

南秦岭板板山二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义

杨志军^{1,2}, 魏 丽^{1,2}, 蔡文春^{2,3}, 杨文博^{1,2}, 周 斌^{1,2}

(1. 陕西省地质调查规划研究中心, 陕西 西安 710068; 2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘 要: 南秦岭北缘山阳县板板山复式岩体存在3个阶段的岩浆侵位, 分别为早期阶段的二长花岗岩、中期阶段的钾长花岗岩及晚期阶段的辉绿岩。针对早期阶段的二长花岗岩进行了岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄研究, 结果表明: 二长花岗岩 SiO_2 含量为 73.35% ~ 77.49%, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为 3.15% ~ 7.19%, 里特曼指数为 0.30 ~ 1.66, A/CNK 值为 1.18 ~ 2.48, 属中高钾钙碱性的过铝质 S 型花岗岩; 稀土元素总量变化较大, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, 具弱的负铕异常($\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 0.89$), 大离子亲石元素 Rb、K、Th、Ba 相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 相对亏损, 具岛弧岩浆岩地球化学特征。反映了板板山二长花岗岩形成于同碰撞构造环境, 且携带火山岩弧环境的地球化学特征, 暗示岩浆来源于上地壳岩石的部分熔融, 且受残留的俯冲洋壳脱水形成的流体交代。2 件样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 743.2 ± 6.1 Ma 和 743.7 ± 5.9 Ma, 表明板板山二长花岗岩形成于新元古代。结合前人研究成果, 认为板板山一带在 743 Ma 之前为古洋壳俯冲阶段, 743 Ma 之后古洋盆闭合, Rodinia 超大陆开始聚合, 发生陆陆碰撞。

关键词: 板板山岩体; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 构造环境; 南秦岭; 山阳

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)05-0539-13

LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Banbanshan monzogranite in Southern Qinling orogenic belt and their geological significance

YANG Zhi-jun^{1,2}, WEI Li^{1,2}, CAI Wen-chun^{2,3}, YANG Wen-bo^{1,2} and ZHOU Bin^{1,2}

(1. Shaanxi Center of Geological Survey and Planning Research, Xi'an 710068, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, China)

Abstract: There exist three stages of magmatic emplacement in the Banbanshan complex massif, Shanyang County, on the northern margin of the South Qinling Mountains. They are the early monzogranite, the middle K-feldspar granite and the late diabase. In this paper, the authors studied the geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the early monzogranite. The results show that the SiO_2 content of monzogranite is between 73.35% and 77.49%, the content of total alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) is 3.15% ~ 7.19%, the Rittman index is 0.30 ~ 1.66, and the A/CNK ratio is 1.18 ~ 2.48, suggesting that they belong to peraluminous S type granite with medium and high potassium calc-alkaline nature. The total amount of rare earth elements varies greatly. Light rare earth elements are relatively

收稿日期: 2019-04-11; 接受日期: 2020-08-04; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 陕西省基础性、公益性地质调查项目(20150103)

作者简介: 杨志军(1986-), 男, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作, E-mail: yangzhi021053@163.com。

enriched and heavy rare earth elements are relatively deficient. The rocks have a weak negative europium anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 0.89$). Large ion lithophile elements Rb, K, Th, Ba are relatively enriched, and high field strength elements Nb, Ta, Ti, P are relatively deficient. It is shown that the Banbanshan monzogranite was formed in the same collisional tectonic environment and carried the geochemical characteristics of the volcanic arc environment, suggesting that the magma originated from the partial melting of the upper crust rocks and was metasomatized by the residual fluid formed by the dehydration of the subducted oceanic crust. The zircon U-Pb ages of the two samples are 743.2 ± 6.1 Ma and 743.7 ± 5.9 Ma, respectively, indicating that the Banbanshan monzogranite was formed in Neoproterozoic. Combined with the previous research results, it is considered that the Banbanshan area had been in the stage of paleoceanic subduction before 743 Ma, and after 743 Ma, the paleoceanic basin was closed, Rodinia supercontinent began to converge, and land collision occurred.

Key words: Banbanshan rock mass; zircon U-Pb age; geochemistry; tectonic environment; South Qinling; Shanyang

Fund support: Basic and Public Welfare Geological Survey Project in Shaanxi Province(20150103)

秦岭造山带经历了前寒武纪基底形成、新元古代末到中三叠世板块构造演化,于三叠纪中期整体成山,其后为中生代陆内造山演化阶段(张国伟等, 1997; 弓虎军等, 2009; Thomas Bader *et al.*, 2013; 王晓霞等, 2015)。Rodinia 超大陆在新元古代经历了一次俯冲碰撞-拉张裂解过程普遍受到认可(郭进京等, 1999; 陆松年等, 2005; 王涛等, 2005)。不同学者对南秦岭广泛出露的新元古代岩浆岩做了大量研究,将 Rodinia 超大陆聚合前的俯冲碰撞、超大陆聚合后的拉张裂解过程笼统地限制在 1 000 ~ 680 Ma 之间:多数学者(卢新祥等, 1999; 牛宝贵等, 2006; 杨钊等, 2008; 王涛等, 2009; 吴发富等, 2012)通过对南秦岭沿凤镇-山阳断裂带出露的小磨岭中基性杂岩、磨沟峡闪长岩、冷水沟辉长岩、黑沟花岗岩、色河二长花岗岩、板板山钾长花岗岩、吐雾山花岗岩等的研究,对 Rodinia 超大陆拉张裂解时限进行了有效的约束,将其限定在 730 ~ 680 Ma 之间,且认识基本一致;另部分学者(张成立等, 1999; 张国伟等, 2001; 凌文黎等, 2002a, 2002b; 彭海练等, 2004; 苏春乾等, 2006; 陕西省地质调查院, 2017)也对 Rodinia 超大陆聚合前的俯冲碰撞过程,并进行了有益探讨,在对新元古代耀岭河群火山岩的研究基础上,皆认识到 Rodinia 超大陆聚合前 1 000 ~ 800 Ma 之间经历了俯冲过程。以上研究结果表明,因新元古代的地质记录残留较少, Rodinia 超大陆在聚合前由俯冲到碰撞的转化过程尚不能准确界定。

本文在板板山一带详实的野外调查基础上,依据岩石类型、粒度、接触关系等,将板板山复式岩体划分为 3 期侵入体,即早期阶段的二长花岗岩、中期

阶段的钾长花岗岩及晚期阶段的辉绿岩。目前,吴发富等(2012)已对中期阶段侵位的钾长花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年工作,获得了锆石 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 730.0 ± 8.2 Ma。本文选取早期侵位的二长花岗岩为研究对象,对其开展了系统的岩石化学、岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学等研究,以期确定板板山早期侵位的二长花岗岩形成时代,并探讨岩石成因、构造背景以及地球动力学过程,为进一步精细刻画 Rodinia 超大陆俯冲碰撞过程提供数据和资料。

1 区域地质背景及侵入体特征

1.1 区域地质背景

板板山岩体位于南秦岭北缘(图 1a),区域上凤镇-山阳断裂横贯东西,控制了南北两套不同的构造岩石地层组合(图 1b),北部为商丹地壳对接带,南部为扬子板块北缘秦岭-大别新元古代-中生代造山带(陕西省地质调查院, 2017)。断裂北部主要分布泥盆系刘岭群地层,为一套类复理式建造为主的陆源碎屑岩建造,岩性为石英片岩、长石石英砂岩、石英岩等,其次为白垩系山阳组砂质泥岩、砂砾岩及第四系砂砾石。断裂南部主体为泥盆系古道岭组、星红铺组、九里坪组等,为一套稳定的碳酸盐岩地层,含少量碎屑岩建造,岩性为泥晶灰岩、粉砂质板岩、石英砂岩等。另在板板山岩体东部出露少量上元古界耀岭河群中基性火山岩和灯影组、陡山沱组白云岩及中寒武统-中奥陶统石瓮子组白云岩。

区域侵入岩发育较少,主要为板板山岩体,主体位于山阳县十里铺乡南部,其次在石头梁、台子沟等

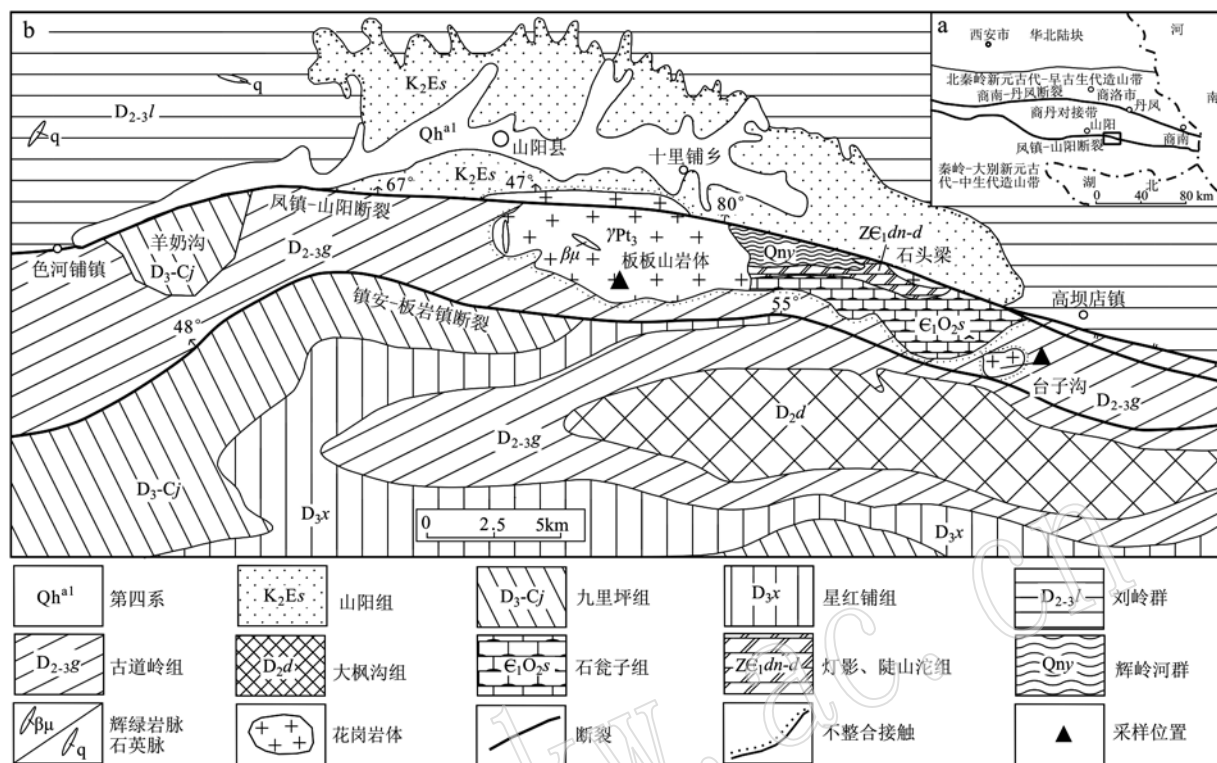


图1 南秦岭区域大地构造位置(a)和板板山岩体地质简图(b, 据陕西省地质调查院, 2013^①)

Fig. 1 Regional geotectonic location of South Qinling (a) and geological sketch map of Banbanshan rock mass (b, after Shaanxi Geological Survey Institute, 2013^①)

地有小规模侵入体出露。

1.2 侵入体特征

板板山岩体主体出露于山阳县板板山一带, 出露面积约 12 km², 其次在石头梁、台子沟等地零星分布, 岩体规模不大, 多呈岩株、岩枝产出。板板山岩体北侧受凤镇-山阳断裂切割或被白垩系山阳组覆盖, 西、南侧均被泥盆系古道岭组以角度不整合覆盖(图 2a), 东侧与上古界耀岭河群、中寒武统-中奥陶统石瓮子组呈断层接触。板板山岩体为一复式岩体, 由二长花岗岩侵入体、钾长花岗岩侵入体和少量辉绿岩脉组成。其中, 辉绿岩呈脉状穿插于二长花岗岩及钾长花岗岩内, 接触带烘烤边发育(图 2b)。由于构造及蚀变作用, 野外调查过程中没有发现明确的二长花岗岩与钾长花岗岩接触关系, 吴发富等(2012)认为板板山岩体为一杂岩体, 有 3 期岩浆活动, 依次为二长花岗岩岩浆、钾长花岗岩岩浆、基性岩浆(辉绿岩)。

二长花岗岩呈浅灰白色, 花岗结构(图 2c), 块状构造。主要由斜长石(质量分数, 37%, 下同)、石英(40%)、碱性长石(20%)组成。斜长石呈他形粒状, 粒径为 0.50 mm × 0.92 mm ~ 1.40 mm × 2.85 mm, 发生绢云母化、泥化, 聚片双晶清晰可见。碱性长石呈他形粒状, 粒径为 0.54 mm × 0.80 mm ~ 1.20 mm × 1.20 mm, 发育格子双晶和条纹结构。石英呈他形填隙状分布于斜长石和碱性长石粒间, 粒径小于 1.60 mm × 1.65 mm。

钾长花岗岩呈花岗结构, 块状构造, 主要由石英(26%)、钾长石(50%)、斜长石(20%)组成, 见少量绢云母-白云母、蚀变黑云母。斜长石呈半自形板柱状, 最大粒径 1.70 mm × 2.57 mm。钾长石约占长石总量的 71%, 呈板柱状、他形粒状, 最大粒径超过 4.3 mm, 部分可见包裹斜长石的现象。石英粒径略小于长石。绢云母-白云母呈集合体状分布于长石粒间, 少数尚保留了黑云母的形态特征, 且内部多有铁质

① 陕西省地质调查院. 2013. 陕西省矿产资源潜力评价.

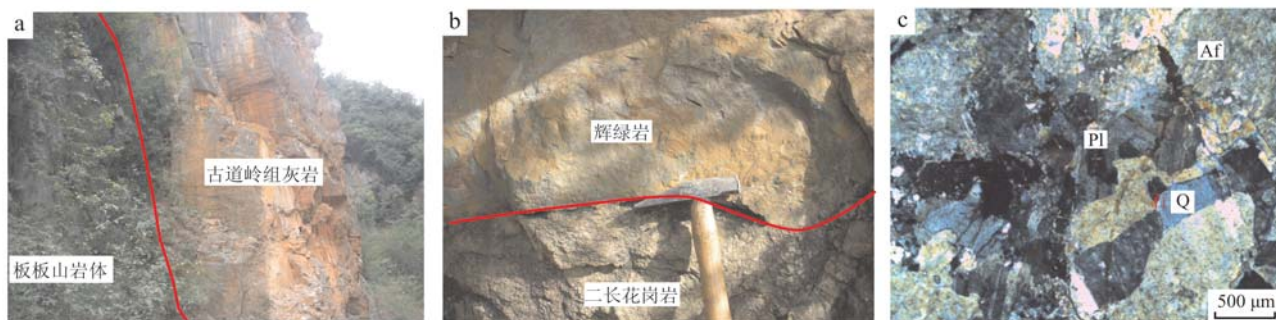


图2 板板山岩体与古道岭组灰岩及辉绿岩接触野外露头(a,b)和二长花岗岩正交偏光显微照片(c)
Fig. 2 Outcrop of Banbanshan intrusion in contact with limestone of Gudaoling Formation and diabase (a, b); microphotograph of monzonitic granite (crossed nicols)(c)

Af—碱性长石; Pl—斜长石; Q—石英
Af—alkali feldspar; Pl—plagioclase; Q—quartz

分解物。

2 采样及测试方法

样品取自板板山岩体,采集5件岩石地球化学分析样、2件锆石 U-Pb 测年样,岩性均为二长花岗岩,具体采样位置见图1。

2.1 主量、微量元素分析

主量及微量元素分析在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成,主量元素的测定采用X射线荧光光谱法(XRF),在飞利浦PW2404X射线荧光光谱仪上测定(其中FeO采用重铬酸钾容量法测定),分析误差小于5%。经烧失量校正后计算了主要岩石地球化学指数。微量元素的测定采用电感耦合与等离子体质谱(ICP-MS)法,在Thermo Fisher IRIS Intrepid II XSP电感耦合等离子体发射光谱仪上测定,分析误差一般小于5%。

2.2 LA-ICP-MS 测年

锆石分选在西安瑞石地质科技公司完成,全岩颚式破碎机粗碎至1~2 cm,然后细碎至40~60目,经过淘洗,留下重副矿物,经过磁选、电选,在双目镜下选出晶形完整、未破碎、无裂隙、无包裹体的锆石颗粒进行制样,用环氧树脂固定并抛光至颗粒一半露出。锆石样品在测定之前用浓度为3%的稀HNO₃清洗表面,以除去样品表面污染物,然后进行反射光、透射光和阴极发光(CL)内部结构照相。锆石 LA-ICP-MS 年代学分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,阴极发光照相(CL)采用美国Gatan公司的Mono CL3+X型阴极荧光探头。锆石

测试点的选择通过反复对比透射光照片和阴极发光照片,避开内部裂隙和包体,以期获得较为准确的年龄数据。锆石 U-Pb 同位素分析在四极杆 ICP-MS Elan6100DRC 上进行。激光剥蚀系统是德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。激光束斑直径为30 μm,激光脉冲10 Hz,能量32~36 MJ。同位素组成采用美国哈佛大学矿物博物馆的标准锆石91500进行外标校正。采用Glitter和Isoplot进行数据处理和作图(Ludwig, 2003)。在进行年龄数据分析时,对于<1 000 Ma的测点,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值。同时,结合²⁰⁶Pb/²³⁸U来计算锆石各测点数据的谐和性,剔除²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄相对于²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄偏差大于±10%的测点数据。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

岩石地球化学分析结果见表1,板板山二长花岗岩SiO₂含量为73.35%~77.49%,平均为75.59%,全碱(K₂O+Na₂O)含量为3.15%~7.19%,平均为4.60%,K₂O/Na₂O值为4.51~37.57,平均为21.8,显示贫钠富钾特征。里特曼指数σ=0.30~1.66,在K₂O-SiO₂图解中2个样品投入钙碱性系列,另3个样品较分散,整体判断板板山二长花岗岩应为中高钾钙碱性系列(图3a)。Al₂O₃含量为11.89%~14.46%,平均为12.86%,A/CNK=1.18~2.48,平均为2.12,在A/NK-A/CNK图解中投入过铝质岩石区域(图3b)。CIPW标准矿物计算出刚玉分子1.94~9.44,平均6.65。

表 1 板板山二长花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major element ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of Banbanshan rock mass

样品号	YZ-T	YZ34-7	YZ34-8	YZ39-4	YZ39-7
SiO ₂	73.35	75.83	77.49	73.91	77.36
TiO ₂	0.57	0.18	0.11	0.16	0.30
Al ₂ O ₃	14.46	12.79	11.89	12.61	12.56
Fe ₂ O ₃	1.15	1.56	2.55	1.11	1.17
FeO	0.27	0.31	0.52	0.58	0.22
MnO	0.08	0.05	0.04	0.05	0.05
MgO	0.57	0.69	0.66	0.73	0.35
CaO	1.26	1.12	0.04	1.21	0.03
Na ₂ O	0.21	0.16	0.14	1.31	0.12
K ₂ O	2.94	2.99	4.66	5.88	4.60
P ₂ O ₅	0.15	0.03	0.02	0.02	0.03
Total	100.13	100.29	100.47	99.94	99.87
灼失	5.11	4.56	2.36	2.36	3.08
A/NK	4.10	3.65	2.26	1.48	2.42
A/CNK	2.48	2.31	2.23	1.18	2.40
K ₂ O + Na ₂ O	3.15	3.16	4.80	7.19	4.72
σ	0.32	0.30	0.66	1.66	0.65
$t_{Zr}/^{\circ}\text{C}$	818	777	775	770	796
Y	14.14	19.44	16.83	21.19	4.37
La	39.51	19.04	14.73	31.10	37.49
Ce	71.02	38.05	29.81	60.03	78.51
Pr	8.78	4.50	3.69	7.07	8.84
Nd	32.00	16.26	13.07	24.35	28.10
Sm	4.90	2.91	2.43	3.95	4.46
Eu	1.15	0.65	0.60	0.92	1.19
Gd	4.00	2.66	2.25	3.49	3.53
Tb	0.51	0.48	0.40	0.57	0.48
Dy	2.37	2.97	2.61	3.21	2.37
Ho	0.50	0.63	0.58	0.67	0.46
Er	1.48	1.82	1.70	1.87	1.47
Tm	0.28	0.36	0.36	0.37	0.24
Yb	1.89	2.27	2.26	2.45	1.73
Lu	0.28	0.34	0.35	0.32	0.22
ΣREE	168.66	92.95	74.84	140.36	169.10
LREE	157.35	81.41	64.33	127.42	158.60
HREE	11.30	11.54	10.52	12.94	10.50
L/H	13.92	7.06	6.12	9.85	15.10
δEu	0.77	0.70	0.77	0.74	0.89
$(\text{La/Yb})_N$	15.02	6.02	4.67	9.12	15.54
Ti	3 435.14	1 103.08	677.44	971.19	1 795.50
P	667.69	130.92	82.92	100.37	120.01
Ba	543.01	453.89	587.16	800.87	899.16
Th	7.77	9.16	9.51	11.35	11.57
U	1.59	1.86	1.12	1.63	1.76
Ta	0.28	0.30	1.17	1.11	0.95
Nb	18.78	16.92	14.74	17.62	14.87
Rb	79.97	64.50	135.94	105.68	97.84
Sr	26.20	54.90	74.10	48.60	27.20
Zr	224.95	86.61	60.16	93.85	164.33

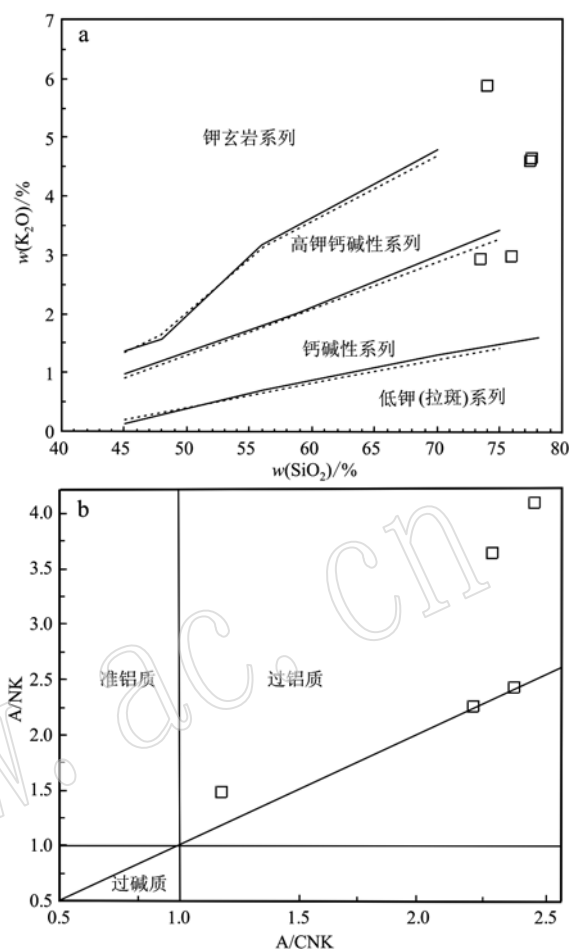


图 3 板板山二长花岗岩 K₂O - SiO₂ 图解(a, 据 Rickwood, 1989)和 A/NK - A/CNK 图解(b, 据 Maniar and Piccolli, 1989)

Fig. 3 K₂O versus SiO₂ diagram (a, after Rickwood, 1989) and A/NK versus A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccolli, 1989) of granite in the Banbanshan area

3.2 稀土与微量元素

稀土元素分析结果见表 1。稀土元素总量变化较大, ΣREE 在 $74.84 \times 10^{-6} \sim 169.10 \times 10^{-6}$ 之间, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型(图 4a), LREE/HREE 值在 6.12 ~ 15.10 之间, 平均为 10.41, $(\text{La/Yb})_N$ 值为 4.67 ~ 15.54, 平均为 10.07, 表明轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, 说明该岩浆经过一定程度的分异。 δEu 为 0.70 ~ 0.89, 具弱的负铕异常, 暗示岩浆源区有斜长石的残留。

微量元素分析结果见表 1。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4b)显示, 比值蛛网图呈 W 型, 大离子亲石元素 Rb、K、Th、Ba 相对富集, 高场强元素

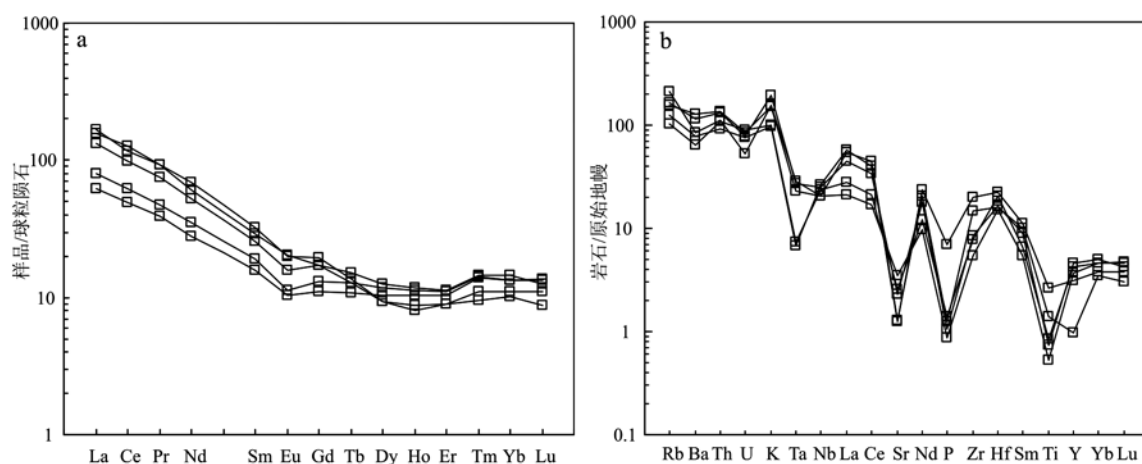


图4 板板山二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石、原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of monzogranite in the Banbanshan area (chondrite and primitive mantle standardized data after Sun and McDonough, 1989)

Nb、Ta、Ti、P 相对亏损, 显示弧岩浆岩特征 (Green, 1995; Barth *et al.*, 2000)。

3.3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

在板板山二长花岗岩采集锆石样品 2 件 (BBS-1、TZG-1)。所挑选出的锆石颗粒为浅黄色-无色透明, 呈半自形-自形柱状, 长宽比为 2:1~3:1, 粒径为

100~200 μm , CL 图像显示典型的振荡环带结构, 对应的锆石 Th/U 值 (>0.40) 介于 2.01~2.44 之间, 为典型的岩浆型锆石 (图 5a、5b)。

剔除 3 个 (4、9、22 号) 不谐和年龄分析点之后 (表 2), BBS-1 样品中 22 个有效点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 743.2 ± 6.1 Ma, MSWD = 0.065 (表 2、

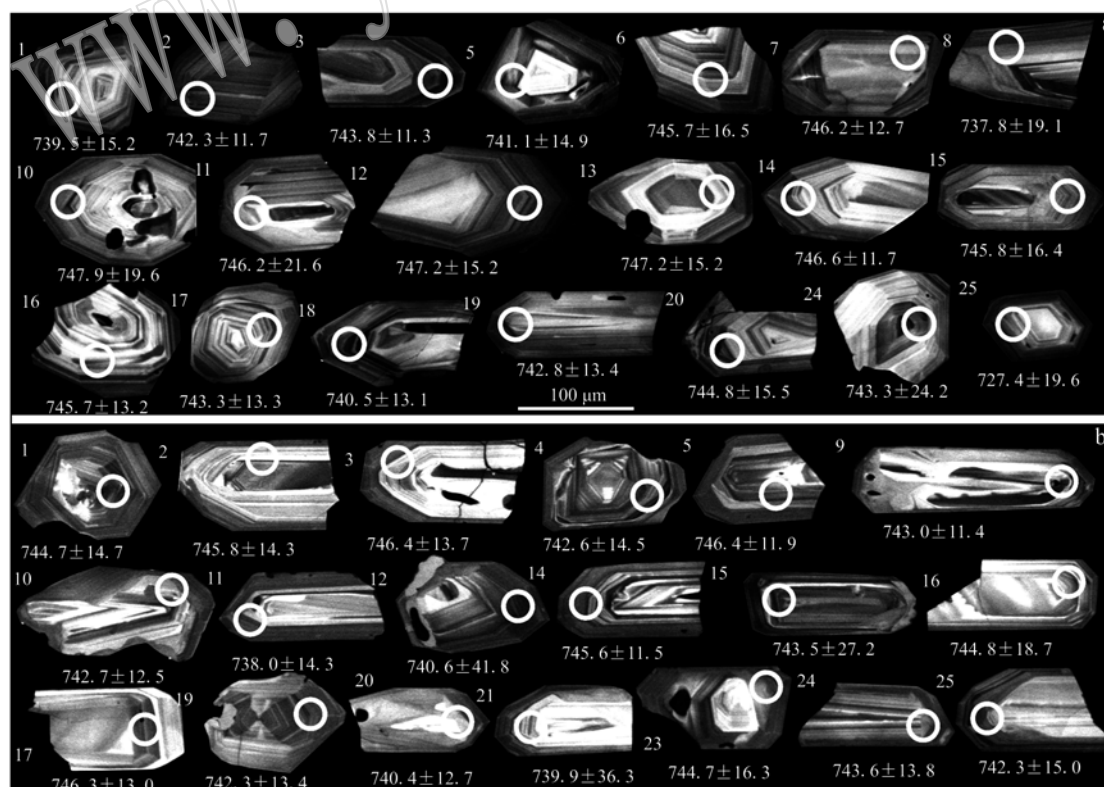


图5 板板山二长花岗岩 BBS-1(a)、TZG-1(b) 锆石阴极发光 CL 图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircon from BBS-1(a) and TZG-1(b) of Banbanshan monzogranite

表 2 板板山二长花岗岩 BBS-1、TZG-1 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素数据表
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating data from BBS-1 and TZG-1 samples of Banbanshan monzogranite

样号	测点号	同位素比值						年龄/Ma					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
BBS-1	1	0.064 9	0.002 0	1.089 4	0.039 8	0.121 6	0.002 7	0.036 2	0.001 9	748	19	740	15
	2	0.061 5	0.001 0	1.039 3	0.024 7	0.122 0	0.002 0	0.036 6	0.001 7	724	12	742	12
	3	0.063 8	0.001 2	1.077 9	0.027 1	0.122 3	0.002 3	0.035 0	0.001 5	743	13	744	13
	4	0.079 9	0.014 3	1.607 2	0.528 0	0.122 2	0.004 3	0.044 5	0.007 1	973	209	743	25
	5	0.066 1	0.003 3	1.114 5	0.061 6	0.121 8	0.002 6	0.035 4	0.001 5	760	30	741	15
	6	0.063 5	0.001 7	1.082 7	0.040 9	0.122 7	0.002 9	0.035 6	0.001 6	745	20	746	16
	7	0.062 4	0.001 7	1.057 3	0.031 1	0.122 7	0.002 2	0.034 7	0.001 4	733	15	746	13
	8	0.067 4	0.005 3	1.148 6	0.107 4	0.121 3	0.003 3	0.033 6	0.001 9	777	51	738	19
	9	0.064 7	0.002 8	1.151 6	0.067 0	0.128 3	0.003 6	0.036 9	0.001 8	778	32	778	20
	10	0.061 2	0.001 9	1.038 8	0.039 8	0.123 0	0.003 4	0.036 0	0.001 5	723	20	748	20
	11	0.065 0	0.002 8	1.101 7	0.057 5	0.122 7	0.003 8	0.036 6	0.001 8	754	28	746	22
	12	0.060 0	0.002 1	1.023 8	0.047 1	0.122 9	0.002 6	0.038 4	0.001 6	716	24	747	15
	13	0.061 6	0.001 2	1.035 2	0.021 5	0.122 0	0.001 9	0.038 3	0.001 5	722	11	742	11
	14	0.061 7	0.001 3	1.045 2	0.026 3	0.122 8	0.002 0	0.042 6	0.001 8	726	13	747	12
	15	0.065 6	0.001 3	1.110 2	0.033 4	0.122 6	0.002 9	0.040 1	0.001 9	758	16	746	17
	16	0.060 7	0.001 3	1.028 4	0.028 1	0.122 6	0.002 3	0.041 9	0.002 0	718	14	746	13
	17	0.062 5	0.001 9	1.053 0	0.035 8	0.122 2	0.002 3	0.043 0	0.002 2	730	18	743	13
	18	0.060 6	0.001 5	1.026 2	0.034 3	0.122 4	0.002 5	0.039 9	0.001 9	717	17	744	14
	19	0.063 8	0.001 6	1.072 8	0.031 9	0.121 7	0.002 3	0.039 5	0.001 8	740	16	740	13
	20	0.062 6	0.001 5	1.056 3	0.031 0	0.122 1	0.002 3	0.037 6	0.001 8	732	15	743	13
	21	0.063 2	0.001 7	1.066 1	0.034 3	0.122 5	0.002 7	0.041 1	0.001 9	737	17	745	15
	22	0.055 0	0.000 7	0.922 9	0.015 6	0.121 3	0.001 2	0.037 3	0.003 0	664	8	738	7
	23	0.063 9	0.001 7	1.067 9	0.043 4	0.120 9	0.003 7	0.036 5	0.001 5	738	21	736	21
	24	0.061 4	0.002 4	1.026 8	0.040 7	0.122 2	0.004 2	0.036 1	0.001 5	717	20	743	24
	25	0.064 5	0.002 3	1.059 1	0.039 4	0.119 4	0.003 4	0.030 5	0.001 4	733	19	727	20

续表 2
Continued Table 2

样号	测点号	同位素比值										年龄/Ma						
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ
TZC-1	1	0.063 5	0.000 9	1.071 7	0.023 7	0.122 5	0.002 6	0.032 6	0.001 4	724	30	740	12	745	15	649	27	
	2	0.062 7	0.001 2	1.057 8	0.023 7	0.122 7	0.002 5	0.033 4	0.001 4	698	41	733	12	746	14	664	27	
	3	0.062 2	0.001 2	1.053 0	0.025 3	0.122 8	0.002 4	0.031 9	0.001 2	680	42	730	12	746	14	635	24	
	4	0.063 6	0.000 9	1.068 0	0.021 1	0.122 1	0.002 5	0.035 8	0.001 4	728	34	738	10	743	15	710	27	
	5	0.065 0	0.001 2	1.100 5	0.026 2	0.122 8	0.002 1	0.033 1	0.001 3	772	41	754	13	746	12	658	25	
	6	0.067 5	0.001 7	1.140 3	0.031 7	0.122 6	0.002 2	0.035 6	0.001 5	854	54	773	15	745	12	707	29	
	7	0.073 3	0.000 9	1.552 3	0.025 1	0.153 7	0.002 6	0.046 3	0.002 1	1 033	29	951	10	922	15	916	41	
	8	0.061 0	0.001 2	1.029 7	0.025 8	0.122 3	0.002 3	0.034 2	0.001 5	639	41	719	13	744	13	680	30	
	9	0.065 6	0.001 7	1.109 2	0.036 5	0.122 2	0.002 0	0.035 0	0.001 6	794	54	758	18	743	11	695	32	
	10	0.071 6	0.003 4	1.208 5	0.062 0	0.122 1	0.002 2	0.034 0	0.001 6	976	129	805	28	743	12	676	31	
	11	0.067 6	0.001 2	1.130 6	0.027 3	0.121 3	0.002 5	0.036 9	0.001 5	857	37	768	13	738	14	733	30	
	12	0.061 6	0.001 2	1.037 0	0.027 8	0.121 7	0.007 3	0.032 9	0.001 7	661	43	722	36	741	42	654	33	
	13	0.083 3	0.002 6	1.097 0	0.031 5	0.096 2	0.003 1	0.026 8	0.001 1	1 277	60	752	15	592	18	535	22	
	14	0.064 1	0.000 8	1.082 0	0.018 6	0.122 6	0.002 0	0.034 2	0.001 3	746	26	745	9	746	12	679	25	
	15	0.065 4	0.001 0	1.103 9	0.054 7	0.122 3	0.004 7	0.028 7	0.001 6	787	31	755	26	744	27	572	32	
	16	0.069 0	0.002 2	1.161 4	0.036 7	0.122 5	0.003 3	0.034 9	0.001 6	902	66	783	17	745	19	694	31	
	17	0.063 3	0.001 2	1.070 2	0.025 1	0.122 7	0.002 3	0.034 7	0.001 5	717	38	739	12	746	13	690	30	
	18	0.071 0	0.002 8	1.192 4	0.041 1	0.122 2	0.002 6	0.033 2	0.001 5	967	81	797	19	743	15	661	29	
	19	0.064 3	0.000 9	1.079 5	0.021 0	0.122 0	0.002 3	0.036 8	0.001 4	752	30	743	10	742	13	731	28	
	20	0.060 7	0.001 4	1.015 5	0.024 6	0.121 7	0.002 2	0.033 6	0.001 2	632	45	712	12	740	13	668	23	
	21	0.062 7	0.002 4	1.046 4	0.041 7	0.121 6	0.006 3	0.038 1	0.002 1	698	88	727	21	740	36	756	41	
	22	0.068 1	0.001 2	1.148 7	0.029 9	0.122 2	0.002 3	0.038 2	0.001 3	870	35	777	14	743	13	757	26	
	23	0.065 2	0.001 1	1.099 9	0.028 8	0.122 5	0.002 8	0.039 4	0.001 5	783	35	753	14	745	16	780	29	
	24	0.070 4	0.001 4	1.188 0	0.033 9	0.122 3	0.002 4	0.040 7	0.001 7	943	43	795	16	744	14	806	33	
	25	0.064 2	0.001 2	1.077 9	0.026 5	0.122 0	0.002 6	0.037 5	0.001 6	750	41	743	13	742	15	744	30	

图 6a), TZG-1 样品剔除了 7、13 号不谐和年龄分析点, 23 个有效点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 743.7 ± 5.9 Ma, MSWD = 0.022 (表 2、图 6b)。这两

组年龄在误差范围内一致, 表明研究区二长花岗岩的形成时代属新元古代。

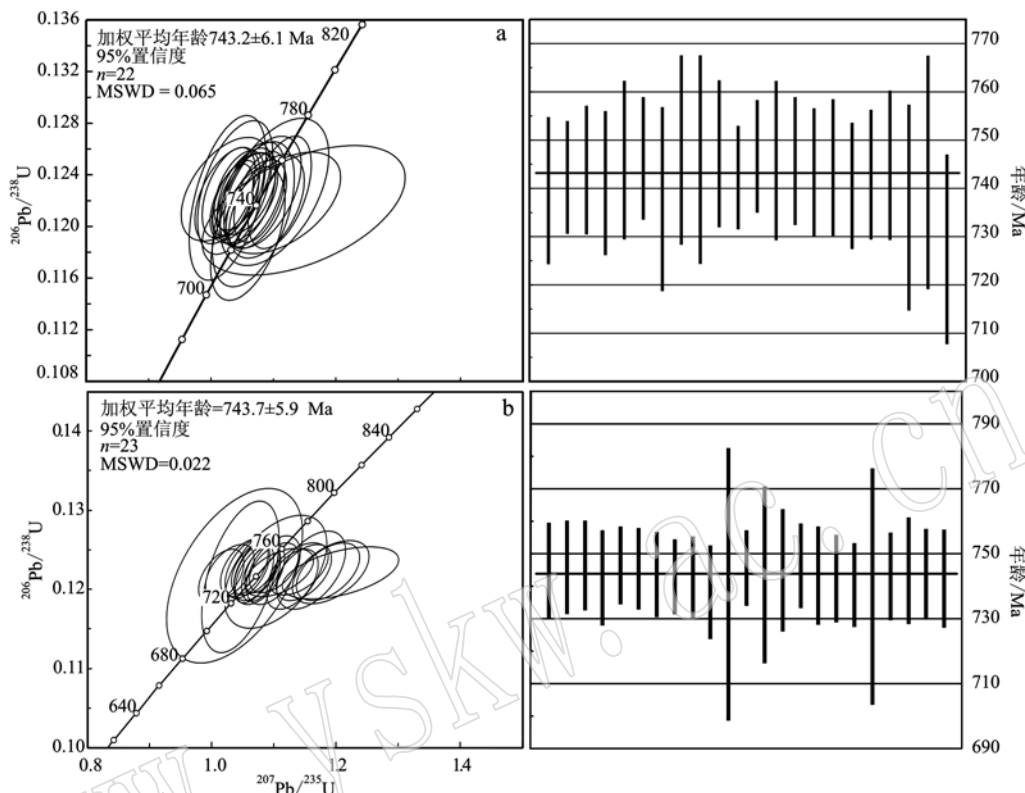


图 6 板板山二长花岗岩样品 BBS-1(a)、TZG-1(b) 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图与加权年龄直方图
Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb ages concordia diagram and weighted histogram from BBS-1(a) and TZG-1(b) of Banbanshan monzogranite

4 讨论

4.1 形成时代

陕西省地质局区域地质测量队(1966)^①将板板山岩体时代定为印支期, 吴发富等(2012)通过锆石 U-Pb 测年确定板板山钾长花岗岩的年龄为 730.0 ± 8.2 Ma, 陕西省地质调查院(2017)将板板山岩体划分为早古生代。本次研究采集的 2 件样品加权平均年龄为 743.2 ± 6.1 Ma (MSWD = 0.065)、 743.7 ± 5.9 Ma (MSWD = 0.022), 获得的年龄数据可靠, 与野外关系一致, 表明板板山二长花岗岩形成于新元古代。

4.2 岩石成因及构造环境

研究区样品整体显示出高硅(平均 75.59%)、

钙碱性($\sigma = 0.30 \sim 1.66$)、过铝质(A/CNK 平均 2.12)特征, CIPW 标准矿物计算显示刚玉分子介于 1.94 ~ 9.44, 远大于 1, 岩相学上没有发现普通角闪石和磁铁矿, 也未见含普通角闪石的基性包体。利用全岩锆石饱和温度计算公式(Watson and Harrison, 2005)得到板板山二长花岗岩锆石饱和温度为 $770 \sim 818^\circ\text{C}$, 平均 787°C , 接近 S 型花岗岩形成的平均温度(764°C , Chappell, 1999), 小于 A 型花岗岩平均成岩温度(833°C , Whalen *et al.*, 1987; 张旗等, 2007)和 I 型花岗岩的平均成岩温度($>900^\circ\text{C}$, 张旗等, 2007)。这均反映了板板山二长花岗岩属 S 型花岗岩。

花岗质岩石只要有足够的热源, 可由地壳中不同的源岩经过部分熔融而形成, 因此对花岗质岩石源岩的判别为了解岩石成因奠定了基础(徐夕生等,

① 陕西省地质局区域地质测量队. 1966. 1:20 万商县幅区域地质调查.

2010)。利用相容性较差的几个强不活动元素比值可以判断岩浆的源区,所有样品的 Ba/La 平均值 25.44、Ba/Nb 平均值 40.30、Rb/Nb 平均值 5.97、Th/Nb 平均值 0.60、La/Nb 平均值 1.70、Th/La 平均值 0.40 均接近于大陆壳特征(Weaver, 1991)。在 A/MF - C/MF 图解上,3 个样品落入变质砂岩部分熔融区域内,2 个样品落入变质泥岩部分熔融区域(图 7)。综上,这些都表明板板山二长花岗岩岩浆起源于上地壳岩石的部分熔融。

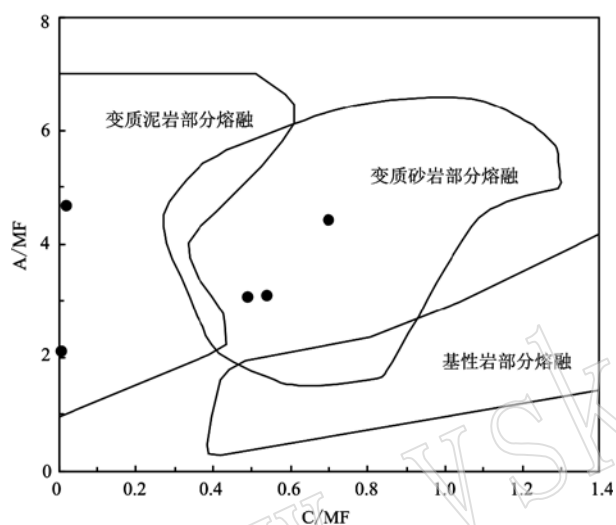


图 7 板板山二长花岗岩 A/MF - C/MF 图解(底图据 Alther *et al.*, 2000)

Fig. 7 A/FM - C/FM diagram of the Banbanshan monzogranite (after Alther *et al.*, 2000)

通过岩石地球化学研究发现,研究区二长花岗岩具有轻稀土元素相对富集、重稀土元素亏损特征,同时富集 Rb、K、Th、Ba 等大离子亲石元素,而亏损 Nb、Ta 等高场强元素;在 Rb - (Yb + Nb) 和 Rb - Hf - Ta 图解上,样品均投入火山弧花岗岩构造环境(图 8a、8b),表现出俯冲带弧型构造环境的地球化学特征。然而板板山二长花岗岩为 S 型花岗岩,起源于上地壳岩石的部分熔融,一般不会形成于岛弧构造环境,通过研究发现,类似的现象在年轻的造山带也有报道,莫宣学等(2007)发现,冈底斯古新世-始新世 S 型中酸性侵入岩为同碰撞成因,但具有火山弧环境的地球化学特征,原因为印度与亚洲大陆发生碰撞,连接在印度大陆前端的残留新特提斯洋壳俯冲速度减慢,滞留在亚洲大陆之下,随着洋壳的脱水,形成的流体上升交代地壳,发生部分熔融,形成具同碰撞和火山弧构造环境的特征的钙碱性岩浆岩系列。由此认为,板板山二长花岗岩是陆-陆碰撞阶段上地壳岩石部分熔融的产物,且受残留的俯冲洋壳脱水形成的流体交代作用。

4.3 地球动力学背景

Rodinia 超大陆在新元古代的聚合及裂解一直受地质学家关注,基本的认识为聚合造山发生在 1 000 ~ 800 Ma, 表现为早期弧-陆碰撞和晚期陆-陆碰撞。Rodinia 超大陆的裂解发生于 830 ~ 710 Ma 之间,但其过程具有明显的时空分布不均一性(郭进京等, 1999; 徐备, 2001; 李怀坤等, 2003; 陆松年等,

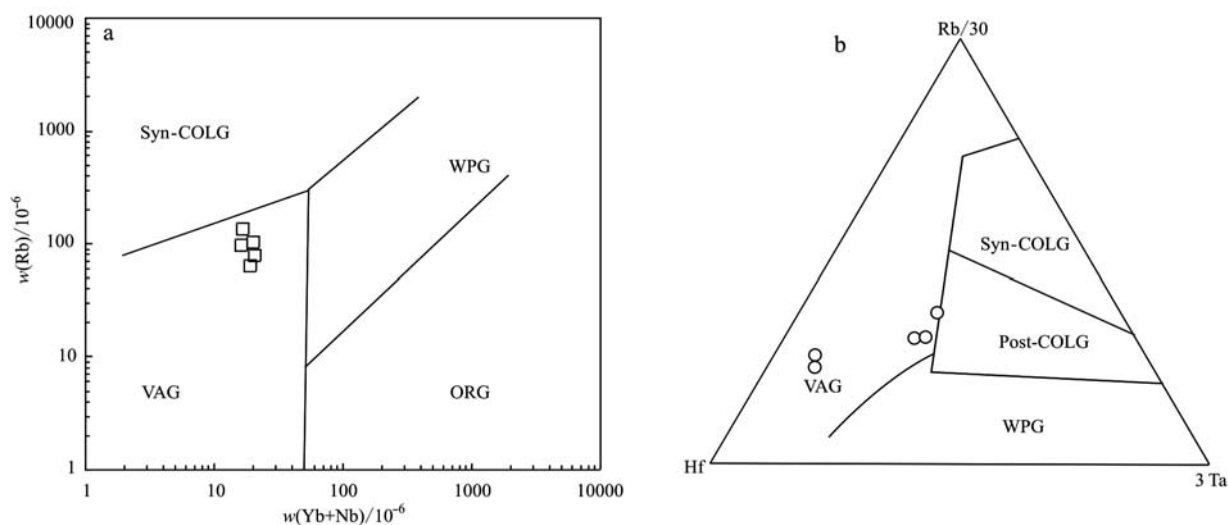


图 8 板板山二长花岗岩构造判别图解(a 据 Harris *et al.*, 1986; b 据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Structure discriminant diagram of the Banbanshan monzogranite (a after Harris *et al.*, 1986; b after Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; Post-COLG—后碰撞花岗岩

Syn-COLG—syn-collision granites; VAG—volcanic arc granites; ORG—ocean ridge granites; WPG—intraplate granites; Post-COLG—post-collision granites

2005; 张拴厚等, 2010; 徐通等, 2016; 田辉等, 2017), 这符合 Rodinia 超大陆聚合过程中复杂的构造背景和地球动力学过程。南秦岭广泛出露新元古代耀岭河群, 主体为一套中基性火山岩, 在板板山一带岩性为安山岩, 获得有效年龄介于为 1 058 ~ 745 Ma, 形成于岛弧环境(李靠社, 1990; 凌文黎等, 2002b; 李怀坤等, 2003; 陕西省地质调查院, 2017), 代表了 Rodinia 超大陆聚合过程中的火山事件。形成于同碰撞环境下的板板山二长花岗岩侵位时代(743 Ma)整体晚于形成于弧环境下的耀岭河群火山岩喷发时代, 这样看来, 板板山二长花岗岩的侵位时间(743 Ma)应该是该区俯冲作用的结束时间。基于前人成果, 初步建立了新元古代时期板板山一带 Rodinia 超大陆聚合的地球动力学模型: ~743 Ma 之前为古洋壳俯冲阶段, 形成以耀岭河群安山岩为主体的弧火山岩; 743 Ma 之后, 古洋盆闭合, Rodinia 超大陆开始聚合, 发生陆陆碰撞, 形成以板板山二长花岗岩为代表的同碰撞侵入岩。

5 结论

(1) 获得 2 件板板山二长花岗岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 743.2 ± 6.1 Ma (MSWD = 0.065)、 743.7 ± 5.9 Ma (MSWD = 0.022), 表明板板山二长花岗岩形成于新元古代, 而非前人所认为的印支期或早古生代。

(2) 板板山二长花岗岩具有高硅、富碱和过铝的特征, 属中高钾钙碱性系列 S 型花岗岩, 形成于同碰撞环境, 岩浆起源于上地壳岩石的部分熔融, 其携带火山弧构造环境的地球化学特征(具有轻稀土元素富集型配分模式, 富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、Ba 和亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P)与残留的俯冲洋壳脱水形成的流体交代作用有关。

(3) 板板山二长花岗岩的侵位时间(743 Ma)代表了该区俯冲作用的结束时间, 结合区域资料, 初步建立了新元古代时期板板山一带 Rodinia 超大陆聚合的地球动力学模型: ~743 Ma 之前为古洋壳俯冲阶段, 743 Ma 之后, 古洋盆闭合, Rodinia 超大陆开始聚合, 发生陆陆碰撞。

致谢 项目组成员李景晨参与了野外样品采集, 匿名审稿专家提出了宝贵意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calcalkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50: 51 ~ 73.
- Barth M G, McDonough W F and Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. *Chemical Geology*, 165 (3/4): 197 ~ 213.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 46: 535 ~ 551.
- Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, *et al.* 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shanhewan: Caoping and zhashui granitic plutons in the south qinling orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 248 ~ 264 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120(3/4): 347 ~ 359.
- Guo Jinjing, Zhang Guowei, Lu Songnian, *et al.* 1999. Neoproterozoic continental block collage of china and rodinia supercontinent [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(2): 148 ~ 156 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [A]. Coward M P and Reis A C. *Collision Tectonics* [C]. Spec. Publ. Geol. Soc., 19: 120 ~ 125.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Chen Zhihong, *et al.* 2003. Zircon U-Pb geochronology of rift-type volcanic rocks of the yaolinghe group in the south qinling orogen [J]. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 775 ~ 781 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaoshe. 1990. A discussion on the stratigraphic time of the Yaolinghe Group between Shanyang and Shangnan Counties in Shaanxi Province [J]. *Geology of Shaanxi*, 8(2): 53 ~ 58 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Cheng Jianping, Wang Xinhua, *et al.* 2002a. Geochemical features of the Neoproterozoic igneous rocks from the Wudang region and their implications for the reconstruction of the Jinning tectonic evolution along the south Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 25 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Wang Xinhua, Cheng Jianping, *et al.* 2002b. Recognition and geological significance of Zhen'an arc-volcanic suite, South Qinling Orogenic Belt [J]. *Geochimica*, 31(3): 222 ~ 229 (in Chinese with English abstract).

- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, *et al.* 2005. Two magmatic belts of the neoproterozoic in the qinling orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 165 ~ 173(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Dong You, Wei Xiangdong, *et al.* 1999. The age and tectonic significance of type A granite for tuwushan in the east qinling orogenic belt[J]. *Science Bulletin*, 44(9): 975 ~ 978(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Exversion 2. 49. A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 1 ~ 56.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination in of granitoids[J]. *Geological Society*, 1: 635 ~ 643.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, *et al.* 2007. On the timing of India-Asia continental collision[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1 240 ~ 1 244(in Chinese with English abstract).
- Niu Baogui, He Zhengjun, Ren Jishun, *et al.* 2006. Douling-Xiaomao-ling uplift and their geological significances[J]. *Geological Review*, 52(6): 826 ~ 835(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956 ~ 983.
- Peng Hailian, Yang Yongcheng, Wang Huimin, *et al.* 2004. Geochemistry and tectonic significance of the Xiaomoling Island arc volcanic rocks[J]. *Geology of Shaanxi*, 22(1): 12 ~ 16(in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides for major and minor element[J]. *Lithos*, 22: 246 ~ 263.
- Shaanxi Institute of Geological Survey. 2017. Regional Geology of China Shaanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 889 ~ 895(in Chinese with English abstract).
- Su Chunqian, Hu Jianmin, Li Yong, *et al.* 2006. The existence of two different tectonic attributes in Yaolinghe Group in South Qinling region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 287 ~ 298(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Thomas Bader, Leander Franz, Lothar Ratschbacher, *et al.* 2013. The Heart of China revisited: II Early Paleozoic (ultra)high-pressure and (ultra)high-temperature metamorphic qinling orogenic collage[J]. *Tectonics*, 32: 922 ~ 947.
- Tian Hui, Li Huaikun, Zhou Hongying, *et al.* 2017. Depositional age of the huashan group on the northern margin of the yangtze plate and its constraints on break up of the rodinia supercontinent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(11): 2 387 ~ 2 408(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Zhen, *et al.* 2009. Geochemical characteristics and zircon shrimp U-Pb dating of sehe granite in shanyang county, shanxi province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 657 ~ 1 666(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Zhang Zongqing, Wang Xiaoxia, *et al.* 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling orogen and its age constrained by zircon shrimp dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 220 ~ 232(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Zhang Chengli. 2015. Granitoid magmatism in the Qinling orogeny, central China and its bearing on orogenic evolution[J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(8): 1 109 ~ 1 125(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. *Science*, 308: 841 ~ 844.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planet*, 104: 381 ~ 397.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407 ~ 419.
- Wu Fafu, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2012. SHRIMP zircons U-Pb ages and geochemical characteristics of the Banbanshan K-feldspar granite in Shanyang, southern Qinling orogenic belt[J]. *J. Mineral Petrol.*, 32(2): 63 ~ 73(in Chinese with English abstract).
- Xu Bei. 2001. Recent study of the Rodinia supercontinent evolution and its main goal[J]. *Geological Science and Technology Information*, 20(1): 15 ~ 19(in Chinese with English abstract).
- Xu Tong, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, *et al.* 2016. Geochemical features and zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of the Neoproterozoic Zhangergou metamorphic andesitic rocks in the Mianxian-Lüeyang area of south Qinling orogeny: Evidence for amalgamation of Rodinia supercontinent[J]. *Geological Review*, 62(2): 434 ~ 450(in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Publishing House, 1 ~ 346(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhao, Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, *et al.* 2008. Geochemistry and geologic significance of basic rocks in the Xiaomoling complex in the Zhashui area, south Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(5): 611 ~ 617(in Chinese with English abstract).

- Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Jin Hailong, *et al.* 1999. Study on the Sr, Nd, Pb, O isotopes of basic dyke swarms in the Wudang block and basic volcanics of the Yaolinghe Group[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430~437(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng and Yao Anping. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Geology of Shaanxi*, 15(2): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1~855(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: some crucial questions on granite study (1) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1 141~1 152(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhou, Han Fanglin, Wang Genbao, *et al.* 2010. Relationship between the convergency of the plates formed in the Jinningian and Calcedonian periods and the metallogenesis in Qinling orogenic zone[J]. *Geology of Shaanxi*, 28(2): 1~10(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(2): 248~264.
- 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 1999. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆[J]. *高校地质学报*, 5(2): 148~156.
- 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 等. 2003. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. *地质通报*, 22(10): 775~781.
- 李靠社. 1990. 陕西山阳-商南耀岭河群地层时代的讨论[J]. *陕西地质*, 8(2): 53~58.
- 凌文黎, 程建萍, 王歆华, 等. 2002a. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. *岩石学报*, 18(1): 25~36.
- 凌文黎, 王歆华, 程建萍, 等. 2002b. 南秦岭镇安岛弧火山岩的厘定及其地质意义[J]. *地球化学*, 31(3): 222~229.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. *地质学报*, 79(2): 165~173.
- 卢欣祥, 董有, 尉向东, 等. 1999. 东秦岭吐雾山 A 型花岗岩的时代及其构造意义[J]. *科学通报*, 44(9): 975~978.
- 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 等. 2007. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. *地质通报*, 26(10): 1 240~1 244.
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 2006. 秦岭地区陡岭-小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质论评*, 52(6): 826~835.
- 彭海练, 杨永成, 王惠民, 等. 2004. 镇安县云镇小磨岭岛弧火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. *陕西地质*, 22(1): 12~16.
- 陕西省地质调查院. 2017. 中国区域地质志——陕西志[M]. 北京: 地质出版社, 889~895.
- 苏春乾, 胡建民, 李勇, 等. 2006. 南秦岭地区存在两种不同构造属性的耀岭河群[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(4): 287~298.
- 田辉, 李怀坤, 周红英, 等. 2017. 扬子板块北缘花山群沉积时代及其对 Rodinia 超大陆裂解的制约[J]. *地质学报*, 91(11): 2 387~2 408.
- 王涛, 王宗起, 闫臻, 等. 2009. 山阳色河花岗岩地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学[J]. *地质学报*, 83(11): 1 657~1 666.
- 王涛, 张宗清, 王晓霞, 等. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定[J]. *地质学报*, 79(2): 220~232.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 2015. 秦岭造山带花岗岩质岩浆作用与造山带演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(8): 1 109~1 125.
- 吴发富, 王宗起, 王涛, 等. 2012. 南秦岭山阳板板山钾长花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 32(2): 63~73.
- 徐备. 2001. Rodinia 超大陆构造演化研究的新进展和主要目标[J]. *地质科技情报*, 20(1): 15~19.
- 徐通, 裴先治, 刘成军, 等. 2016. 南秦岭勉略构造带张儿沟新元古代变安山岩地球化学特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄——Rodinia 超大陆聚合事件的记录[J]. *地质论评*, 62(2): 434~450.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1~346.
- 杨钊, 董云鹏, 周鼎武, 等. 2008. 南秦岭柞水地区小磨岭杂岩基性岩类的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 27(5): 611~617.
- 张成立, 周鼎武, 金海龙, 等. 1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr, Nd, Pb, O 同位素研究[J]. *岩石学报*, 15(3): 430~437.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. *陕西地质*, 15(2): 1~14.
- 张国伟, 张本仁, 袁学成, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1~855.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. *岩石学报*, 23(5): 1 141~1 152.
- 张拴厚, 韩芳林, 王根宝, 等. 2010. 秦岭造山带晋宁期加里东期板块汇聚及成矿关系[J]. *陕西地质*, 28(2): 1~10.