isotopic and trace element arguments for the lower crustal origin of Hercynian granitoids and Pre-Hercynian orthogneisses, Massif Central(France). *Chemical Geology*, 1988, 68: 291– 308.
- 19 Farmer G L. Magmas as tracers of lower crustal composition: an isotopic approach. In: Fourtain D M, Arculus R and Kay R W(eds), *Continental Lower Crust, Developments in Geotectonics*, Elsevier, Amsterdam, 1992, 23: 363– 390.
- 20 Dickin A P. Nd isotope geochemistry of Tertiary igneous rocks from Arran, Scotland: implications for magma evolution and crustal structure. *Geol. Mag.* 1994, 131: 329– 333.

Pb, Sr, Nd Isotope Composition of Ningshan Granitoids, South Qinling and their Deep Geological Information

Zhang Hongfei Ouyang Jianping Lin Wenli

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Chen Yulong

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Key words South Qinling; Ningshan plutons; isotopes; magmatic source; deep crust composition

Abstract

This paper reports Pb, Sr, Nd, isotopic compositions of 8 granitoid plutons from Ningshan, South Qinling, which were all formed about 200 Ma B. P. The results indicate that the granitic rocks from these plutons are characterized by low radiogenic Pb isotopic composition. Initial ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t ratios range from 0.70495 to 0.70908, $\epsilon\text{Nd}(t)$ values from - 2.41 to - 8.55, and Nd isotopic model ages (T_{DM}) from 1.20 Ga to 1.71 Ga. From east to west, $\epsilon\text{Nd}(t)$ values gradually increase, whereas T_{DM} values gradually decrease. This study reveals that the magmatic source of

the Ningshan plutons was derived from the deep crust. In the magmatic source, basic magmatic material in the crust similar to Yaolinghe Group basic volcanic rocks (Pt_3) in South Qinling is the major source for the formation of granitoids with less significant old continental crust material ($Ar - Pt_1$). However, the proportion of the old continental crustal material in magmatic source increases from east to west. It is suggested that the deep crust of the Fuping Dome is mainly composed of Late Proterozoic basic magmatic material (Pt_3) that was underplated beneath the Fuping Group (Pt_1), but the old continental crustal material in the deep crust gradually increases from east to west in the Fuping Dome. This indicates that the deep crust material displays east-west zoning and south-north structure, which is different from the ring distribution of surface crust material of the Fuping Dome.

书评

对《中国北方早前寒武纪孔兹岩系》一书的评介

孔兹岩系是地壳发展早期高级变质区常见的一种特殊变质岩系,它形成于特定的大地构造和沉积环境以及地壳演化过程,此类岩系在印度、斯里兰卡、俄罗斯、芬兰、非洲部分国家以及我国,都有广泛的分布。

最近由长春出版社出版的由卢良兆教授等所著的《中国北方早前寒武纪孔兹岩系》一书,以变质动力学作为学术主线,以我国北方为研究范围,其中包括内蒙古的若干典型地区、宁夏、辽、吉、胶北以及豫鄂地区的孔兹岩系,从区域背景、变质岩石组合,原岩建造和沉积环境,伴生的花岗质岩石类型,变质变形历史和 PTt 轨迹样式以及动力学过程等都做了较全面详细的论述。并有专门一章对孔兹岩系的成因和含矿性作了较系统的探讨。在此之前,国内外地学工作者对孔兹岩系曾多有研究,发表过不少文章,但大都限于一个小地区,如此大区域较全面和系统性的综合研究,实属首次。对阐明我国早前寒武纪地质构造演化和变质特征以及进行世界性对比,有重要科学意义;对赋存其中的非金属矿产资源的形成条件的研究以及这些矿产的普查评价也具有实际指导意义。

该专著中有许多新的认识,最主要的有两点:一是将北方的孔兹岩系划分为太古宙成因模式和早元古代成因模式,前者的变质作用总的演化过程和样式,各地区完全相同,均为较典型的顺时针 PTt 轨迹。原岩建造产于被动大陆边缘,形成于较典型的陆壳碰撞带。后者变质变形特征差别较大, PTt 轨迹顺时针和逆时针均可出现。形成于太古宙陆块边缘海中陆壳内裂隔带的张裂—闭合全过程中。二是对内蒙古的孔兹岩系的构造变形作用和花岗质岩浆作用的基本特征做了深入分析,建立了全区主要地质事件序列,特别在变质作用阶段的划分,变质作用与流体演化的结合上,有新的进展与突破。

关于孔兹岩系的时代和与麻粒岩系之间的关系,各家认识目前尚不一致。该专著的作者提出了自己的见解和依据,有利于争鸣,将在争鸣中逐步取得共识。

总之,本专著是一本内容丰富,材料翔实,理论与实际并重,论证严谨、系统性强,有自己特色的关于早前寒武纪孔兹岩系变质地质的专著。其精华部分可与国际先进水平的国外同类研究成果相媲美。

(沈其韩 供稿)