

秦祁结合部位宝鸡地区早泥盆世香泉A型正长花岗岩年龄、地球化学特征及其构造意义

徐通¹, 陈清敏^{1,2}, 郭岐明^{1,2}, 张拴厚^{1,2}, 毛友亮³, 王强^{1,2}

XU Tong¹, CHEN Qingmin^{1,2}, GUO Qiming^{1,2}, ZHANG Shuanhou^{1,2}, MAO Youliang³, WANG Qiang^{1,2}

1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西地矿汉中地质大队, 陕西 汉中 723000

1. Shaanxi Geological Survey, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. Hanzhong Geological Branch, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Hanzhong 723000, Shaanxi, China

摘要:对秦祁结合部位宝鸡地区香泉正长花岗岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和岩石地球化学研究。结果显示, 锆石²⁰⁶Pb/²³⁸Pb年龄加权平均值为410±5Ma (MSWD=0.20, n=18), 限定该岩体的形成时代为早泥盆世。香泉正长花岗岩具有高硅(SiO₂=69.63%~73.94%)、富钾(K₂O=4.24%~4.88%, K₂O/Na₂O=1.23~1.44)、富铁(TFe₂O₃=2.10%~3.70%, TFe₂O₃/MgO=3.88~6.84)、低镁(MgO=0.31%~0.94%)、低磷(P₂O₅=0.08%~0.21%)的特征, 属准铝质、高钾钙碱性系列。香泉正长花岗岩稀土元素含量较高(318×10⁻⁶~499×10⁻⁶), 表现出明显的负Eu异常(δEu=0.37~0.46), 富集Rb、Th、Zr、Sm、Ga(10000×Ga/Al=2.59~2.93)等微量元素, 贫Ba、Nb、Ta、Sr, 整体表现出A型花岗岩特征。结合区域资料认为, 香泉正长花岗岩形成于造山后环境, 为低压环境下长英质地壳物质部分熔融成因。

关键词:香泉正长花岗岩; 宝鸡地区; 秦祁结合部位; 造山后A型花岗岩; 早泥盆世

中图分类号: P534.44; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)07-1118-11

Xu T, Chen Q M, Guo Q M, Zhang S H, Mao Y L, Wang Q. Age and geochemical features of the Early Devonian Xiangquan A-type syenogranites from Baoji area at the conjunction of Qinling and Qilian Orogen and their tectonic significance. Geological Bulletin of China, 2017, 36(7):1118-1128

Abstract: Xiangquan syenogranites are located in Baoji area at the conjunction of Qinling and Qilian Orogen, and their LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological and petrogeochemical studies were conducted in this paper. The results show that the zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸Pb weighted average age of Xiangquan syenogranites is 410±5Ma (MSWD=0.20, n=18), indicating that the crystallization age of the syenogranites is Early Devonian. Xiangquan syenogranites are high in SiO₂ (SiO₂=69.63%~73.94%), K₂O (K₂O=4.24%~4.88%, K₂O/Na₂O=1.23~1.44), and TFe₂O₃ (TFe₂O₃=2.10%~3.70%, TFe₂O₃/MgO=3.88~6.84), but low in MgO (MgO=0.31%~0.94%) and P₂O₅ (P₂O₅=0.08%~0.21%), belonging to high-K calc-alkaline series with metaluminous features. In addition, they are enriched in total REE (318×10⁻⁶~499×10⁻⁶), with obvious negative Eu anomaly (δEu=0.37~0.46). The trace elements show enrichment of Rb, Th, Zr, Sm and Ga (10000×Ga/Al=2.59~2.93), depletion of Ba, Nb, Ta and Sr, with the characteristics of A-type granites on

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2017-02-24

资助项目: 陕西省公益性地勘专项项目《陕西秦岭造山带中生代构造体制与成矿作用研究》(编号: 20130301)

作者简介: 徐通(1988-), 男, 博士, 工程师, 从事造山带研究。E-mail: xutong198819@163.com

通讯作者: 陈清敏(1984-), 女, 博士, 工程师, 从事岩浆岩研究。E-mail: 156396685@qq.com

the whole. Combined with regional data, the authors hold that the Xiangquan syenogranites were formed in a post-orogenic tectonic setting and derived from partially melted felsic crust under low pressures.

Key words: Xiangquan syenogranites; Baoji area; conjunction of Qinling and Qilian Orogen; post-orogenic A-type granites; Early Devonian

花岗岩的成因类型和形成时代是探讨地壳生长和地球动力学背景的重要指示标志^[1-2]。在中央造山系,分布有元古宙—中生代不同类型、不同成因的花岗岩类^[3-4]。宝鸡岩体位于华北板块、祁连造山带和北秦岭造山带构造交接部位的(图 1-a),由于其独特的构造位置,近年来倍受地学界关注。不同学者在宝鸡岩体内解体出元古宙、加里东期、中生代等不同时代、不同成因的岩浆岩类^[5-22],其中加里东期岩浆记录类型尤为丰富(图 1-b),记录了早古生代天水—武山主洋盆俯冲、陆缘弧形成、陆缘弧裂解、弧后盆地打开、弧后盆地俯冲、全面碰撞造山、后碰撞调整的过程,但后碰撞调整结束的时间节点仍缺乏较多的年代学支撑。本文首次正式报道了宝鸡岩体内存在泥盆纪 A 型正长花岗岩,获得其结晶年龄为 $410 \pm 5 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.20, n = 18$),属早泥盆世早期,形成于造山后环境,指示秦祁结合部位在早泥盆世早期已经完成碰撞调整,全面进入造山后演化阶段。

1 区域地质背景

香泉正长花岗岩体是本次研究新发现的一套正长花岗岩体,位于北祁连造山带东端秦祁结合部位,与中晚三叠世关山岩体呈侵入接触关系,西部被白垩系三桥组(K_3s)不整合覆盖。关山岩体主体为一套肉红色中—粗粒(含)斑状二长花岗岩,局部可见肉红色细粒二长花岗岩,三桥组为一套陆相复成分砾岩、砂砾岩沉积。香泉含斑中粗粒正长花岗岩新鲜面为肉红色,风化色为灰白色—浅肉红色,具斑状结构,斑晶主要为钾长石(约 3%),主体呈他形,粒径为 8~30mm,基质由碱性长石(约 55%)、斜长石(约 13%)、石英(约 27%)、黑云母(约 5%)组成,颗粒大小不等,主体粒径为 0.15~5mm。碱性长石为微斜长石、正长石、条纹长石,微斜长石呈他形,表面多具轻微粘土化;正长石呈他形,表面具粘土化;条纹长石呈半自形板状。斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,见双晶纹弯曲。石英呈他形,与长石颗粒呈镶嵌状,具波状消光。岩石受动力作用发生碎裂,碎粉呈条带状定向分布或环绕碎块分

布,局部碎块呈眼球状,见微裂隙杂乱分布,裂隙被方解石、硅质充填。

2 测试方法

本文样品在陕西省地质矿产实验研究所(国土资源部西安矿产资源监督检测中心)进行主量、稀土和微量元素分析测试。主量元素用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES,型号为 iCAP 6300)进行分析,分析流程参照 GB/T 14506—2010,分析精度优于 1%。稀土元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS,型号为 X Series 2)进行分析,分析流程参照 GB/T 17417—2010。微量元素用 ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪(X 射线荧光光谱法)、IRIS Intrepid II XSP 型等离子体发射光谱仪(等离子体发射光谱法)、X Series II 型等离子体质谱仪(ICP-MS)测试,分析精度为 5%~10%。

锆石分选在河北省廊坊市地源矿物测试分选技术服务有限公司完成。锆石阴极发光(CL)显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室 Gatan MonoCL3+X 型阴极荧光光谱仪上完成。锆石 U-Pb 同位素测试在西安地质调查中心的 LA-ICP-MS 仪器上进行,分析仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7700x 四极杆型质谱仪和德国相干公司(Coherent)生产的 Geolas Pro 193nm 准分子型激光剥蚀系统。激光剥蚀束斑直径为 $30 \mu\text{m}$,剥蚀深度为 20~40 μm 。单个分析点的同位素比值和年龄误差为 1σ ,锆石年龄采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,年龄加权平均值具有 95%的置信度。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

测年样品 XQ-1 的地理坐标为北纬 $34^{\circ}29.958'$ 、东经 $106^{\circ}45.856'$ 。测年样品为肉红色含斑中粗粒正长花岗岩,锆石晶体呈浅黄色—无色,粒径介于 40~170 μm 之间,大部分颗粒较小,呈自形浑圆状—短柱状,约占样品总颗粒的 2/3,部分呈长柱状,颗粒较大,约占 1/3。锆石 CL 图像(图 3)显示,大部分锆石生长环带较清晰,部分锆石晶体有少量溶蚀,破裂明显,发育核幔结构。选取 30 颗锆石进行 LA-

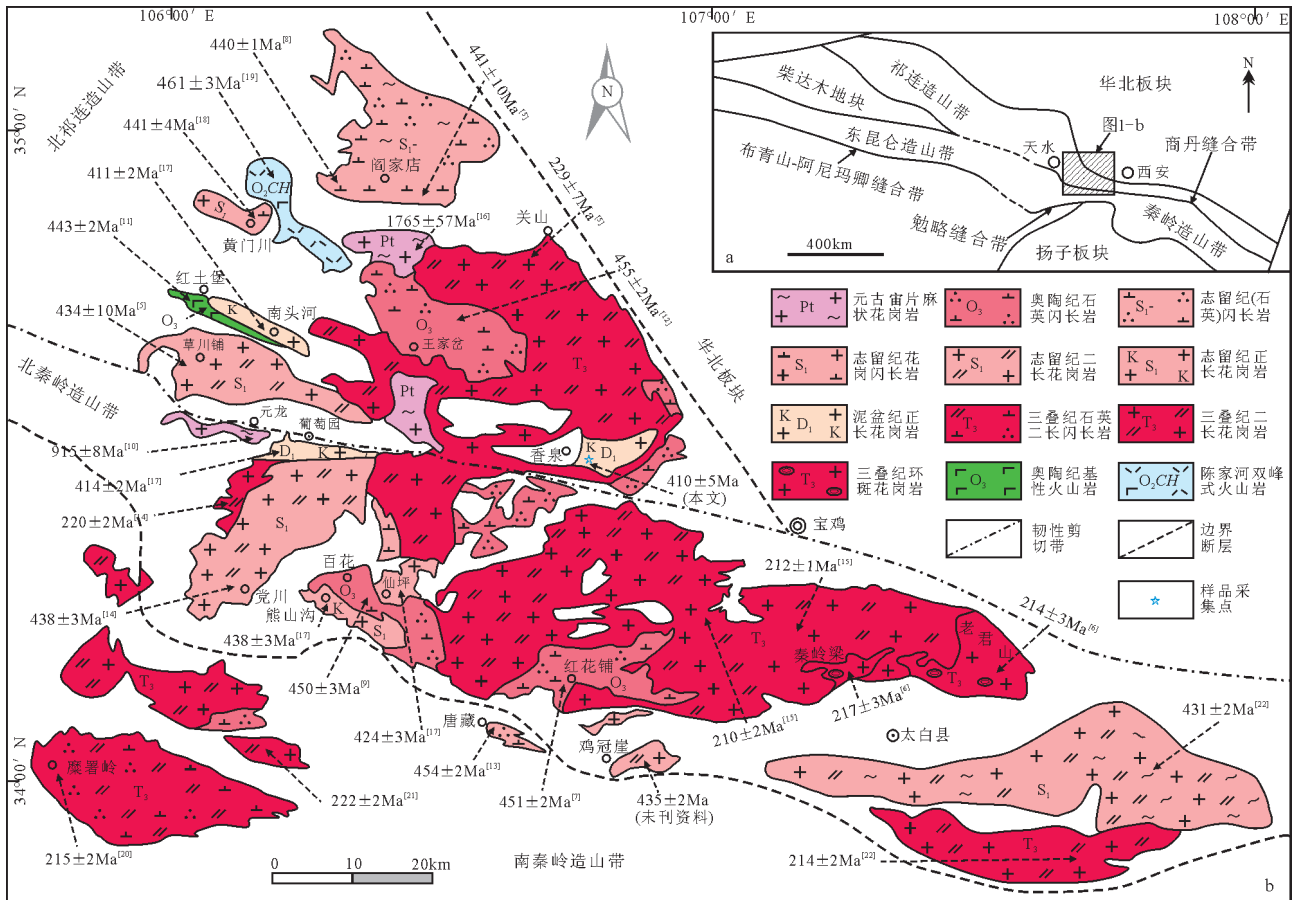


图1 北秦岭宝鸡地区构造位置(a)和侵入岩分布略图(b)(据参考文献①②修改)

Fig.1 Tectonic setting map (a) and intrusive rock distribution sketch map (b) of Baoji area, North Qinling Mountain

ICP-MS测定,分析结果见表1,其中03、08、10、12、22、25号点谐和度较差,剔除不用,选取其余24颗谐和度较好的锆石进行分析。24颗锆石数据点(01~

02、04~07、09、11、13~21、23~24、26~30号点)在U-Pb谐和图(图4-a)上可分为2组。第一组锆石(1、2、4、7、11、23号点)²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为451~431Ma, Th/U值

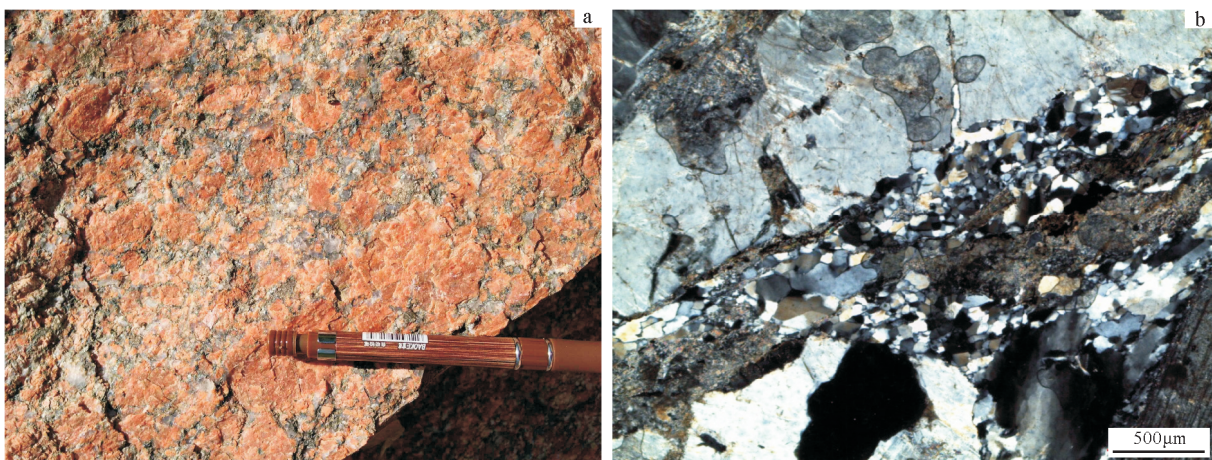


图2 香泉正长花岗岩手标本(a)和显微照片(b)(正交偏光)

Fig.2 Field photograph (a) and microphotograph (b) of Xiangquan syenogranites

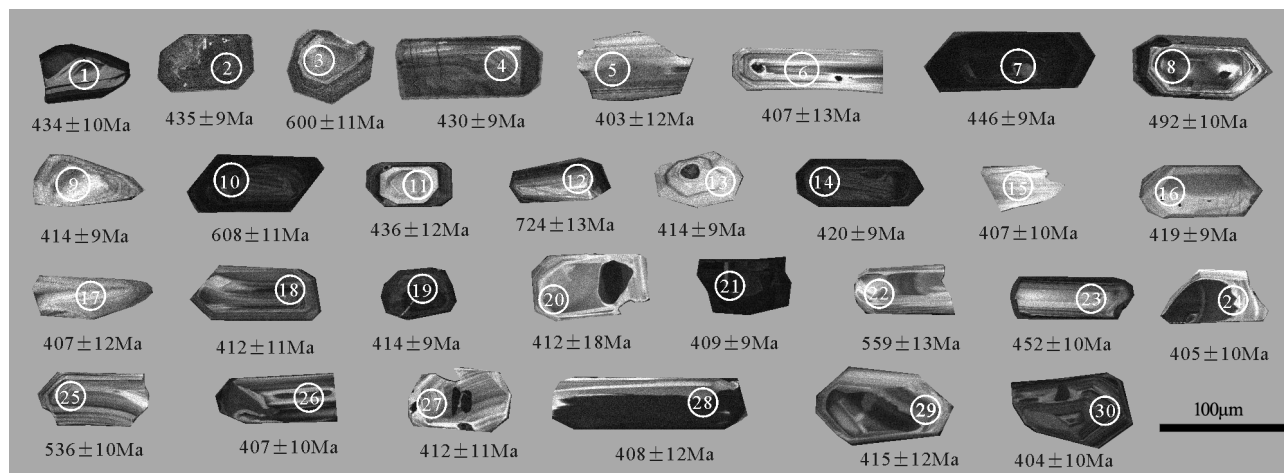


图 3 香泉正长花岗岩锆石阴极发光图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(样品 XQ-1)

Fig. 3 Zircon cathodoluminescence images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of Xiangquan syenogranites (sample XQ-1)

为 0.17~2.12。该组锆石普遍发育核幔结构,测点全部在核部,指示其为捕获锆石。第二组锆石(05、06、09、13~21、24、26~30 号点) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 420~403Ma, Th、U 含量较高,分别为 $147 \times 10^{-6} \sim 1064 \times 10^{-6}$ 、 $88 \times 10^{-6} \sim 1081 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.36~2.59 (除 19 号测点外,全部大于 0.4)。该组锆石生长环带清晰,不发育核幔结构,为岩浆成因锆石^[23-24], $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $410 \pm 5\text{Ma}$ (MSWD=0.20, $n=18$) (图 4-b)。该年龄可解释为花岗岩的结晶年龄,即香泉正长花岗岩形成于早泥盆世早期。

4 岩石地球化学

4.1 主量元素

本文所测 7 个样品的主量、稀土、微量元素含量及特征值见表 2、表 3。香泉正长花岗岩的 SiO_2 含量为 69.63%~73.94%, 平均值为 72.14%, TiO_2 含量为 0.22%~0.62%, Na_2O 含量为 3.39%~3.60%, K_2O 含量为 4.24%~4.88%, Al_2O_3 含量为 13.57%~14.87%, TFe_2O_3 含量为 2.10%~3.70%, MgO 含量为 0.31%~0.94%, P_2O_5 含量为 0.08%~0.21%。AR 指数为 2.34~

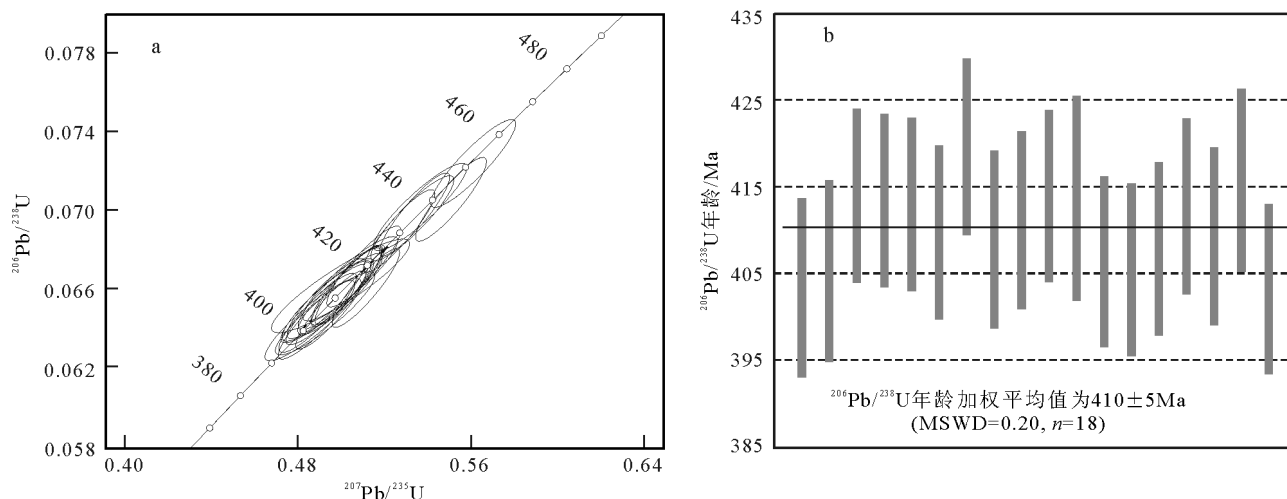


图 4 香泉正长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图(b)(样品 XQ-1)

Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (a) and U-Pb age plot (b) of Xiangquan syenogranites (sample XQ-1)

表1 香泉正长花岗岩(样品XQ-1)LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analytical data of Xiangquan syenogranites (sample XQ-1)

| 测点 编号 | ²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U | | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | 谐和度 /% | |
|----------|--------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|--------------------------------------|------|-----------|-----|
| | 206Pb 10 ⁻⁶ | ²³² Th | ²³⁸ U | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 年龄/Ma | 1σ | 年龄/Ma | 1σ | 年龄/Ma | 1σ | | |
| 1 | 64 | 88 | 218 | 0.41 | 0.0697 | 0.0018 | 0.5331 | 0.016 | 0.0556 | 0.0015 | 434 | 10 | 434 | 11 | 437 | 58 | 100 |
| 2 | 343 | 199 | 1164 | 0.17 | 0.0699 | 0.0017 | 0.5341 | 0.013 | 0.0556 | 0.0012 | 435 | 9 | 436 | 10 | 435 | 45 | 100 |
| 3 | 150 | 314 | 520 | 0.60 | 0.0686 | 0.0017 | 0.8058 | 0.020 | 0.0854 | 0.0018 | 600 | 11 | 428 | 10 | 1325 | 40 | 71 |
| 4 | 131 | 162 | 450 | 0.36 | 0.0691 | 0.0017 | 0.5270 | 0.013 | 0.0555 | 0.0012 | 430 | 9 | 431 | 10 | 431 | 47 | 100 |
| 5 | 32 | 270 | 118 | 2.30 | 0.0646 | 0.0017 | 0.4873 | 0.018 | 0.0549 | 0.0020 | 403 | 12 | 403 | 10 | 407 | 77 | 100 |
| 6 | 28 | 218 | 103 | 2.12 | 0.0649 | 0.0017 | 0.4928 | 0.019 | 0.0552 | 0.0020 | 407 | 13 | 405 | 10 | 421 | 79 | 100 |
| 7 | 551 | 1159 | 1854 | 0.62 | 0.0707 | 0.0017 | 0.5510 | 0.013 | 0.0567 | 0.0011 | 446 | 9 | 440 | 10 | 478 | 44 | 99 |
| 8 | 75 | 609 | 257 | 2.37 | 0.0698 | 0.0017 | 0.6227 | 0.017 | 0.0649 | 0.0015 | 492 | 10 | 435 | 10 | 770 | 48 | 88 |
| 9 | 59 | 331 | 212 | 1.56 | 0.0663 | 0.0017 | 0.5033 | 0.014 | 0.0551 | 0.0014 | 414 | 9 | 414 | 10 | 418 | 53 | 100 |
| 10 | 242 | 717 | 819 | 0.88 | 0.0704 | 0.0017 | 0.8202 | 0.020 | 0.0846 | 0.0018 | 608 | 11 | 439 | 10 | 1307 | 40 | 72 |
| 11 | 29 | 148 | 100 | 1.48 | 0.0703 | 0.0018 | 0.5367 | 0.018 | 0.0555 | 0.0017 | 436 | 12 | 438 | 11 | 431 | 67 | 100 |
| 12 | 56 | 382 | 190 | 2.02 | 0.0705 | 0.0018 | 1.0402 | 0.027 | 0.1073 | 0.0024 | 724 | 13 | 439 | 11 | 1754 | 40 | 61 |
| 13 | 95 | 201 | 344 | 0.59 | 0.0663 | 0.0017 | 0.5028 | 0.013 | 0.0551 | 0.0013 | 414 | 9 | 414 | 10 | 418 | 50 | 100 |
| 14 | 200 | 774 | 722 | 1.07 | 0.0662 | 0.0016 | 0.5116 | 0.013 | 0.0562 | 0.0012 | 420 | 9 | 413 | 10 | 459 | 46 | 98 |
| 15 | 41 | 387 | 149 | 2.59 | 0.0656 | 0.0017 | 0.4935 | 0.015 | 0.0546 | 0.0015 | 407 | 10 | 410 | 10 | 397 | 60 | 101 |
| 16 | 109 | 491 | 387 | 1.27 | 0.0673 | 0.0017 | 0.5108 | 0.014 | 0.0552 | 0.0013 | 419 | 9 | 420 | 10 | 418 | 52 | 100 |
| 17 | 30 | 147 | 110 | 1.33 | 0.0655 | 0.0017 | 0.4933 | 0.017 | 0.0547 | 0.0018 | 407 | 12 | 409 | 10 | 401 | 71 | 100 |
| 18 | 32 | 242 | 115 | 2.10 | 0.0659 | 0.0017 | 0.4997 | 0.016 | 0.0551 | 0.0016 | 412 | 11 | 411 | 10 | 416 | 64 | 100 |
| 19 | 225 | 289 | 813 | 0.36 | 0.0664 | 0.0016 | 0.5038 | 0.013 | 0.0551 | 0.0012 | 414 | 9 | 414 | 10 | 418 | 46 | 100 |
| 20 | 24 | 184 | 88 | 2.08 | 0.0663 | 0.0019 | 0.5000 | 0.026 | 0.0548 | 0.0029 | 412 | 18 | 414 | 12 | 403 | 113 | 101 |
| 21 | 292 | 1064 | 1081 | 0.98 | 0.0651 | 0.0016 | 0.4955 | 0.013 | 0.0553 | 0.0013 | 409 | 9 | 406 | 10 | 424 | 50 | 99 |
| 22 | 26 | 203 | 95 | 2.14 | 0.0666 | 0.0017 | 0.7339 | 0.022 | 0.0800 | 0.0022 | 559 | 13 | 415 | 10 | 1198 | 52 | 74 |
| 23 | 52 | 367 | 173 | 2.12 | 0.0725 | 0.0018 | 0.5612 | 0.016 | 0.0562 | 0.0014 | 452 | 10 | 451 | 11 | 459 | 56 | 100 |
| 24 | 45 | 258 | 166 | 1.55 | 0.0649 | 0.0016 | 0.4894 | 0.015 | 0.0547 | 0.0015 | 405 | 10 | 406 | 10 | 401 | 59 | 100 |
| 25 | 39 | 219 | 136 | 1.61 | 0.0689 | 0.0017 | 0.6952 | 0.020 | 0.0733 | 0.0019 | 536 | 12 | 429 | 11 | 1022 | 51 | 80 |
| 26 | 39 | 206 | 143 | 1.44 | 0.0653 | 0.0017 | 0.4937 | 0.015 | 0.0548 | 0.0016 | 407 | 10 | 408 | 10 | 405 | 63 | 100 |
| 27 | 41 | 320 | 149 | 2.15 | 0.0661 | 0.0017 | 0.4998 | 0.016 | 0.0548 | 0.0016 | 412 | 11 | 413 | 10 | 405 | 63 | 100 |
| 28 | 41 | 206 | 152 | 1.36 | 0.0656 | 0.0017 | 0.4942 | 0.017 | 0.0547 | 0.0018 | 408 | 12 | 409 | 10 | 400 | 72 | 100 |
| 29 | 53 | 297 | 192 | 1.54 | 0.0667 | 0.0018 | 0.5045 | 0.018 | 0.0549 | 0.0019 | 415 | 12 | 416 | 11 | 409 | 73 | 100 |
| 30 | 65 | 344 | 245 | 1.41 | 0.0646 | 0.0016 | 0.4889 | 0.014 | 0.0549 | 0.0015 | 404 | 10 | 403 | 10 | 410 | 58 | 100 |

2.71, 平均值为2.60, σ 指数为1.93~2.56, 平均值为2.28, 属钙碱性系列, K_2O/Na_2O 值为1.23~1.44, 为钾质。A/CNK 值为1.00~1.06, 平均值为1.03, 属准铝质。碱铝指数(AKI)为0.73~0.79, TFe_2O_3/MgO 值为3.88~6.84。 $Mg^{\#}$ 值为20.68~31.50, 平均值为26.00。在 $SiO_2-(Na_2O+K_2O)$ 图解^[25](图5-a)及 SiO_2-K_2O 图解^[26](图5-b)中, 香泉正长花岗岩表现出高钾钙碱性花岗岩特征。整体看, 香泉正长花岗岩具有高硅、富钾、低镁、低钛、低磷的主量元素特征, 属准铝质、高钾钙碱性系列。

4.2 稀土和微量元素

香泉正长花岗岩的稀土元素总量($\sum REE$)为 $318 \times 10^{-6} \sim 499 \times 10^{-6}$, 平均值为 390×10^{-6} , 轻/重稀土元素比值($\sum LREE/\sum HREE$)为10.74~14.59。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图6-a)显示, 稀土元素配分曲线整体右倾呈“海鸥式”分布, $(La/Yb)_N$ 值为11.07~16.61, $(La/Sm)_N$ 值为5.54~6.03, 重稀土元素分异不明显, $(Gd/Yb)_N$ 值为1.31~1.88。 δEu (0.37~0.46) 平均值为0.40, 负Eu异常明显, 暗示了斜长石分离结晶的发生或源区大量斜长石的残

表 2 香泉正长花岗岩主量元素分析结果

Table 2 Major elements analytical data of Xiangquan syenogranites

| 样品号 | | | | | | | | | | | | % | |
|------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|--|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TFe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | 烧失量 | 总量 | |
| XQ-1 | 71.16 | 0.28 | 13.94 | 2.88 | 0.07 | 0.50 | 1.53 | 3.56 | 4.77 | 0.11 | 1.42 | 100.22 | |
| XQ-2 | 71.35 | 0.28 | 13.83 | 2.70 | 0.07 | 0.43 | 1.51 | 3.50 | 4.80 | 0.10 | 1.29 | 99.86 | |
| XQ-3 | 72.15 | 0.27 | 13.83 | 2.59 | 0.07 | 0.41 | 1.28 | 3.35 | 4.77 | 0.09 | 1.16 | 99.97 | |
| XQ-4 | 73.02 | 0.22 | 13.40 | 2.31 | 0.06 | 0.30 | 1.43 | 3.35 | 4.58 | 0.09 | 1.05 | 99.81 | |
| XQ-5 | 72.92 | 0.23 | 13.62 | 2.43 | 0.06 | 0.40 | 1.49 | 3.42 | 4.19 | 0.08 | 1.26 | 100.10 | |
| XQ-6 | 69.38 | 0.61 | 13.86 | 4.06 | 0.09 | 0.93 | 1.94 | 3.47 | 4.31 | 0.21 | 1.30 | 100.15 | |
| XQ-7 | 68.68 | 0.52 | 14.67 | 3.58 | 0.08 | 0.83 | 1.95 | 3.34 | 4.81 | 0.17 | 1.32 | 99.95 | |

留。 δ Ce (0.99~1.02) 平均为 1.00, 未表现出 Ce 异常。香泉正长花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图整体右倾(图 6-b), 富集 Rb、U 等大离子亲石元素及 Th、La、Nd、Zr、Hf、Sm、Y 等惰性元素。与相邻元素相比, 表现出 Ba、K、Nb、Ta、Ce、Sr、P、Ti 谷。Ba 和 Sr 的同步亏损可能是由于斜长石的分离结晶作用或岩浆起源于斜长石稳定区导致的, P 和 Ti 的亏损可能是由于磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用或岩浆起源于磷灰石和钛铁矿稳定区导致的。样品 Rb/Sr 值为 0.50~1.11, 平均值为 0.86; Rb/Nb 值为 5.34~7.59, 平均值为 6.70; Nb/Ta 值为 7.52~13.44, 平均值为 8.72; Nb/La 值为 0.31~0.40, 平均值为 0.35。香泉正长花岗岩稀土及微量元素标准化曲线与天水地区葡萄园早泥盆世 A 型正长花岗

岩^[17](图 6 阴影部分)十分相似,二者位于新阳-元龙韧性剪切带两侧且距离较近,暗示其具有相似的地质意义。

5 讨论

5.1 岩石类型及成因

香泉正长花岗岩具有高硅、富钾、低镁、低钛、低磷的特征, TFe₂O₃/MgO 值(3.88~6.84)及碱铝指数(0.73~0.79)较高,与 A 型花岗岩主量元素特征类似^[28]。香泉正长花岗岩相对富集 Rb、Th、Zr、Nd、Zr、Hf、Y 等元素, Sr、Ba、Cr、Co、Ni 等元素含量较低,其 10000×Ga/Al 值介于 2.59~2.93 之间,平均值为 2.81,高于 I 型花岗岩和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.10、2.28),主体高于 A 型花岗岩的下限值 2.60^[28],与葡萄园 A 型花岗岩(2.34~2.78)接近^[17]。元素 Zr+Nb+Ce+Y 含量为 408×10⁻⁶~609×10⁻⁶,高于 A 型花岗岩下限值(350×10⁻⁶)^[28],在 10000×Ga/Al 与 Ce、Y、Nb、Na₂O+K₂O 图解及 Zr+Nb+Ce+Y 与 (K₂O+Na₂O)/CaO、TFe₂O₃/MgO 图解中,香泉正长花岗岩样品整体落入 A 型花岗岩区域内(图 7),且与葡萄园 A 型正长花岗岩较接近。

由于高分异 I、S 型花岗岩地球化学特征与 A 型花岗岩十分相似,因此有必要对其进行区分。相比 A 型花岗岩,高分异的 S 型花岗岩具有更高的 P₂O₅

表 3 香泉正长花岗岩稀土、微量元素分析结果

Table 3 Rare earth and trace element analytical data of Xiangquan syenogranites

| 样品号 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 ⁻⁶ | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|--|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Ba | Rb | Ga | Ni | | |
| XQ-1 | 82.8 | 170 | 18.6 | 57.7 | 8.88 | 1.04 | 7.48 | 1.17 | 5.84 | 1.10 | 3.49 | 0.54 | 3.36 | 0.56 | 775 | 211 | 20.5 | 5.28 | | |
| XQ-2 | 93.3 | 192 | 20.9 | 64.9 | 9.91 | 1.16 | 8.31 | 1.35 | 6.76 | 1.31 | 4.03 | 0.64 | 4.10 | 0.65 | 844 | 228 | 21.0 | 4.35 | | |
| XQ-3 | 88.9 | 181 | 19.8 | 61.6 | 9.28 | 1.06 | 7.75 | 1.24 | 6.19 | 1.20 | 3.64 | 0.57 | 3.79 | 0.62 | 772 | 218 | 20.6 | 5.08 | | |
| XQ-4 | 73.6 | 148 | 16.3 | 51.7 | 8.28 | 1.04 | 7.12 | 1.20 | 6.33 | 1.20 | 3.65 | 0.57 | 3.69 | 0.57 | 713 | 204 | 20.9 | 4.05 | | |
| XQ-5 | 71.4 | 144 | 16.0 | 50.3 | 8.10 | 0.96 | 7.08 | 1.31 | 7.30 | 1.40 | 4.29 | 0.68 | 4.35 | 0.66 | 671 | 184 | 21.4 | 4.86 | | |
| XQ-6 | 110 | 233 | 26.1 | 83.3 | 12.5 | 1.73 | 10.6 | 1.61 | 8.14 | 1.56 | 4.71 | 0.69 | 4.54 | 0.71 | 1098 | 183 | 21.3 | 7.13 | | |
| XQ-7 | 96.2 | 201 | 21.9 | 69.9 | 10.7 | 1.49 | 8.80 | 1.36 | 6.82 | 1.32 | 4.02 | 0.61 | 3.92 | 0.65 | 1159 | 180 | 20.4 | 7.17 | | |
| 样品号 | Cr | Hf | Sc | Ta | Co | U | Pb | Cs | Zr | Nb | Th | Sr | Y | δ Eu | δ Ce | (La/Yb) _N | (La/Sm) _N | (Gd/Yb) _N | | |
| XQ-1 | 8.72 | 5.93 | 3.79 | 3.43 | 5.50 | 4.77 | 28.6 | 1.41 | 222 | 27.8 | 48.4 | 198 | 34.6 | 0.38 | 1.00 | 16.61 | 5.87 | 1.80 | | |
| XQ-2 | 9.56 | 6.05 | 4.17 | 3.76 | 4.81 | 8.01 | 31.4 | 1.65 | 228 | 30.6 | 44.7 | 205 | 40.5 | 0.38 | 1.01 | 15.34 | 5.92 | 1.64 | | |
| XQ-3 | 43.7 | 6.34 | 3.65 | 3.90 | 3.19 | 4.18 | 26.2 | 1.66 | 231 | 29.3 | 45.7 | 206 | 36.5 | 0.37 | 1.00 | 15.81 | 6.03 | 1.65 | | |
| XQ-4 | 8.99 | 6.08 | 3.27 | 3.70 | 3.24 | 4.75 | 34.2 | 1.69 | 198 | 28.8 | 38.8 | 212 | 36.0 | 0.40 | 0.99 | 13.45 | 5.59 | 1.56 | | |
| XQ-5 | 9.50 | 5.72 | 3.13 | 2.15 | 3.80 | 5.30 | 42.4 | 1.56 | 193 | 28.9 | 35.8 | 223 | 42.5 | 0.38 | 0.99 | 11.07 | 5.54 | 1.31 | | |
| XQ-6 | 9.94 | 3.28 | 6.06 | 4.12 | 5.53 | 3.15 | 28.0 | 1.91 | 295 | 34.3 | 31.0 | 367 | 47.0 | 0.45 | 1.01 | 16.34 | 5.54 | 1.88 | | |
| XQ-7 | 15.3 | 3.76 | 5.67 | 4.16 | 5.94 | 3.92 | 87.9 | 2.20 | 287 | 32.0 | 35.6 | 355 | 40.3 | 0.46 | 1.02 | 16.55 | 5.66 | 1.81 | | |

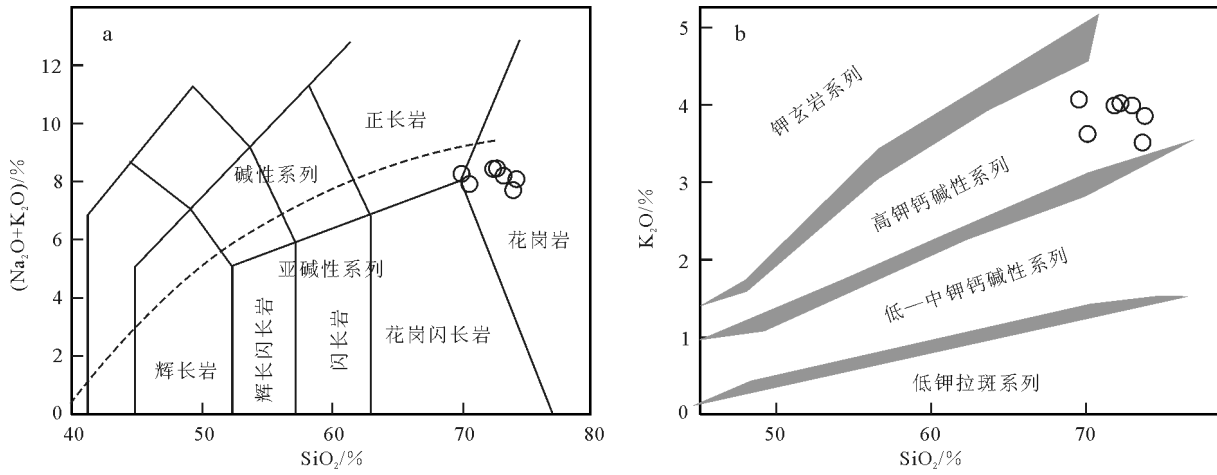


图5 香泉正长花岗岩 SiO₂-(Na₂O+K₂O)(a)和 SiO₂-K₂O 图解(b)
Fig.5 SiO₂-(Na₂O+K₂O)(a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams of Xiangquan syenogranites

含量(平均值为0.14%)和更低的Na₂O含量(平均值为2.81%)^[29];高分异的I型花岗岩则具有更低的TFe₂O₃含量(<1.00%)、Ga/Al值和更高的Rb含量(>270×10⁻⁶)^[30]。香泉正长花岗岩较低的P₂O₅含量(平均值为0.12%)和较高的Na₂O含量(平均值为3.47%)区别于高分异的S型花岗岩;较高的TFe₂O₃含量(平均为2.67%)和较低的Rb含量(平均值为201.14×10⁻⁶)区别于高分异的I型花岗岩。整体看,香泉正长花岗岩具有A型花岗岩的地球化学特征。

关于A型花岗岩的成因主要有以下4种观点:
①由幔源碱性岩浆的分离结晶作用形成^[31-32];②花岗质溶体抽离后的富F、Cl下地壳麻粒岩相残

留体在高压下的低程度部分熔融作用形成^[33];③幔源岩浆与深熔形成的壳源岩浆的混合与交代作用形成^[34-35];④由长英质岩石在地壳浅部脱水部分熔融形成^[36-37]。区域上缺乏与香泉正长花岗岩同期形成的中基性侵入岩,且香泉正长花岗岩Nb/Ta值(平均值为8.72)、Nb/La值(平均值为0.35)、Rb/Sr值(平均值为0.86)、Rb/Nb值(平均值为6.70)与幔源岩浆(分别为17.39~17.78、0.93~1.32、0.01~0.05、0.24~0.89)差异较大^[27],因而由幔源岩浆的分离结晶作用形成的可能性不大。前人实验岩石学研究表明,下地壳麻粒岩相物质部分熔融后可形成富铝贫碱、富镁贫钛耐熔残余下地壳,这种残余下地壳的

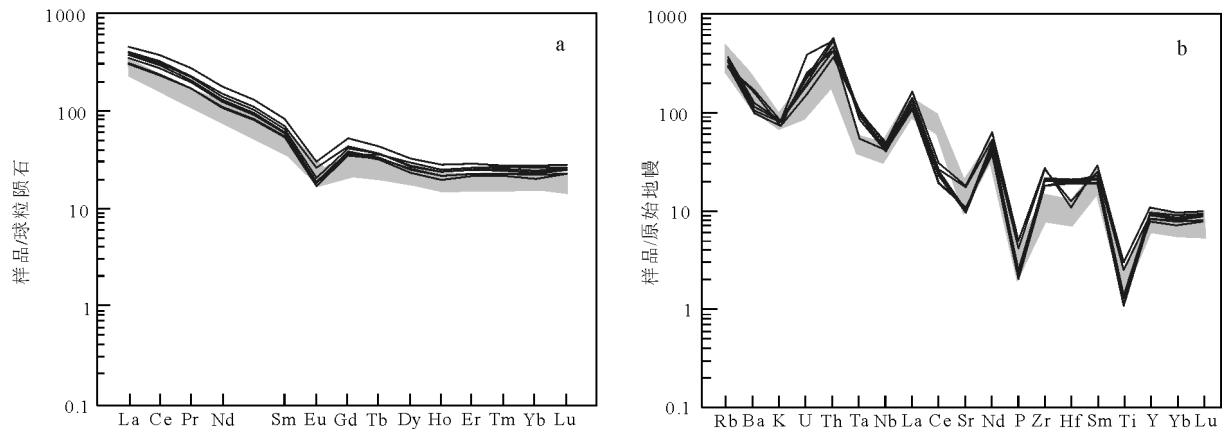


图6 香泉正长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔蛛网图(b)(标准化数据参考文献[27])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized spidergrams (b) of Xiangquan syenogranites

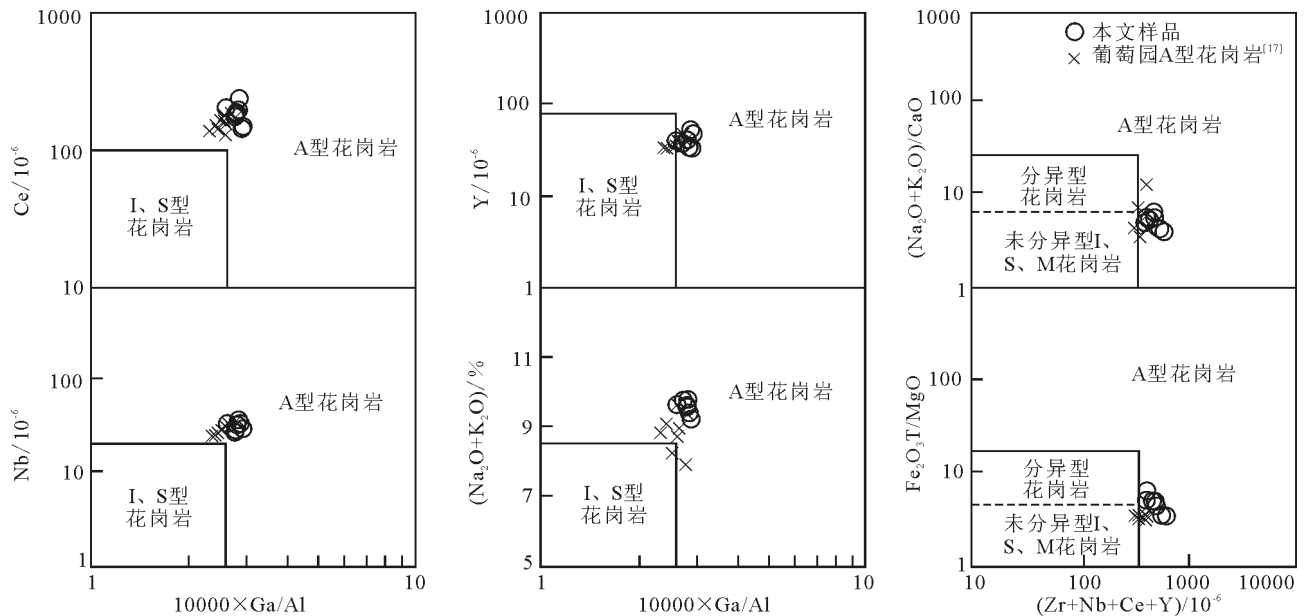


图 7 香泉正长花岗岩岩石类型判别图解(底图据参考文献[28])

Fig. 7 Rock type discrimination diagrams of Xiangquan syenogranites

部分熔融不可能生成 A 型花岗质岩浆^[37-38]。野外调查过程中,香泉正长花岗岩内未发现中基性岩包体,因而壳幔混合成因模型也不可能是其主要形成机制。总之,前 3 种成因模型不能很好地解释香泉 A 型正长花岗岩的成因。

前人研究表明,由长英质地壳岩石中含水矿物的脱水熔融形成的花岗岩基本上都属于铝质 A 型,形成深度一般不会大于 30km,压力一般小于 4kbar,而碱性花岗岩则为相对干的幔源镁铁质岩浆分异的产物^[37,39-40]。香泉 A 型正长花岗岩未见暗色碱性矿物,具有准铝质、高钾钙碱性特征,亏损 Sr、Ba,负 Eu 异常明显,重稀土元素较平坦,指示岩浆源区为富集斜长石且无石榴子石残留的浅部低压区域^[41]。香泉正长花岗岩 Nb/U 值(平均值为 6.75)和 Rb/Nb 值(平均值为 6.70)均介于平均中、上地壳之间(平均中、上地壳 Nb/U 值分别为 7.69、4.44, Rb/Nb 值分别为 6.50、6.83), Nb/La 值(平均值为 0.35)与平均上地壳(0.39)接近^[42],暗示其岩浆源区主要为壳源岩浆。由上述分析推测,低压下长英质地壳物质的部分熔融模型很可能是香泉 A 型花岗岩的主要形成机制。

5.2 构造环境

研究表明, A 型花岗岩主要形成于造山后或非

造山伸展的构造环境^[43-44]。A 型花岗岩可细分为非造山(A₁)和后造山(A₂)2 类。它们具有不同的物质来源,并分别代表不同的大地构造环境,其中, A₁型来源于似大洋岛屿玄武岩侵入于大陆裂谷,或在板内岩浆作用期间侵入,为大陆岩石圈稳定之后的拉张,是裂谷活动开始的征兆; A₂型花岗岩则起源于经历了陆-陆碰撞或岛弧岩浆作用的陆壳或板下地壳物质的部分熔融,标志着造山作用结束后不久即开始拉张,其规模和深度均较小,是造山作用结束的标志。香泉 A 型花岗岩具有较高的 Y (平均值为 40×10⁻⁶)、Nb(平均值为 30×10⁻⁶)、Rb(平均值为 201×10⁻⁶)含量和 Y/Nb 值(1.24~1.47)。在 (Y+Nb)-Rb 图解^[45](图 8-a)中,全部落入后碰撞花岗岩区域;在 Y/Nb-Rb/Nb 图解^[44](图 8-b)中,全部落入 A₂型花岗岩区域,表明香泉 A 型正长花岗岩属于 A₂型,形成于造山后的拉张环境。

5.3 构造意义

在西秦岭地区,代表原特提斯分支天水-武山主洋盆存在的记录为关子镇洋脊型蛇绿岩,形成时代为 534~489Ma^[46-47]。天水-武山洋盆在早奥陶世开始由南向北俯冲,在西秦岭地区形成以李子园群、草滩沟群、斜峪关群为代表的大陆岛弧-弧前盆地火山-沉积岩系^[48-49],同时形成小王涧、桦林沟、鸳

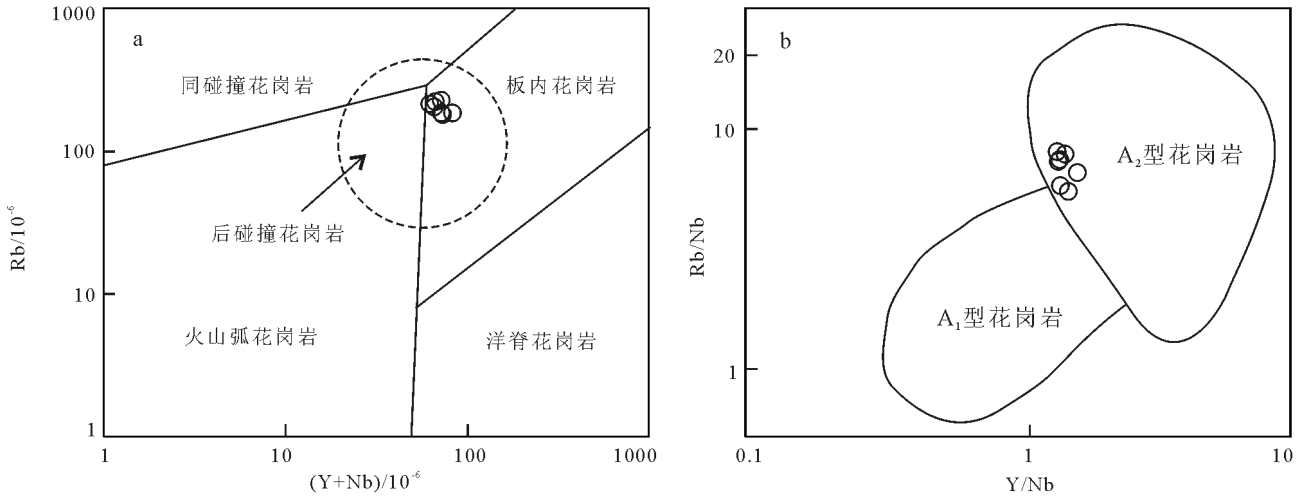


图8 香泉正长花岗岩构造环境判别图解

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of Xiangquan syenogranites

鸯镇具俯冲性质的基性-中性-中酸性侵入岩和武山-鸳鸯镇、细尾子沟、伯阳SSZ型蛇绿岩组合,总体时限为472~440Ma^[50-52]。宝鸡岩体的百花、唐藏、红花铺等俯冲性质中基性(杂)岩为主洋盆俯冲阶段的岩浆记录,形成时代为454~450Ma^[7,9,13]。

随着天水-武山主洋盆的北向俯冲,北祁连东端地区,在陆缘弧基础上经历了陆缘弧初始裂陷、弧后盆地初始扩张和弧后盆地俯冲3个过程;①陆缘弧初始裂陷阶段(472~462Ma),随着主洋盆的俯冲,在以秦岭群和陇山群为代表的活动大陆边缘基底上形成以陈家河群双峰式火山岩(447±8Ma)^[51]和黄门川花岗闪长岩(457±3Ma)^[19]为代表的活动大陆边缘初始裂陷型岩浆记录;②弧后盆地初始扩张阶段(462~454Ma),随着活动陆缘的进一步拉张,大陆边缘弧进一步拉张裂解,玄武质岩浆沿着先形成的岩浆通道缓慢向上运移,经过一定的岩浆演化到达前部岩浆房,并在陈家河群火山岩-沉积岩系南侧的红土堡-凤阁岭一带喷出就位,形成红土堡组具枕状构造的基性火山岩及夹持的硅质岩,基性火山岩具有弧后盆地地球化学属性^[51,53],何世平等^[11]获得弧后盆地演化后期的年龄为443±2Ma;③弧后盆地俯冲阶段(454~440Ma),随着以红土堡组基性火山岩为代表的弧后盆地扩张,在晚奥陶世中期(454Ma)开始向北俯冲消减,在弧后盆地以北产生大量典型陆缘弧型深成侵入岩体,例如出露于张家川一带的阎家店石英闪长岩体(441~

440Ma)^[5,8]、王家岔石英闪长岩体(455±2Ma)^[12]及陕西陇县地区的新街花岗质片麻岩(448±5Ma)^[54],其地球化学特征显示出与俯冲作用密切相关的火山弧型花岗岩类。

北祁连造山带东端及邻区于早志留世早期(440Ma左右)大规模的古洋壳俯冲消减结束,开始转入陆-陆或陆-弧碰撞阶段,该时段持续到424Ma左右。先在陆缘弧基础上裂解形成的弧后盆地全面闭合,南边的主洋盆也可能已经闭合。该阶段研究区内沉积了一套葫芦河群具碰撞性质的复理石建造,同时碰撞型花岗质岩较发育,如草川铺碰撞型二长花岗岩(434±10Ma)^[5]、党川碰撞型二长花岗岩(438±3Ma)^[14]、熊山沟碰撞型二长花岗岩体(438±3Ma)^[17]、太白北部碰撞型二长花岗岩(431±2Ma)^[22]。这些岩体的年代学资料反映,加里东期大规模碰撞型花岗质岩浆侵入活动主要发生在438~424Ma期间,与区域加里东晚期(志留纪)的碰撞汇聚造山作用密切相关。在碰撞造山过程中,随着以红土堡为代表的弧后盆地收缩闭合,在红土堡组基性火山岩南侧沉积了一大套葫芦河复理石相碎屑岩,沉积时限大致为早志留世,与碰撞型花岗岩的形成时代一致。

随着板块碰撞造山的结束,区域上在早志留世末(约428Ma)进入后碰撞阶段。伴随着岩石圈伸展垮塌,在靠近板块碰撞带的仙坪一带形成了仙坪壳幔混合型高分异I型花岗岩(424±3Ma)^[17]。随着岩

石圈的进一步伸展,幔源镁铁质岩浆底侵下地壳,下地壳物质减压熔融,形成西秦岭北缘的葡萄园造山后A型花岗岩($414\pm 2\text{Ma}$)和北祁连东端的南头河造山后A型花岗岩($411\pm 2\text{Ma}$)^[17]。本次获得的早泥盆世香泉正长花岗岩属高硅、富钾、低镁、低钛、低磷的准铝质、高钾钙碱性系列,具有较高的 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 、 Ga/Al 值和碱铝指数,富集Rb、Th、Zr、Nd、Zr、Hf、Y,相对亏损Sr、Ba、Cr、Co、Ni,反映出造山后A型花岗岩(A_2)特征,并获得其结晶年龄为 $410\pm 5\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.20$, $n=18$),与葡萄园A型花岗岩具有相近的岩石学、地球化学和年代学特征,是西秦岭微板块与华北板块碰撞造山结束后岩浆底侵作用导致大陆地壳垂向生长过程的岩浆记录,指示区域造山在早泥盆世早期已经结束,预示着新一轮构造演化的开始。

总的来看,宝鸡岩体含有不同时代、不同属性的岩浆岩年龄信息,主要包括元古宙汇聚型片麻状花岗岩、加里东期多类型岩浆岩及印支期后碰撞型花岗岩。其中,加里东期岩浆记录主要是天水-武山洋盆在中晚奥陶世北向俯冲阶段形成的陆缘弧型中基性(杂)岩,陆缘弧基础上裂解形成的裂解型火山岩(花岗岩)、MORB型火山岩,弧后盆地俯冲型岩浆岩,主洋盆和弧后盆地闭合后形成的早志留世碰撞型花岗岩,以及早泥盆世造山结束阶段形成的造山后环境A型花岗岩。

6 结 论

(1)香泉正长花岗岩为高硅、富钾、低镁、低钛、低磷的准铝质、高钾钙碱性岩石,富集Rb、Th、Zr、Sm、Ga,贫Ba、Nb、Ta、Sr,整体表现出造山后 A_2 型花岗岩特征,为低压环境下长英质地壳物质部分熔融的产物。

(2)香泉造山后正长花岗岩形成时代为 $410\pm 5\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.20$, $n=18$),属早泥盆世早期,指示秦祁结合部位早泥盆世早期已经完成碰撞调整,全面进入造山后阶段。

致谢:审稿专家对本文提出许多宝贵意见和建议,在此谨致谢忱。

参考文献

[1]王涛. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 161-168.
[2]肖庆辉, 邢作云, 张星, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地

学前缘, 2003, 10(3): 222-229.

- [3]张宏飞, 靳兰成, 张利, 等. 西秦岭花岗岩类地球化学和Pb-Sr-Nd同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(10): 914-926.
[4]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[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 304-316.
[5]Zhang H F, Zhang B R, Nigel Harris, et al. U-Pb zircon HRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27: 751-764.
[6]卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉. 秦岭斑岩花岗岩的年代学研究及其意义[J]. 高校地质学报, 1999, 5(4): 372-377.
[7]王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段红花铺俯冲性侵入岩LA-ICP-MS定年及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 536-564.
[8]裴先治, 孙仁奇, 丁仁平, 等. 陇东地区阎家店闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 8-16.
[9]裴先治, 刘战庆, 丁仁平, 等. 甘肃天水地区百花岩杂岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 818-827.
[10]裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭北缘新元古代花岗岩片麻岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 773-784.
[11]何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学及其地质意义[J]. 地球科学进展, 2007, 22(2): 143-151.
[12]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-ICP-MS定年及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 423-431.
[13]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[J]. 现代地质, 2008, 22(1): 63-70.
[14]王婧, 张宏飞, 徐旺春, 等. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008, 33(4): 474-486.
[15]刘树文, 杨朋涛, 李秋根, 等. 秦岭中段印支期花岗岩岩浆作用与造山过程[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1928-1943.
[16]王银川, 裴先治, 李佐臣, 等. 北祁连造山带东端张家川地区长宁驿中元古代花岗岩片麻岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2012, 31(10): 1576-1587.
[17]王银川. 秦祁结合部位加里东期碰撞-后碰撞型花岗岩地质特征及构造意义[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013: 1-86.
[18]魏方辉, 裴先治, 李瑞保, 等. 甘肃天水地区早古生代黄门川花岗岩闪长岩体LA-ICP-MS锆石定年及构造意义[J]. 地质通报, 2012, 31(9): 1496-1509.
[19]魏方辉. 北祁连造山带东端早古生代物质组成、变形特征及其构造演化过程[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013: 1-130.
[20]李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 等. 西秦岭糜谷岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2617-2634.
[21]任厚州, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭天水地区太白花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(7): 1041-1054.

- [22]吕星球. 北秦岭太白花岗岩体年代学和成因研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2015: 1-78.
- [23]Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1554-1569.
- [24]Siebel W, Blaha U, Chen F K, et al. Geochronology and geochemistry of a dyke-host rock association and implications for the formation of the Bavarian Pfahl shear zone, Bohemian Massif[J]. International Journal of Earth Sciences, 2005, 94(1): 8-23.
- [25]Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989.
- [26]Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor element[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [27]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Sunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42: 313-345.
- [28]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [29]贾小辉, 王强, 唐功建. A型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465-480.
- [30]王强, 赵振华, 熊小林, 桐柏-大别造山带燕山晚期A型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(4): 297-306.
- [31]Turner S P, Foden J D, Morrison R S. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. Lithos, 1992, 28: 151-179.
- [32]Mushkin A, Navon O, Halicz L, et al. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel[J]. Journal of Petrology, 2003, 44: 815-832.
- [33]Clemens J D, Holloway J R, White A J R. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. American Mineralogist, 1986, 71: 317-324.
- [34]Harris C, Marsh J S, Milner S C. Petrology of the alkaline core of the essum igneous complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1377-1397.
- [35]Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 2006, 89: 89-106.
- [36]Skjerlie K P, Johnston A D. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites[J]. Geology, 1992, 20: 263-266.
- [37]Patiño Douce A E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids[J]. Geology, 1997, 25: 743-746.
- [38]Creaser R A, Price R C, Wormald R J. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model[J]. Geology, 1991, 19: 163-166.
- [39]King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [40]吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [41]Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 891-931.
- [42]Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432: 892-897.
- [43]Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, et al. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A-type granite: Petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 1463-1489.
- [44]Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20: 641-644.
- [45]Pearce J A. Sources and settings of granitic rock[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [46]裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1550-1561.
- [47]董云鹏, 杨钊, 张国伟, 等. 西秦岭关子镇蛇绿岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1186-1194.
- [48]裴先治, 刘会彬, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 193-205.
- [49]闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 488-500.
- [50]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[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(10): 1301-1313.
- [51]李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究——对特提斯洋演化的制约[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2008: 1-124.
- [52]Pei X Z, Li Z C, Liu H B, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb isotopic ages of island-arc basic igneous complexes from the Tianshui area in West Qinling[J]. Front. Earth Sci. China, 2007, 1(1): 49-59.
- [53]胡波. 甘肃天水地区清水-张家川早古生代变质火山岩岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 长安大学硕士学位论文, 2005: 1-75.
- [54]何艳红, 陈亮, 孙勇, 等. 陇县地区新街片麻岩套锆石年龄及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 625-632.
- ①长安大学地质调查研究院. 1:25 万天水市幅区域地质调查(修测)报告. 2004.
- ②陕西省地质调查院. 1:25 万宝鸡市幅区域地质调查(修测)报告. 2004.