

北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示

王涛^{①*}, 王晓霞^②, 田伟^③, 张成立^④, 李伍平^⑤, 李舫^①

① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

② 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

③ 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

④ 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069;

⑤ 广州大学土木工程学院, 广州 510006

* E-mail: taowang@cags.net.cn

收稿日期: 2009-05-11; 接受日期: 2009-06-07

国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB825006)、国家自然科学基金(批准号: 40872054)、中国地质调查局项目(编号: 1212010611803, 1212010811033)、河南省地质矿产重大科技攻关项目(编号: 26417)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费资助

摘要 对北秦岭 2 个最大的 S, I 型花岗岩进行了锆石年代学和相关地球化学研究. 漂池 S 型花岗岩锆石 SIMS 年龄为 (495 ± 6) Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.2 \sim -8.8$, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -6 \sim -39$. 灰池子 I 型花岗岩锆石 LA-ICPMS, SIMS 年龄分别为 (421 ± 27) 和 (434 ± 7) Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.9 \sim 0.9$, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11 \sim 8.4$. 结合收集的 28 个锆石年代学资料的统计, 将北秦岭古生代花岗岩岩浆的演化分为 3 个阶段. 第一阶段(505~470 Ma)主要发育于北秦岭东段, 具有 I 型弧岩浆的特点, 伴生有漂池等 S 型花岗岩. 它们与榴辉岩等(超)高压变质岩石的时空关系密切, 揭示了完整的陆缘俯冲造山作用. 第二阶段(450~422 Ma)广布全区, 以灰池子岩体为代表的 I 型花岗岩为主, 解释为有地幔物质混入的下地壳的部分熔融, 形成于块体碰撞过程及略后的抬升环境; 第三阶段(415~400 Ma)仅发育于北秦岭中段, 以 I 型花岗岩为主, 形成于碰撞晚期阶段. 北秦岭古生代花岗岩带的时空演变揭示, 秦岭古生代俯冲碰撞造山作用具有长期连续性、阶段性的特点; 俯冲首先从北秦岭东段开始启动, 早于祁连-柴达木北缘、大别山北麓, 说明中国中央造山系古生代俯冲增生直到碰撞具有多块体、不等时的拼合特点.

关键词

锆石年代学
花岗岩
Nd, Hf 同位素
秦岭造山带

秦岭造山带横亘中国中部, 是华北板块与扬子板块长期汇聚形成的复合造山带^[1~4], 与柴北缘、昆仑和大别等造山带等构成中国中央造山系. 秦岭造山带至少经历了新元古代、古生代和中生代构造岩浆热事件和造山作用. 这是世界上为数不多、发育完整的 3 次构造岩浆和造山事件的造山带, 分解这一长期

演化的复杂历史, 集中探明每个造山带作用对于完整了解该复式造山带形成和演化是很有必要的.

古生代花岗岩在秦岭岩浆岩中占突出地位, 主要分布在北秦岭, 南秦岭仅有零星出露. 前人已做了大量的研究, 取得很多进展(见本文参考文献). 但秦岭古生代花岗岩精细的年代学格架、成因和时空演变

的总体特征还不清楚, 其构造环境仍存在争议^[4-9]. 一些代表性的典型花岗岩体(如最大的S型漂池和I型灰池子岩体)的时代还没有解决.

本文对这两个典型岩体进行了锆石年代学、锆石 Hf 同位素和相关岩石地球化学的研究; 结合前人资料, 拟对北秦岭古生代花岗岩带的时空分布、岩石组合、源区进行初步总结, 并从花岗岩带的演变过程来探讨其构造环境的演变及造山过程, 为系统研究和总结秦岭多期造山过程和岩浆作用提供新的依据.

1 区域地质背景

秦岭造山带由 2 个主缝合带(商丹和勉略二缝合带)和北秦岭(及华北地块南缘)、扬子北缘及二者间的中秦岭微地块 3 个块体组成^[4,10] (图 1). 在北秦岭, 沿商丹带北侧分布着早元古代秦岭杂岩或秦岭群, 主要由角闪岩相变质岩系及变质变形岩体组成^[11,12]; 其东段北缘发育榴辉岩((507±37) Ma^[14]锆石 U-Pb)等高压变质岩^[13,14], 南缘发育高压麻粒岩((485±33) Ma^[14]锆石 U-Pb)^[15,16]. 秦岭杂岩北侧为二郎坪群, 包括蛇绿岩、火山-沉积岩, 主体形成于古生代^[17]; 再北为宽坪群, 由中低变质的绿片岩、角闪岩组成. 秦岭杂岩及商丹带南侧为古生代丹凤群和刘岭群. 丹凤群由蛇绿岩、火山-沉积岩组成^[4]. 刘岭群主体为绿片岩相变沉积岩系, 是秦岭微板块的主要组成部分.

秦岭造山带经历了新元古代、古生代和中生代构造岩浆热事件和造山作用. 新元古代造山作用以陆块汇聚与裂解为特征, 形成了同碰撞到后碰撞的花岗岩系^[8,18-21]. 古生代时期, 秦岭洋(商丹洋)沿商丹带一线、二郎坪弧后盆地沿朱夏构造带一线发生俯冲增生及碰撞, 形成大量的花岗岩等构造岩浆热事件^[4,22,23]. 在中生代, 南北大陆汇聚, 秦岭造山带最终成型. 整个秦岭造山带特别是西、南秦岭经历了强烈的早中生代构造岩浆热事件, 形成巨量的中生代花岗岩^[24].

2 数据来源及分析方法

本文收集了公开发表的北秦岭古生代花岗岩的锆石年龄. 此外, 对 2 个关键的、典型的花岗岩体进行了锆石年代学和相应的地球化学、同位素测试. 锆石分选采用标准重液和磁选方法. 锆石 LA-ICPMS 测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 分析方法和流程见袁洪林等^[25]. 锆石 Cameca IMS-1280

离子探针测年在中国科学院地质与地球物理研究所完成, U-Th-Pb 含量和比值采用 91500 锆石标样计算^[26], 具体方法见 Li 等^[27] 和李献华等^[28]. 锆石 SHRIMP 测年在北京离子探针中心完成. 实验分析、数据处理流程参见宋彪等^[29].

主量、微量和稀土元素的分析在西北大学大陆动力学实验室完成(分析方法见 Gao 等^[30]. Sr, Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成(见 Qiao 等^[31], Yang 和 Zhou^[32]). 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 所用仪器为英国 Nu Instruments 公司生产的 Nu Plasma HR 多接收电感耦合离子体质谱仪(方法和参数见 Yuan 等^[33]).

3 典型花岗岩体的锆石年代学和地球化学

3.1 锆石年龄测试结果

3.1.1 漂池 S 型花岗岩的锆石年龄

漂池花岗岩体是北秦岭最大的 S 型花岗岩体, 呈不规则形态, 发育透入性较强的平行区域构造线的片麻理构造, 曾获得全岩 Rb-Sr 年龄(483 ± 15) Ma^[34]. 田伟^[35]测得中粗粒二长花岗岩的锆石 TIMS 年龄为(436 ± 18) Ma. 本次选取了相同地区(位于漂池岩体中部)的中粗粒二长花岗岩(样品 P4 和 P5), 采用 LA-ICPMS, SIMS 和 SHRIMP 方法进行了锆石测年.

挑选出的锆石粒级变化大(60~250 μm), 多为 100~200 μm. 晶体多为板状-长板状-长柱状, 长宽之比多集中在 5:1 左右. 一些锆石显示核、幔、边结构. 核部浑圆状, 无明显结晶环带, 显示残留核或继承核的特征. 幔部结晶环带发育, 显示岩浆结晶特点(图 2(b)). 边部在阴极发光照片中成暗色(图 2(b)), 即 CL 暗色边. 在背散射图像中裂纹发育, 显示高 U 和 Th 的增生边特点. 有些锆石增生边不发育.

LA-ICPMS 测试结果见表 1 和图 2(a). 位于核部的测点给出谐和的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄有 1200, 1100, 900 和 710 Ma, 可解释为残留核或继承核年龄. 个别岩浆结晶锆石获得元古代年龄, 可能为捕获锆石年龄. 其他一些不谐和 805~844 Ma 的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄可能是 Pb 丢失的结果. 位于幔部的结晶环带测点给出 500~470 Ma 左右的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄. 本次测年没有给出确切的岩体形成年龄.

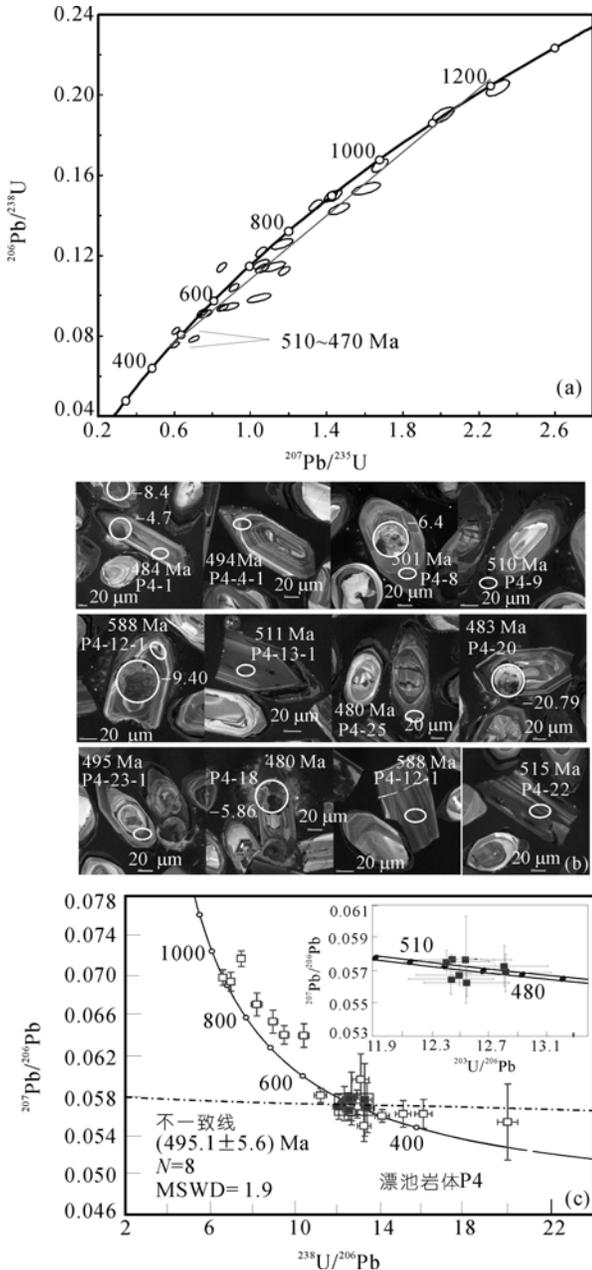


图2 秦岭古生代漂池S型花岗岩锆石阴极发光图像和锆石U-Pb一致图解

对该样品应用 Cameca IMS-1280 离子探针进行了 SIMS U-Pb 测年, 结果见表 1 和图 2(c). 主要针对锆石幔部和边部进行测试. 共测 27 个点, 其中, 8 个点显示较好的 U-Pb 谐和线交点年龄(495±6) Ma(图 2(c)). 这些点大多数位于具有岩浆结晶环带锆石的幔部, 代表锆石主体部分(幔部)的结晶年龄. 3 个偏年

轻的年龄(410~420 Ma)显示了铅的丢失. 为了确定增生边年龄, 还进行了 SHRIMP 测年. 由于 U 和 Th 含量极高(达 3000~8000 ppm), 裂纹发育, 测试难以给出合理的数据. 依据目前的实测资料, 锆石给出的 (495±6) Ma 年龄可能代表了主体岩浆结晶年龄, 并解释为岩体形成年龄.

3.1.2 灰池子 I 型花岗岩锆石年龄

灰池子花岗岩体为北秦岭最大的 I 型花岗岩体, 边缘发育片麻理构造, 是以主动侵位为主的复合定位机制侵位的 [36]. 该岩体曾获得过 Rb-Sr 全岩年龄 382 Ma [37]. 李伍平等 [38] 在该岩体(北西)最早的岩石单元获得锆石 Pb-Pb 蒸发年龄为 (437±22) Ma. 本次研究的样品(样品号 H1)采于岩体的东部晚期单元(图 1), 位于颜子河公路上, 岩性为黑云母二长花岗岩, 与样品 1701/5 位于同一个岩石单元、同一个地点, 地球化学特征见样品 1701/5(见文献 [39] 的表 1).

挑选出的锆石粒级较大(多为 100~200 μm), 多为无色、浅褐色、玫瑰色、淡黄色的透明自形晶, 晶体呈四方柱与四方锥之聚形晶, 多为板状-长板状-长柱状, 长宽比可达 6:1, 一般为 4:1 左右. 锆石发育多层同心环带, 显示了岩浆结晶成因的特点(图 3(b)).

LA-ICPMS 测了 25 个点(表 2 和图 3(a)). 较好的谐和年龄(位于谐和线)图谱锆石测点显示了 3 组 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄: 559 Ma(14 个测点)、480 Ma(4 个测点)和 (421±27) Ma(3 个测点). 这组年龄都是测自锆石的幔部或边缘, 可代表锆石结晶年龄, 显示锆石来源复杂. 一些继承锆石和残留核给出了 1.85~1.37 Ga 的年龄.

Cameca IMS-1280 离子探针测年(表 2 和图 3(c)) 获得一组较好的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄 (434±7) Ma(图 3(c)). 这些年龄点多数位于锆石的幔部和边部, 可作为锆石的结晶年龄, 并代表岩体成岩年龄. 该年龄与 LA-ICPMS 分析中的 (421±27) Ma 年龄和原来获得的锆石 Pb-Pb 年龄 437 Ma [38] 在误差范围内一致. 较老的年龄(如 558, 480 Ma)可暂解释为俘获锆石年龄, 也有一些不排除是混合年龄的可能.

3.2 地球化学

漂池 S 型花岗岩体的岩性主要为二长花岗岩. 地

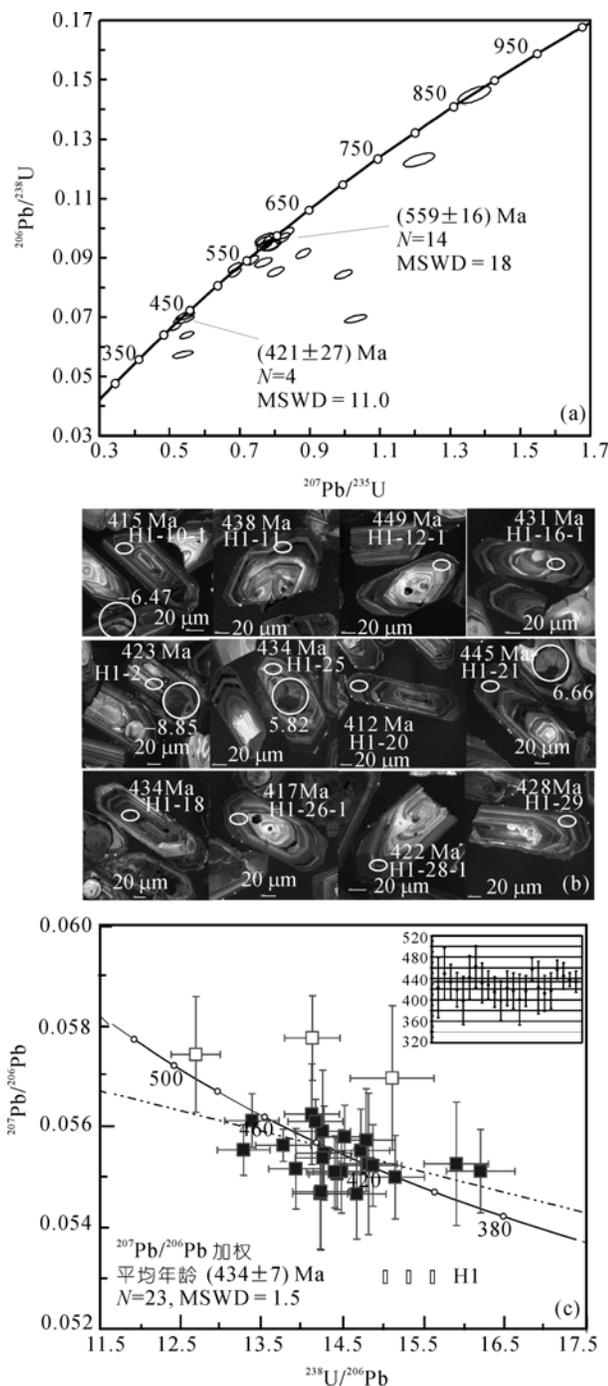


图 3 秦岭古生代灰池子 I 型花岗岩锆石阴极发光图像和锆石 U-Pb 一致图解

球化学和同位素分析结果列于表 3, 4. 结合已有的资料^[34], 该花岗岩具富硅、铝和钾, 贫钙、镁的特征, Eu 中等亏损. $\epsilon_{Nd}(t)$ 值极低, 为 $-9.3 \sim -10.6$.

灰池子 I 型花岗岩已有较多研究^[39,40]. 主要岩石

类型为黑云母斜长花岗岩、黑云母花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩. 岩石的 SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O 含量较高, TiO_2 , MgO , K_2O 含量较低, 富大离子亲石元素, 亏损高场强元素, Eu 为负-弱正异常, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $0.9 \sim -0.9$ ^[39].

3.3 锆石 Hf 同位素

对漂池岩体(样品 P4)进行了 20 个点的锆石原位 Lu-Hf 同位素分析(表 5), 其中有 12 个点的 U-Pb 年龄与岩体的成岩年龄一致, 2 个点基本一致. 除 3 颗锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值较低($0.281221 \sim 0.281744$)外, 其余锆石分析点的数据基本一致, 为 $0.282079 \sim 0.282307$. $\epsilon_{Hf}(495)$ 有 3 个点为 $-23.5 \sim -39.7$, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $2.94 \sim 3.94$ Ga, 其余 11 个点为 $-5.9 \sim -13.8$, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1.84 \sim 2.33$ Ga.

对灰池子岩体(样品 H1)中的锆石也分析了 20 个点, 其中有 14 个分析点位于与成岩年龄($434 \sim 423$ Ma)一致的区域. 有 3 颗锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值较低($0.282048 \sim 0.282103$), 其余锆石分析点的数据基本一致, 为 $0.282306 \sim 0.282723$. $\epsilon_{Hf}(434)$ 有 4 个点为 $-5.2 \sim -10.9$, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1.83 \sim 2.11$ Ga, 其余 10 个点为 $+3.4 \sim +8.4$, 二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 为 $0.88 \sim 1.20$ Ga.

4 北秦岭古生代花岗岩的时空分布及特征

依据收集和上述实测的 30 个锆石年龄, 将北秦岭古生代花岗岩浆的演化可分为 3 个阶段(表 6 和图 4).

4.1 第一阶段——晚寒武世-早奥陶世(505~470 Ma)花岗岩组合

该花岗岩组合主要发育于北秦岭东段(商南一带)秦岭杂岩中(图 1), 已确定了 6 个花岗岩体(表 6, 图 1). 另外, 陆松年等^[7]获得过秦岭杂岩淡色花岗岩脉体的锆石年龄为 500 Ma. 在漂池岩体南侧测得具有 S 型特点的变形花岗岩脉体(花岗岩)的锆石 SHRIMP 年龄为 (497 ± 12) Ma^[19]. 它们可能是大量分布于较老的变质岩系中的片麻状岩体或花岗质片麻岩的代表, 表明该时期发生过一次地壳熔融事件和花岗岩浆侵入事件. 该岩浆组合中还发育基性侵入岩, 获得的 5 个锆石年龄时限为 $518 \sim 496$ Ma^[50~52,58].

该岩石组合特征以 I 型花岗岩为主, S 型花岗岩次之. I 型花岗岩侵位于秦岭杂岩、二郎坪群、丹凤群中, 主要岩石类型为片麻状花岗闪长岩、片麻状(英

表3 漂池二长花岗岩的地球化学分析结果

样号	P4	P3	P6	P7	P10	P13	P14	P15
SiO ₂		71.63	71.65	71.64	75.21	70.51	71.65	71.22
TiO ₂		0.23	0.27	0.23	0.05	0.21	0.20	0.20
Al ₂ O ₃		15.41	15.12	15.14	13.49	16.55	15.14	15.19
Fe ₂ O ₃		1.26	1.52	1.35	0.87	1.32	0.98	1.23
FeO		1.00	1.12	1.02	0.68	1.00	0.88	1.05
MnO		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO		0.46	0.57	0.52	0.09	0.53	0.42	0.53
CaO		1.48	1.63	1.52	0.78	1.88	1.58	1.62
Na ₂ O		4.09	4.04	4.20	3.87	4.80	4.02	4.16
K ₂ O		4.41	4.17	4.39	4.19	3.79	4.05	4.30
P ₂ O ₅		0.07	0.08	0.07	0.05	0.07	0.06	0.06
L.O.I		0.80	0.45	0.42	0.90	0.47	1.67	1.02
总量		100.86	100.64	100.52	100.20	101.15	100.67	100.60
A/CNK		1.09	1.07	1.05	1.10	1.07	1.09	1.05
V	15	10	12	11	0.9	10	7.7	7.9
Cr	5.6	4.2	3.7	4.2	1.1	5.0	9.3	4.1
Ni	4.1	3.4	3.5	5.6	1.6	5.7	7.1	4.5
Rb	216	302	261	292	307	205	244	278
Sr	279	223	223	223	20	242	232	246
Y	9.7	12	15	11	22	8.3	9.4	15
Zr	174	145	152	135	25	126	128	132
Nb	4.2	8.5	6.5	7.2	21	5.0	6.3	4.8
Ba	599	514	542	480	26	495	537	550
Hf	4.8	4.8	4.7	4.4	1.3	4.0	4.3	4.3
Ta	0.3	2.1	0.9	1.2	1.7	0.5	1.1	0.7
Th	20	17	18	19	12	15	18	21
Ga	25	23	22	24	21	24	23	23
La	35.37	27.09	29.29	28.42	8.038	22.80	29.56	33.73
Ce	68.62	54.20	58.38	56.63	19.24	44.97	58.92	67.06
Pr	7.75	6.32	6.80	6.61	2.34	5.10	6.86	7.64
Nd	27.20	23.08	25.10	23.99	8.44	18.56	24.67	27.78
Sm	4.86	4.24	4.42	4.26	2.71	3.54	4.31	4.91
Eu	1.08	0.83	0.84	0.77	0.11	0.87	0.78	0.85
Gd	3.35	3.72	3.89	3.79	2.94	3.05	3.59	4.24
Tb	0.40	0.45	0.44	0.44	0.63	0.36	0.42	0.47
Dy	1.97	2.12	1.97	2.08	3.72	1.71	1.91	2.15
Ho	0.36	0.38	0.34	0.36	0.73	0.30	0.34	0.35
Er	1.00	1.07	0.93	1.01	1.88	0.84	0.94	0.97
Tm	0.13	0.15	0.13	0.15	0.28	0.12	0.12	0.13
Yb	0.77	0.99	0.82	0.97	1.73	0.74	0.82	0.83
Lu	0.12	0.15	0.12	0.14	0.24	0.11	0.12	0.12
ΣREE	153.0	124.8	133.5	129.6	53.0	103.1	133.4	151.3
(La/Yb) _N	30.10	18.55	24.15	19.74	3.14	20.68	24.48	27.34
δEu	0.78	0.62	0.61	0.58	0.12	0.79	0.59	0.58

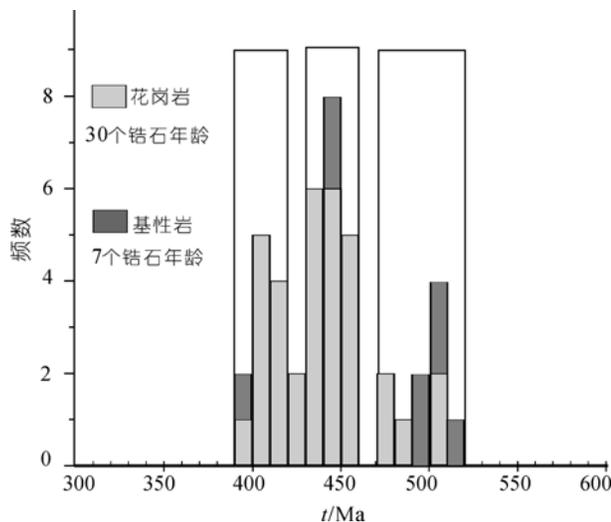


图 4 秦岭古生代花岗岩锆石年龄直方图

资料来源见文献[5, 7, 19, 35, 38, 42, 44, 49~57]和本文表 6; 图中基性岩的年龄为锆石 U-Pb 年龄, 具体测试方法有 LA-ICP-MS, SHRIMP 和 TIMS

云)闪长岩、斜长花岗岩, 属钙碱性系列; 少量二长花岗岩为高钾钙碱性系列(图 5). 在地球化学上, $SiO_2=68.55\% \sim 72.68\%$, $Na_2O+K_2O=6.94\% \sim 8.79\%$, $Na_2O/K_2O=1.1 \sim 1.5$, MgO 较高($0.85\% \sim 1.47\%$, 二长花岗岩的较低, 为 0.47%), $Mg^\#$ 为 $0.36 \sim 0.43$, 显示出富硅、钠、镁的特征. $A/CNK=1.01 \sim 1.08$, 为过铝质岩石(图

5). 稀土元素分馏明显($(La/Yb)_N=30 \sim 35$), 轻稀土元素富集, 重稀土元素的含量较其他花岗岩组合的低, 配分曲线呈明显的右倾型(图 6), 弱的铕负异常($\delta Eu=0.78 \sim 1$). 在微量元素蛛网图中, 轻稀土和大离子亲石元素的曲线形态与秦岭古生代其他 I 型花岗岩的相似, 出现了 Nb, P_2O_5 和 TiO_2 负异常, 但重稀土元素的曲线形态不同, 表现为右倾, 且重稀土元素的含量低(图 6), Sr/Y 比值为 $50 \sim 123$. 在同位素组成上, $I_{Sr}=(^{87}Sr / ^{86}Sr)_i=0.703 \sim 0.705$, $\epsilon_{Nd}(t)=1.5 \sim 1.9$, 具低 I_{Sr} , 高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 的特征. 模式年龄较小, $T_{DM}=0.91 \sim 0.94$ Ga(表 4).

S 型花岗岩体侵位于秦岭群中, 发育片麻状构造, 多为二长花岗岩. 主要矿物组成: 石英($30\% \sim 35\%$)、碱性长石($20\% \sim 25\%$)、斜长石($30\% \sim 35\%$)、黑云母($5\% \pm$)、白云母($3\% \pm$), 副矿物为钛铁矿、独居石、电气石、萤石等. 地球化学上为高钾钙碱性系列和钾玄岩系列(图 5), $SiO_2=70.51\% \sim 75.21\%$, $Na_2O/K_2O < 1$, 仅有一个样品为 1.2, $MgO=0.09\% \sim 0.6\%$, $Mg^\#$ 为 $0.1 \sim 0.28$, 具有高硅、钾, 低镁的特征(表 3), $A/CNK=1.05 \sim 1.10$, 为过铝-强过铝质. 轻稀土元素的含量与 I 型花岗岩的相似, 但重稀土元素的含量明显较高, 轻重稀土元素的分馏中等偏高, $(La/Yb)_N=20 \sim 30$, 具中等到明显的铕负异常($\delta Eu=0.12 \sim 0.78$). 在微量元素

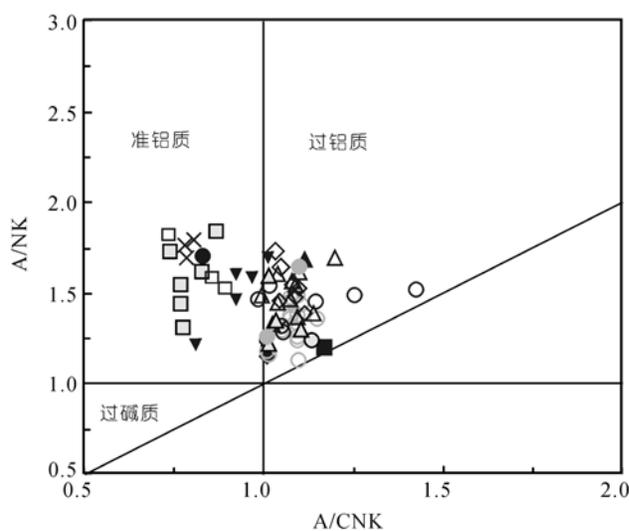
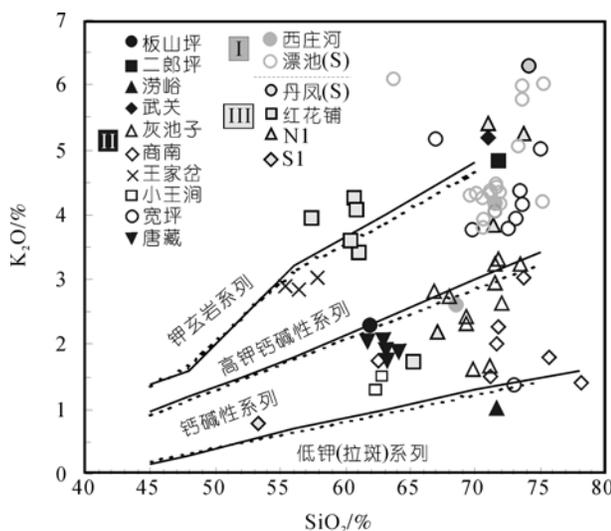


图 5 秦岭古生代花岗岩的主量元素图解

SiO_2-K_2O 图中的分类界线据Middlemost^[59]. 资料来源见参考文献[5, 7, 8, 35, 37, 39, 42, 44, 45, 54, 60~65]和本文(表 6), I, II, III 分别代表 3 个阶段的岩浆事件

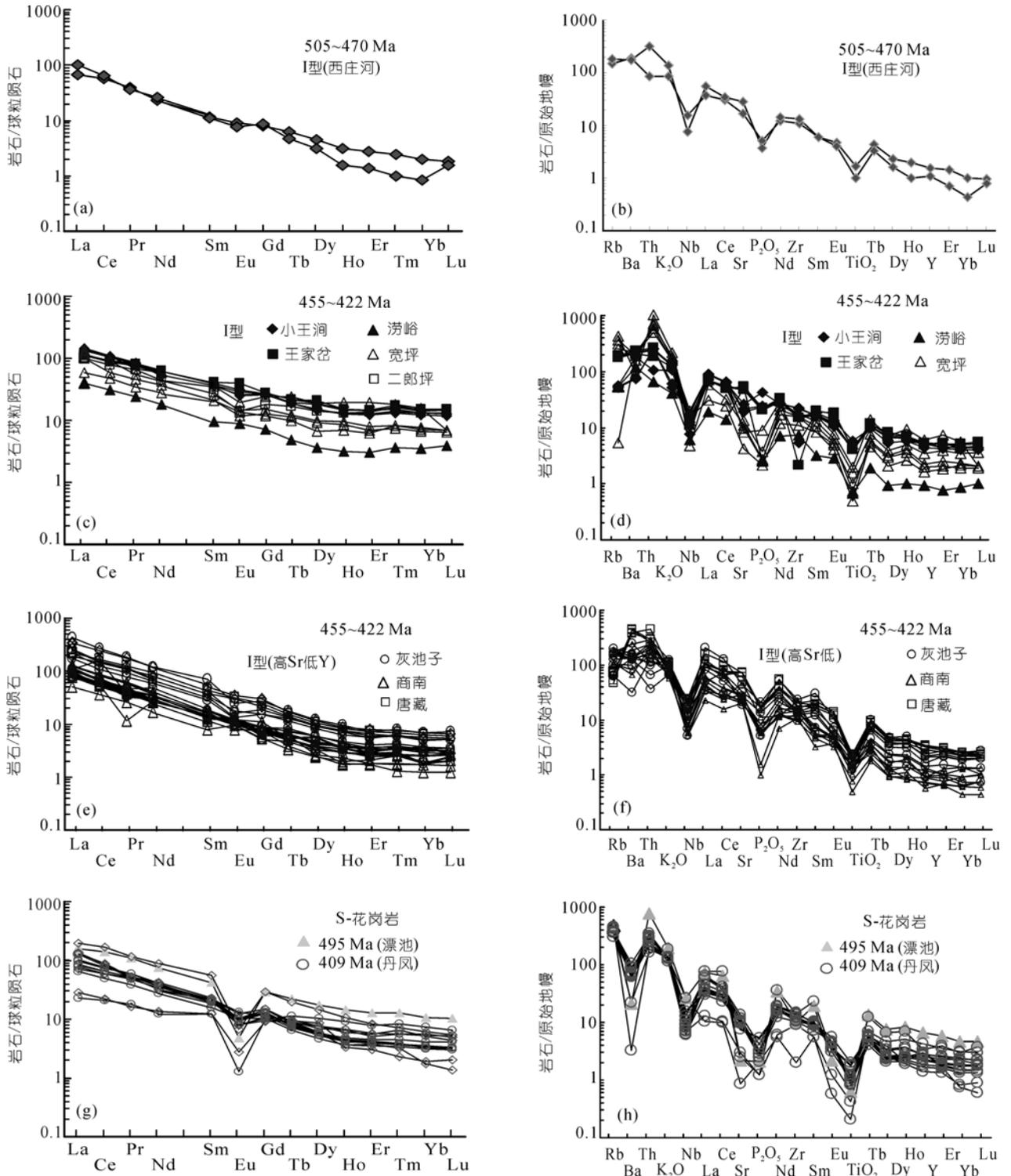


图 6 秦岭古生代花岗岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图

资料来源同图 5; 球粒陨石和原始地幔的标准化值据 Sun 和 McDonough^[66]

蛛网上, Ba, Sr, Nb, P_2O_5 , Eu和 TiO_2 明显亏损, 特别是Ba相对于Rb和Th的亏损. $\epsilon_{Nd}(t)$ 值极低, 为-9.3~-10.6, Nd同位素模式年龄 T_{DM} 为1.73~1.92 Ga, I_{Sr} 为0.727~0.7248(表4). $\delta^{18}O\%$ 值较高, 达10.9~11.7^[34]. 所有这些特征显示了风化的老地壳熔融特点.

4.2 第二阶段——晚奥陶世-中志留世(455~422 Ma)花岗岩组合

该阶段花岗岩体是秦岭古生代花岗岩的主体, 遍布整个北秦岭, 由15个岩体构成(表6, 图1), 主要发育于北秦岭的东部, 侵入于秦岭群、二郎坪群和丹凤群. 其中, 早期(455~450 Ma)形成的岩体规模较小. 晚期(450~422 Ma)岩体规模大(可达300~400 km²), 形态多为椭圆状或不规则状. 该阶段花岗岩伴生有基性或基性岩墙(时限为443~434 Ma^[53,56]).

该阶段花岗岩主要为I型, 岩石类型以黑云母花岗岩闪长岩为主, 其次为英云闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩, 主要组成矿物为斜长石、石英, 其次为钾长石, 具少量黑云母和角闪石, 副矿物为磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿. 在岩石化学上, 显示钙碱性系列的特征, 部分为高钾钙碱性系列(图5), $SiO_2=66.86\%~78.155\%$, $Na_2O/K_2O=1.4~3$, $A/CNK=0.995~1.20$, $Mg^{\#}$ 大于0.35, 显示出 SiO_2 含量变化范围大、富钠和镁、偏铝到过铝质的特征. 稀土元素的总量不高, 轻重稀土分馏明显, 变化范围大, $(La/Yb)_N$ 多数为22~40, 配分曲线为明显的右倾型(图6), δEu 一般为0.8~1.2, 为弱的正异常到弱的负异常. 在微量元素蛛网图(图6)中, 出现了明显的Nb, P_2O_5 和 TiO_2 的负异常, 显示出火山弧花岗岩的特征. 其中有一些花岗岩, 如灰池子、商南、唐藏岩体具有高Sr低Y的特点, $Sr/Y>45(47.8~172.62)$.

在同位素组成上, 该组合中I型花岗岩的 I_{Sr} 为0.7036~0.706. 多数岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为正值, 个别岩体为负值, 如二郎坪岩体(-1.9~-3.2)和商南岩体(-3.9~-4.6)(表4). Nd同位模式年龄 T_{DM} 一般大于1 Ga, 仅小王涧岩体为0.73~1.01 Ga(表4).

4.3 第三阶段——早泥盆世(415~400 Ma)花岗岩组合

目前已确定了10个岩体(表6, 图1), 主要发育于北秦岭中段(如黑河-丹凤一带), 侵入于秦岭杂岩、

二郎坪群和丹凤群. 岩体规模较小(除侵入位于二郎坪群的张家大庄岩体之外). 岩石组合以I型花岗岩为主.

I型花岗岩的岩石类型有闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩, 如红花铺、张家大庄及出露在黑河一带的小岩体. 化学成分变化大, 岩石系列主要为高钾钙碱性系列-钾玄岩系列, 个别样品为钙碱性系列(图5), $SiO_2=53.24\%~73.39\%$, Na_2O/K_2O 多为1左右, $Mg^{\#}$ 为0.3~0.5, 显示出 SiO_2 含量变化较大和富钠、镁的特征. A/CNK 一般为0.77~1.1, 为准铝到过铝质. 与第二阶段花岗岩相比, 这些岩体显示较低的 $I_{Sr}(0.7049~0.706)$ 、较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (-2.3~5.1, 多数大于1)和较小的 $T_{DM}(0.91~1.36)$.

S型花岗岩仅有丹凤岩体, 岩石类型为石榴石钾长花岗岩^[7]. 地球化学特征与漂池岩体的相似.

需要说明的是, 一些花岗岩具有370~360 Ma的Ar-Ar年龄. 这些年龄是否真正代表中泥盆纪-晚泥盆纪或更晚的花岗岩体还有待于进一步验证.

5 北秦岭古生代花岗岩类物源分析

5.1 S型花岗岩物源

上述S型花岗岩均产于秦岭群中. 同位素特征与秦岭群片麻岩极为相似(图7). 岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)=-8.2~-8.8$, 模式年龄 T_{DM} 为1.73~1.92 Ga, 与继承核锆石的年龄一致, 且与秦岭群的1.90~2.07 Ga^[42]年龄相近. 锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均为负值, 一般为-5.9~-13.8, 在 $t-\epsilon_{Hf}(t)$ 图(图8)中, 位于球粒陨石演化线以下, 二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})为1.84~2.33 Ga(表5), 也与秦岭群的年龄相似, 表明S型花岗岩的源区物质类似于秦岭群的古老地壳. 如果假设秦岭群中的副片麻岩为壳源端元, 亏损地幔为幔源端元, 利用同位素计算岩石中壳幔比例的方法^[67]得出, 形成漂池岩体的岩石中, 秦岭群片麻岩类物质所占比例为90%~94%, 与张宏飞等^[34]的估算一致.

另外, 部分捕获或残留锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)=-23.5~-39.7$. 二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})为2.94~3.94 Ga, 可能反映了源岩中还包含着更古老物质的信息, 暗示秦岭群部分物源至少有太古代岩石. 这些物质是来自华北克拉通南缘还是扬子克拉通北缘还是秦岭微板块内部存在太古代地块? 值得深入研究. 这将为解决近年争议很大的秦岭群所代表的元古代地块归属及秦

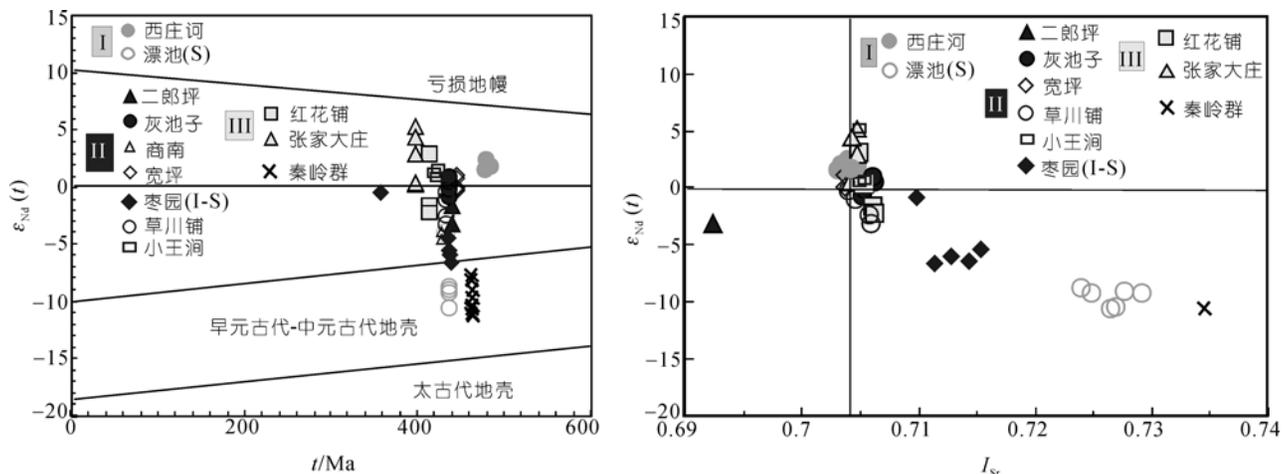


图 7 秦岭古生代花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)-I_{Sr}$ 同位素图解

资料来源见参考文献[34, 35, 39, 41, 42, 44, 45, 47]和本文(表 6)。I, II, III 分别代表 3 个阶段的岩浆事件

岭造山带构造格架等重大问题提供新的信息。

5.2 I 型花岗岩物源

在 3 个阶段的组合中, I 型花岗岩较多, 以富钠, 偏铝质为特征, 其地球化学特别是 Sr, Nd, Hf 同位素特征 (表 4 和 5, 图 7 和 8) 与 S 型花岗岩的明显不同, 表明其源区含有地幔物质。在 3 个不同阶段中, 幔源物质的参与方式不同, 造成岩石组合和化学性质的明显差异, 可以与造山带演化的不同阶段建立对应关系。

第一阶段晚寒武世-早奥陶世的 I 型花岗岩以西庄河岩体为代表。该岩体具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (1.5~1.9), 较小的 I_{Sr} (一般为 0.7030~0.7042), 显示有较多的年轻幔源物质参与。其低 $Mg^\#$ (0.36~0.43)、低 Cr 含量 (99 ppm), 说明岩石成因可能与幔源岩浆的分离结晶有关 (不排除有壳源混染)。从野外的岩石组合看, 西庄河岩体与二郎坪 (2.9~3.9 Ga) 群基性火山岩紧密伴生, 并含有大量的玄武质-闪长质微粒包体, 微量元素特征也表明该岩体与二郎坪群玄武岩构成一个完整的分离结晶演化序列 [6, 68]。另外, 同属北秦岭的富水辉长岩侵位时代 (501 Ma [52]; 490 Ma [58]) 与西庄河岩体非常接近, 并具有极低的 Nb/La (0.06~0.25) 和 Nb/U (1.1~12) 比值 [69], 属于典型的弧岩浆。上述证据均表明第一阶段的 I 型花岗岩与岛弧或弧后盆地关系密切。

第二阶段晚奥陶世-中志留世 I 型花岗岩较为复杂。多数 I 型花岗岩体 (如灰池子、宽坪岩体) 的 $\epsilon_{Nd}(t)$

值为 -1.5~1, $Mg^\#$ 为 0.30~0.52, 亏损高场强元素 (Nb, Zr, Ti) 且 Cr 含量偏低 (<129 ppm), 这些特征与基性榴辉岩部分熔融的熔体 [70, 71] 很相似, 而该地区也发育此类榴辉岩。从岩石组合看, 灰池子岩体内部缺乏基性-中性微粒包体。上述特征表明, 该期花岗岩源于幔源岩浆分异或壳幔岩浆混合的可能性不大。另一方面, 灰池子岩体大量继承锆石的存在以及其变化极大的 Hf 同位素特征, 支持其成因以幔源物质加入的下地壳深熔为主。

至于幔源物质来源和成因是另一个需要探索的问题。具有最亏损的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (+8.4) 的锆石样品 H1-1 的 Hf 模式年龄为 882 Ma。但这只能限定该期幔源原始岩浆底侵的时间上限, 并不能真正代表其侵位时代 (因为原始幔源岩浆只有演化成硅饱和和岩浆时才可能结晶出锆石, 而在这个演化过程中很可能遭受古老

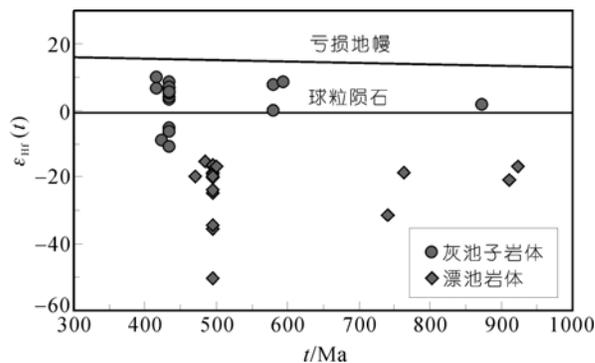


图 8 北秦岭漂池 S 型花岗岩和灰池子 I 型花岗岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解

地壳放射性成因Hf混染). 事实上, 此时造山带根部已经就位了大量早期岛弧或弧后盆地的基性岩(与富水杂岩大致同时), 成为幔源物源; 在后期秦岭地块碰撞挤出抬升^[23], 特别是略后以抬升为主的背景下, 它们与下地壳共同发生减压熔融而形成大规模的低温I型花岗岩(参见Chappell等^[72]). 当然, 也不排除该时期还发育新的幔源岩浆底侵, 提供地壳熔融的热能.

另外一些 I 型花岗岩类(如二郎坪、商南、草川铺、枣园岩体)的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低(-1.5~-5.9), Cr 含量变化范围小(6~28 ppm), $Mg^\#$ 为 0.32~0.46. 有些岩体像枣园岩体的 I_{Sr} 很高(0.7078~0.7100). 它们与灰池子岩体具有相似的稀土和微量元素特征(图 6(e), (f)), 因此, 成因可能是相似的. 不同的是这些岩体中幔源物质的参与较少.

还有一些I型花岗岩类(闪长岩、石英闪长岩)具有高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(2.9~5.1)和 $Mg^\#$ (0.44~0.52), 如小王 涧^[44]、王家岔岩体^[54]. 它们具有相似的稀土元素配分图和微量元素蛛网图(图 6(c), (d)), Sr和TiO₂的含量比其他岩体高. 这些岩体显示了以幔源岩浆为主(混合或混染了少量的壳源)的特点. 这种幔源岩浆可以认为是源自上述年轻的基性下地壳, 也可能是新的幔源岩浆的分异物. 这还需要进一步通过Hf同位素等方面的研究来限定.

第三阶段早泥盆世 I 型花岗岩(张家大庄, 红花铺和分布在黑河附近的一些小岩体)的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为-2.3~5.1, 多数较高, 为 5.1~0.3, $Mg^\#$ 一般为 0.3~0.49, 个别闪长岩可达 0.6. 花岗岩的Cr一般为 $7 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$, 闪长岩为 $59 \times 10^{-6} \sim 434 \times 10^{-6}$, 变化较大. 其成因可以解释为幔源岩浆混染了较少的古老壳源物质; 其中, 幔源组分可能来源于新底侵基性岩浆, 或者来源于就位于造山带根部的早期基性岩.

6 北秦岭古生代花岗岩时空演变及对造山作用的启示

晚寒武纪-早奥陶纪(505~470 Ma)的花岗岩具有岛弧花岗岩的特征, 可以解释为岩浆弧^[49]. 它们与北秦岭榴辉岩、高压麻粒岩(510~500 Ma)^[14,15]的时间大体一致; 在空间上它们集中发育于北秦岭东段秦岭杂岩中及附近(图 1 和 9(a)). 因此, 该时期花岗岩与高压变质等地质事件一起构成较为完整的板缘俯冲造

山作用, 并首先在北秦岭东段(今商南一带)开始俯冲. 略早(505~500 Ma)的花岗岩以I型花岗岩为主, 似乎显示了俯冲的特点. 略后(490 Ma左右), 在古老陆壳地块如秦岭群中出现S型花岗岩和脉体, 可能是在俯冲过程中, 陆块边缘加厚深埋, 并在与超高压岩石一起抬升中, 发生部分熔融的产物. 之后(480~470 Ma)的I型花岗岩解释为与俯冲有关的岛弧花岗岩.

晚奥陶世-中志留世(455~422 Ma)花岗岩浆在北秦岭广泛发育(图 1 和 9(b)). 区域构造研究显示, 该时期发生块体碰撞, 古老基底岩石秦岭杂岩向西挤出抬升, 与该阶段花岗岩侵位中心向东迁移的特点一致^[23,73](图 9(b)). 这种碰撞也许导致了地壳的加厚, 并在略后的块体抬升中, 造成幔源物质加入的下地壳熔融, 形成岩浆, 并上侵(此过程不排除与陆壳物质进一步混合)形成I型花岗岩, 一部分花岗岩还显示了高Sr低Y的特征.

早泥盆世(415~400 Ma)花岗岩岩浆活动较弱, 主要发生在北秦岭中段(图 1 和 9(c)), 形成于碰撞晚期

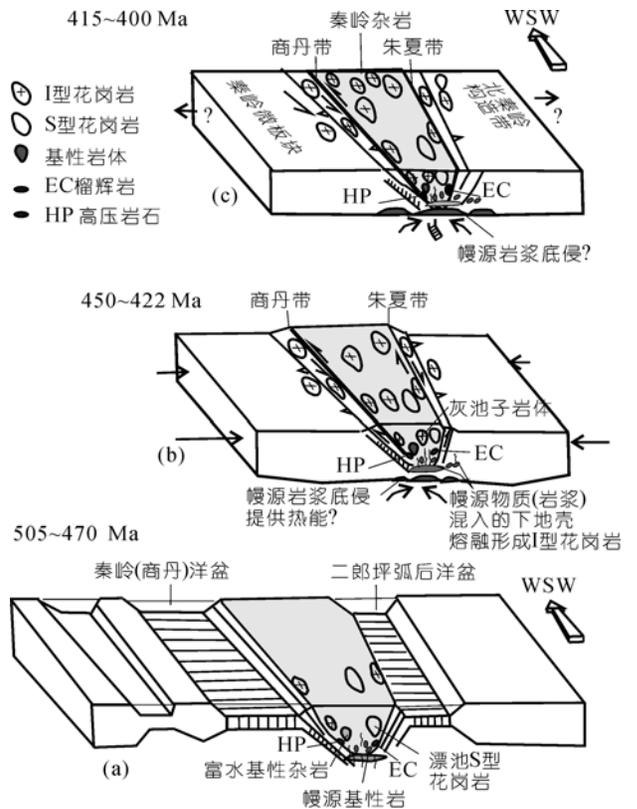


图 9 秦岭古生代 3 个阶段岩浆演化与造山过程关系的示意图

阶段(图 9(c)).

由上可见, 北秦岭古生代花岗岩演化揭示了一种可能的造山过程和路径(图 9(b)): 早期(505~470 Ma)以板块俯冲为主(东段先开始); 中期(450~422 Ma)可能发生块体的聚合碰撞、挤出; 之后(415~400 Ma)为全面聚合碰撞晚期阶段. 在大致同一个地区, 发生至少 100 Ma 的以钙碱性为主的具有同造山特点的岩浆演化, 揭示了长时期连续俯冲增生碰撞的过程. 这可能是秦岭古生代造山的一个特点.

关于俯冲方向, 有沿商丹带向北^[4]或沿朱夏带的向南^[6,49]的不同认识, 考虑到该时期秦岭洋沿商丹带一线、二郎坪弧后盆地沿朱夏构造带俯冲、碰撞的格局^[4]和秦岭杂岩南北两侧均发育超高压岩石以及秦岭杂岩花状挤出^[23]等证据, 该阶段可能存在着秦岭杂岩为核部的双向俯冲, 即秦岭洋沿商丹带向北俯冲和二郎坪弧后盆地沿朱夏带向南俯冲(图 9(a)).

以往的研究认为, 沿商丹带古生代的俯冲造成了花岗岩成分向北的极性变化^[61]. 本研究没有发现花岗岩带具有向南迁移的特点(如向南增生造山所预示的), 而且, 500 Ma 的花岗岩在秦岭微板块中也发育(如关子镇岩体), 因此, 早中古生代秦岭造山作用非简单持续 100 Ma 以上的向南增生造山, 而可能是一种复式造山, 或者至少是复式增生造山(参见 Condie^[74]).

在秦岭造山带及整个中央造山系古生代构造热事件和造山作用已经得到众多资料的证实. 但在不同地区, 早期俯冲造山作用是否具有统一的时间和动力学体系还不清楚. 柴北缘古生代造山期花岗岩可分为 5 期(第一期(475~460 Ma), 洋壳俯冲; 第二期(450~440 Ma), 陆壳俯冲; 第三期(410~395 Ma), 板片断离与折返; 第四期(385~370 Ma), 拆沉和调整; 第五期(275~260 Ma), 陆内俯冲; 据吴才来等^[75,76]). 秦岭古生代花岗岩第二、三阶段岩浆活与其第二、三期可大致对应, 但是第一阶段活动的时间明显较早, 另外, 目前还没有鉴别出 385~370 Ma 的花岗岩. 昆仑地区比较早的古生代花岗岩大致在 440~430 Ma^[77,78], 与秦岭第二阶段花岗岩大致同时. 在大别山北麓最早的古生代弧岩浆年龄为(464±3), (459±7) Ma^[9]. 由此可见, 在中央造山系, 秦岭地区古生代岩浆弧开始的时间比西部柴北缘、昆仑造山带和东部大别山北麓造山带要早, 联系到秦岭古生代超高压变质也略早(与刘良交流), 中央造山系在古生代时期在

秦岭地区(东段)先开始俯冲造山, 这可能反映了多块体、不同时的俯冲碰撞过程. 而后期(志留纪-泥盆纪)的岩浆活动有大致同期碰撞的迹象或不规则板块边界的不等式效应, 说明俯冲之后的全面汇聚碰撞可能具有大致相同的时间.

7 结论

(1) 北秦岭最大的 S 型花岗岩(漂池岩体)锆石 SIMS 定年获得(495±6) Ma, 解释为岩体形成年龄. 灰池子 I 型花岗岩体获得锆石 LA-ICPMS 年龄(421±27) Ma 和 SIMS 年龄(434±7) Ma, 后者解释为岩体形成年龄.

(2) 以漂池岩体为代表的 S 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.2 \sim -8.8$, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -6 \sim -39$, $I_{\text{Sr}} = 0.727 \sim 0.7248$, 岩浆主要源自类似秦岭群的古老地壳. 以灰池子岩体为代表的 I 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.9 \sim 1$, $I_{\text{Sr}} = 0.70530 \sim 0.7062$; 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11 \sim -8.4$; 一种可能的成因是形成于壳幔物质混合的下地壳的部分熔融.

(3) 依据 30 个锆石年龄统计分析, 北秦岭花岗岩浆演化经历了 3 个阶段, 揭示了 3 个阶段的造山作用过程. 第一阶段寒武纪-早奥陶世(505~470 Ma)岩浆主要发育于北秦岭东段, 以 I 型花岗岩为主, 伴有 S 型花岗岩; 形成于板块俯冲背景, 其中 S 型花岗岩形成于超高压岩石地体抬升过程中的陆缘熔融. 第二阶段晚奥陶世-中志留世(450~422 Ma)广布全区, 发育 I 型花岗岩, 一些花岗岩具有高 Sr、低 Y 的特点; 形成于块体碰撞挤出略后的抬升环境. 第三阶段晚泥盆世(415~400 Ma)仅发育于北秦岭中段, 以 I 型花岗岩为主, 形成于碰撞晚期阶段.

(4) 上述组合特征说明, 不同类型(S, I 型)的花岗岩可以发育于同一个构造事件(俯冲、碰撞)和环境中. 古生代花岗岩带的时空演变反映了秦岭古生代造山作用具有长期连续性、阶段性的俯冲碰撞特点. 在空间上没有显示出明显的垂直俯冲带的南北向空间迁移特点.

(5) 北秦岭古生代 3 个阶段岩浆演化精确限定了秦岭造山带古生代 3 个阶段造山作用过程的时限和性质. 俯冲作用应该首先从东段(今商南一带)开始, 早于临近的祁连-柴达木北缘造山带、昆仑造山带和大别山北麓造山带, 这可能反映了中央造山系古生代俯冲增生直到小块体碰撞的多块体、不同时的俯冲碰撞过程.

致谢 李献华研究员在年代学测试上给予了帮助并进行了有益的学术讨论, 张宗清研究员参与了合作研究, 张旗和吴才来研究员对本文提出很好的意见, 评审人提出了建设性修改建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Mattauer M, Matte P, Malavieille J, et al. Tectonics of the Qinlingbelt: build up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 1985, 317: 496—500[[doi](#)]
- 2 Kröner A, Zhang G W, Sun Y, et al. Granites in the Tongbai area, Qinling belt, China: geochemistry, petrology, single zircon geochronology and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia. *Tectonics*, 1993, 12(1): 245—255[[doi](#)]
- 3 Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: controversy and reconciliation. *Geology*, 1999, 27: 1—96
- 4 张国伟, 袁学诚, 张本仁, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 1—806
- 5 Lerch M F, Xue F, Kroner A, et al. A middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of central China. *J Geol*, 1995, 103: 437—449
- 6 Xue F, Lerch M F, Kroner A, et al. Tectonic evolution of the East Qinling Mountain, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model. *Tectonophysics*, 1996, 253: 271—284[[doi](#)]
- 7 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭造山带中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 2003
- 8 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化. *地质通报*, 2004, 23(2): 107—112
- 9 马昌前, 明厚利, 杨坤光. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据. *岩石学报*, 2004, 20(3): 399—402
- 10 Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 2000, 323: 183—196[[doi](#)]
- 11 游振东, 索书田. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 1—202
- 12 王涛, 胡能高, 裴先治, 等. 秦岭造山带核部杂岩的组成、构造格局及演化. *地球学报*, 1997, 18(4): 345—351
- 13 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义. *科学通报*, 1994, 39(21): 2013
- 14 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用来自含柯石英锆石的定年证据. *地质学报*, 2003, 77(4): 463—477
- 15 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *科学通报*, 2004, 49(18): 1901—1908
- 16 刘良, 周鼎武, 王焰, 等. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(增刊): 56—63
- 17 孙勇, 卢欣祥, 韩松, 等. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(增刊): 49—55
- 18 王涛, 张国伟, 王晓霞, 等. 一种可能的多陆块、小洋盆、弱俯冲的动力学特征及其花岗岩演化特点——以秦岭造山带核部及其花岗岩为例. *南京大学学报(自然科学)*, 1999, 35(6): 599—667
- 19 王涛, 张宗清, 王彦斌, 等. 秦岭造山带新元古代同碰撞花岗岩变形及其时代限定——强变形岩体与弱变形脉体的锆石 SHRIMP 年龄证据. *地质学报*, 2005, 79(2): 220—231
- 20 Wang T, Wang X X, Zhang G W, et al. Remnants of a Neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling orogenic belt (China). *Gondwana Res*, 2003, 26: 699—710
- 21 张成立, 刘良, 张国伟, 等. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义. *地学前缘*, 2004, 11(3): 33—42
- 22 Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 2003, 366: 1—53[[doi](#)]
- 23 Wang T, Pei X Z, Wang X X, et al. Orogen-parallel westward oblique uplift of the Qinling complex in the core of the Qinling orogen (China): an example of oblique extrusion of deep-seated metamorphic rocks in a convergent orogen. *J Geol*, 2005, 113: 181—200[[doi](#)]
- 24 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 304—316
- 25 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511—1520
- 26 Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostand News*, 1995, 11(9): 1—23[[doi](#)]
- 27 Li X H, Liu Y, Li Q L, et al. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 2009, 10: Q04010[[doi](#)]
- 28 李献华, 李武显, 王选策, 等. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(7): 872—887
- 29 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26—30
- 30 Gao S, Ling W, Qiu Y, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 2071—2088
- 31 Qiao G S. Normalization of isotopic dilution analyses—a new program for isotope mass spectrometric analysis. *Sci Sin Ser A*, 1988, 31: 1263—1268
- 32 Yang J H, Zhou X H. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 2001, 29: 711—714[[doi](#)]
- 33 Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determination of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chem Geol*, 2008, 247: 100—118[[doi](#)]
- 34 张宏飞, 骆庭川, 张本仁. 北秦岭溧池岩体的源区特征及其形成的构造环境. *地质论评*, 1996, 42(3): 209—214

- 35 田伟. 东秦岭加里东期花岗岩的区域岩石成因和大地构造环境. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2003. 12
- 36 Wang T, Wang X X, Li W P. Evaluation of multiple emplacement mechanisms of Huichizi granite pluton, Qinling orogenic belt, central China. *J Struct Geol*, 2000, 22(4): 505—518[[doi](#)]
- 37 严阵. 秦岭花岗岩. 西安: 西安交通大学出版社, 1985. 53—173
- 38 李伍平, 王涛, 王晓霞, 等. 北秦岭灰池子复式岩体单颗粒锆石年龄. *中国区域地质*, 2000, 19(2): 172—174
- 39 李伍平, 王涛, 王晓霞. 北秦岭灰池子花岗岩复式岩体的源岩讨论——元素-同位素地球化学制约. *地球科学*, 2001, 26(3): 269—278
- 40 张宏飞, 骆庭川, 张本仁. 北秦岭灰池子花岗岩基成岩物质来源探讨. *矿物岩石*, 1994, (1): 67—73
- 41 陈岳龙. 东天山、北秦岭花岗岩类地球化学. 北京: 地质出版社, 1999
- 42 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 2006
- 43 黄莹, 吴利仁. 陕西地区岩浆岩 Nd、Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系. *岩石学报*, 1990, (2): 1—8
- 44 闫全人, 陈隽璐, 王宗起, 等. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(10): 1301—1313
- 45 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 东秦岭商丹带北侧新元古埃达克质花岗岩及其地质意义. *中国地质*, 2003, 30(4): 373—381
- 46 田伟, 魏春景. 北秦岭造山带加里东期低 Al-TTD 系列: 岩石特征、成因模拟及地质意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(3): 215—224
- 47 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1994
- 48 Kcto L S, Jacobsen S B. Nd and Sr isotopic variations of Early Palaeozoic oceans. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 84: 27—41[[doi](#)]
- 49 Xue F, Kroner A, Reischmann T, et al. Palaeozoic pre-and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid. *J Geol Soc London*, 1996, 153: 409—417[[doi](#)]
- 50 孙廷贵, 张国伟, 王瑾. 秦昆结合区两期基性岩墙群的定年及其构造意义. *地质学报*, 2004, 78(1): 66—71
- 51 刘军锋, 孙勇. 东秦岭松树沟超基性岩体“热”侵位时代新知. *地质论评*, 2005, 51(2): 189—192
- 52 李惠民, 陈志宏, 相振群. 秦岭造山带商南-西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石同位素年龄的差异. *地质通报*, 2006, 25(6): 653—659
- 53 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 等. 秦岭祁连山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(6): 455—462
- 54 陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 等. 秦祁结合部位王家岔石英闪长岩体锆石 LA-ICPMS 定年及地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(3): 423—431
- 55 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义. *现代地质*, 2008, 22(1): 63—70
- 56 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(增刊): 224—234
- 57 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束. *西北地质*, 2008, 41(1): 1—21
- 58 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约. *科学通报*, 2004, 49(12): 1209—1211
- 59 Middlemost E A K. *Magmas and Magmatic Rocks*. London: Longman, 1985. 1—266
- 60 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 秦岭-大别花岗岩. 北京: 地质出版社, 1992
- 61 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. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 1—446
- 62 张成立, 张国伟, 卢欣祥. 东秦岭宽坪花岗岩体特征及成. *西北地质*, 1994, 15(1): 27—34
- 63 裴先治, 李厚民, 李国光. 北秦岭商南花岗岩体的地球化学特征及其形成的构造环境. *西安地质学院学报*, 1996, 18(3): 29—35
- 64 裴先治. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化. 西安: 西安地图出版社, 1997. 1—184
- 65 河南地质调查院. 1/25 万区调报告内乡县幅. 2002
- 66 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol Soc Spec Publ*, 1989, 42: 313—345[[doi](#)]
- 67 Depaolo D J, Lin S M, Schuber G. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation age from Sm-Nd isotopic data and application to the Southwestern united states. *J Geophys Res*, 1991, 96: 2071—2088[[doi](#)]
- 68 卢欣祥. 东秦岭花岗岩. 见: 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 250—260
- 69 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 东秦岭富水基性杂岩体地球化学特征及其形成环境. *地球化学*, 1997, 26: 79—88
- 70 Rapp R P. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition and source permeability. *J Geophys Res*, 1995, 100(B8): 15601—15610[[doi](#)]
- 71 Rapp R P, Yaxley G M, Norman M D. Continent formation in the Archean and chemical evolution of the cratonic lithosphere. The 9th International Kimberlite Conference Extended Abstract, 2008, No. 9IKC-A-00341
- 72 Chappell B W, White A J R, Williams I S, et al. Low- and high-temperature granites. *Trans Roy Soc Edinb-Earth Sci*, 2004, 95: 125—140[[doi](#)]
- 73 王涛, 张国伟, 王晓霞, 等. 花岗岩生长方式及构造运动学、动力学意义——以秦岭造山带核部花岗岩为例. *地质科学*, 1999, 34(3): 326—335
- 74 Condie K C. *Accretionary orogens in space and time*. *Geol Soc Am Memoir*, 2007, 200(9): 1—14
- 75 吴才来, 杨经纶, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作用. *地质学报*, 2004, 78(5): 658—672
- 76 吴才来, 郝源红, 吴锁平, 等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 930—949
- 77 龙晓平, 金巍, 葛文春, 等. 昆仑金水口花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地球化学*, 2006, 35(4): 368—376
- 78 崔建堂, 王炬川, 边小卫, 等. 西昆仑康西瓦北侧蒙古包-普守一带早古生代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年. *地质通报*, 2007, 26(6): 710—719