

豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Hf 同位素组成

杨 阳¹ 王晓霞² 柯昌辉² 李金宝³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 石宝沟花岗岩体位于华北陆块南缘, 主要由似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩组成, 发育岩浆暗色包体。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩的成岩年龄分别为 $(156 \pm 1) \text{Ma}$ ($N=15$, $\text{MSWD}=0.34$) 和 $(157 \pm 1) \text{Ma}$ ($N=17$, $\text{MSWD}=0.10$)。这些花岗岩的 $A/\text{CNK}=0.82 \sim 1.02$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.61\% \sim 8.91\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.02 \sim 1.48$, 属于高钾钙碱性、准铝质-弱过铝质 I 型花岗岩。稀土和微量元素特征显示其富集 LREE、Rb、Ba、K、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 HREE、P、Ti 等高场强元素, 具有弱的负铷异常, 个别样品具有正铷异常 ($\delta \text{Eu}=0.81 \sim 1.12$)。似斑状二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-22.6 \sim -8.3$, t_{DM2} 为 $2.64 \sim 1.73 \text{Ga}$; 中细粒二长花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-26.9 \sim -12.4$, t_{DM2} 为 $2.91 \sim 1.99 \text{Ga}$ 。岩石地球化学和锆石 Hf 同位素组成特征表明, 石宝沟花岗岩体的源区物质以壳源物质为主, 可能为太古宙太华群, 但也有年轻幔源组分的参与。

关键词: 秦岭晚侏罗世花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 岩石成因

中图分类号: P597; P588.12; P618.65

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)06-1525-18

华北陆块南缘是秦岭造山带的组成部分, 晚中生代岩浆作用发育, 形成了大量的花岗岩^[1-5]。这些花岗岩以两种形式产出, 一类为大的岩基, 如老牛山、华山、文峪、娘娘山、花山、五丈山、伏牛山等; 另一类为小的斑岩体, 如金堆城、八宝山、南泥湖、火神庙、雷门沟等, 它们与钼等多金属成矿关系密切, 构成了著名的东秦岭钼矿带^[6-10]。前人对这些晚中生代岩体, 特别是与成矿密切的小斑岩体已进行了一系列的研究^[4-5, 11-27]。但个别成矿岩体还缺乏精确的年代学数据和系统的地球化学研究, 影响了与区域上其他成矿岩体的对比研究和区带上成矿潜力的进一步评价。

豫西南泥湖矿集区位于东秦岭钼等多金属成矿带的东部, 大地构造上属于华北陆块南缘, 出露一套

中新元古界上栾川群巨厚中浅变质的浅海相碎屑岩及碳酸盐岩建造^[28]。该地区矿产资源丰富, 分布有三道庄、南泥湖、上房沟等超大型钼(钨)矿床及众多的铅锌矿床, 研究该地区中酸性小斑岩体, 对于进一步探讨花岗岩岩体与钼(钨)矿床在时空上和成因上的相互关系具有重要意义。

石宝沟花岗岩体位于豫西南泥湖矿集区内, 在其西侧及南东侧内外接触带上分别发现了竹园沟钼(钨)矿、满子沟钼矿等大型斑岩-矽卡岩型钼(钨)矿床^[29-30]。研究表明, 这两个矿体在空间上与花岗岩体关系紧密, 平面上呈不规则椭圆状分布于石宝沟花岗岩体内外接触带^[29-30]。目前, 对该岩体的研究较少, 仅在 20 世纪 90 年代进行过 Rb-Sr 测年和岩浆物源的探讨, 缺乏精确的成岩时代、系统的地球化学

收稿日期: 2012-06-26; **改回日期:** 2012-11-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010012012、1212010811033)、公益性行业专项课题(200911007-09)和栾川铅锌矿集区成岩、成矿系统的时空结构专题研究(2011BAB04B06)联合资助。

作者简介: 杨阳, 女, 1988 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; Email: yangm0926@163.com。

通讯作者: 王晓霞, 女, 1960 年生, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com。

和成因研究^[6]。为此,本文在前人研究的基础上,结合野外工作,对石宝沟花岗岩体进行 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 精确定年、元素地球化学及锆石 Hf 同位素组成研究,确定其地球化学特征,探讨其成因,为成岩与成矿关系的进一步研究提供岩石学方面的依据。

1 南泥湖矿集区地质特征

南泥湖矿集区位于华北陆块南缘洛南—栾川推覆带中,夹于栾川断裂带与马超营断裂带之间,矿集区内出露地层主要为中元古界官道口群、新元古界栾川群和陶湾群^[31](图 1)。官道口群分布于矿集区北部,岩性主要为含燧石条带白云质大理岩。栾川群分

布于矿集区中部,自上而下由白术沟组、三川组、南泥湖组和煤窑沟组组成。白术沟组主要由炭质板岩夹含炭石英细砂岩组成,局部夹含炭大理岩;三川组下部以含石英细粒变质砂岩为主,上部以大理岩为主;南泥湖组下段以石英岩为主,夹绢云母黑云母片岩,中段以角岩为主夹石英岩,上段为不纯的大理岩和钙硅酸盐角岩;煤窑沟组下段为石英大理岩、钙质石英岩、变质细砂岩夹片岩,中段为大理岩,上段主要为白云石大理岩夹含炭质大理岩及 1~2 层石煤。陶湾群出露于矿集区南部,主要岩性为含砾灰岩、大理岩、千枚岩、变砂岩和石英岩。

区内构造以近 EW 为主,受华北陆块南缘的边

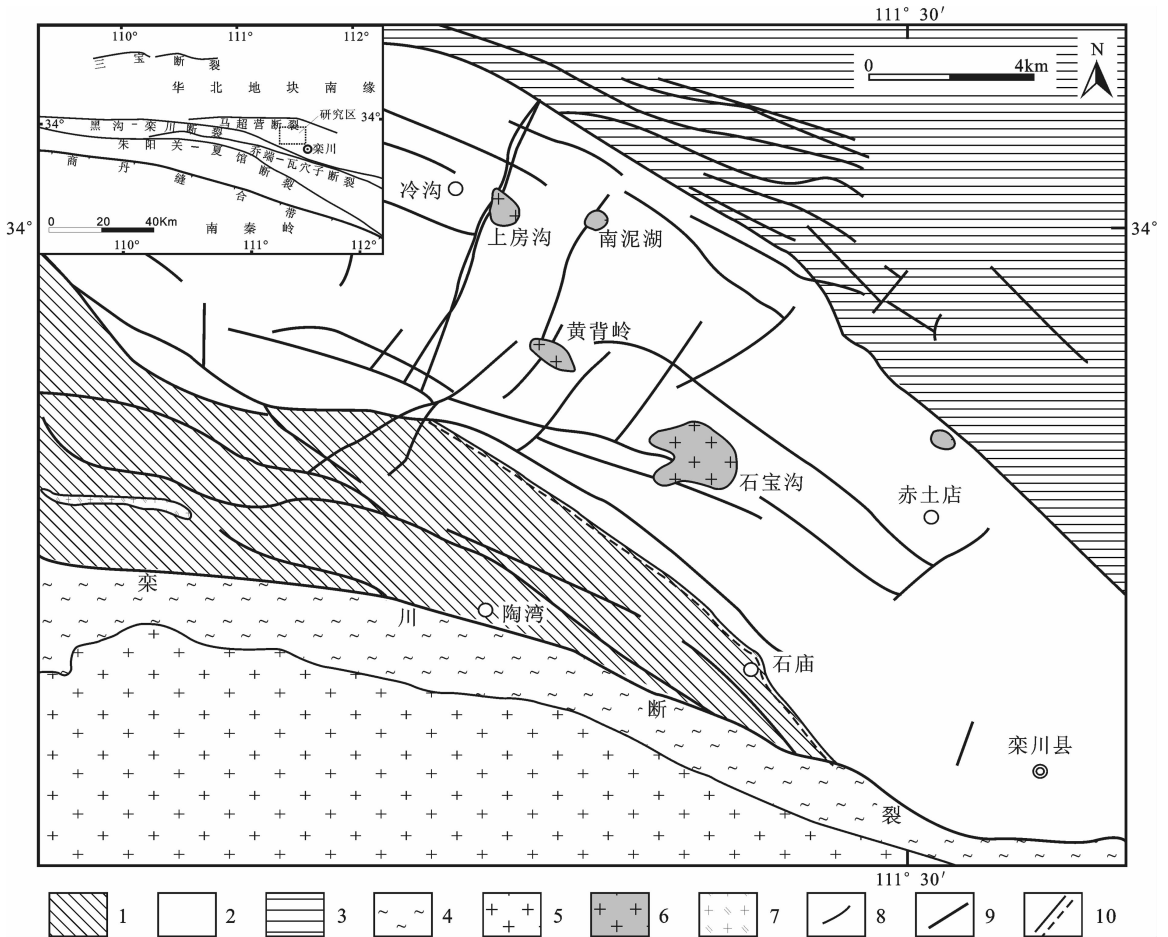


图 1 豫西南泥湖矿集区地质简图(修改自文献[28])

1—新元古界陶湾群碳酸盐岩和碎屑岩;2—新元古界栾川群碳酸盐岩、碎屑岩和粗面岩;3—中元古界官道口群含燧石条带状大理岩;4—中元古界宽坪群大理岩和玄武质岩石;5—早白垩世花岗岩类;6—晚侏罗世花岗岩类;7—晚侏罗世花岗岩斑岩;8—地质界线;9—断层;10—平行不整合界线

Fig.1 Geological map of the Nannihu ore district (modified after Reference [28])

1- Carbonate and clastic rocks of Neoproterozoic Taowan Group; 2- Carbonate, clastic rocks and trachyte of Neoproterozoic Luanchuan Group; 3- Containing chert banded marble of Proterozoic Eon Guandaokou group; 4-Marble and basaltic rocks of Proterozoic Eon Kuanping Group; 5-Early Cretaceous granitoid; 6-Late Jurassic granitoid; 7-Late Jurassic granite porphyry; 8-Geological boundary; 9-Fault; 10-Parallel unconformity boundaries

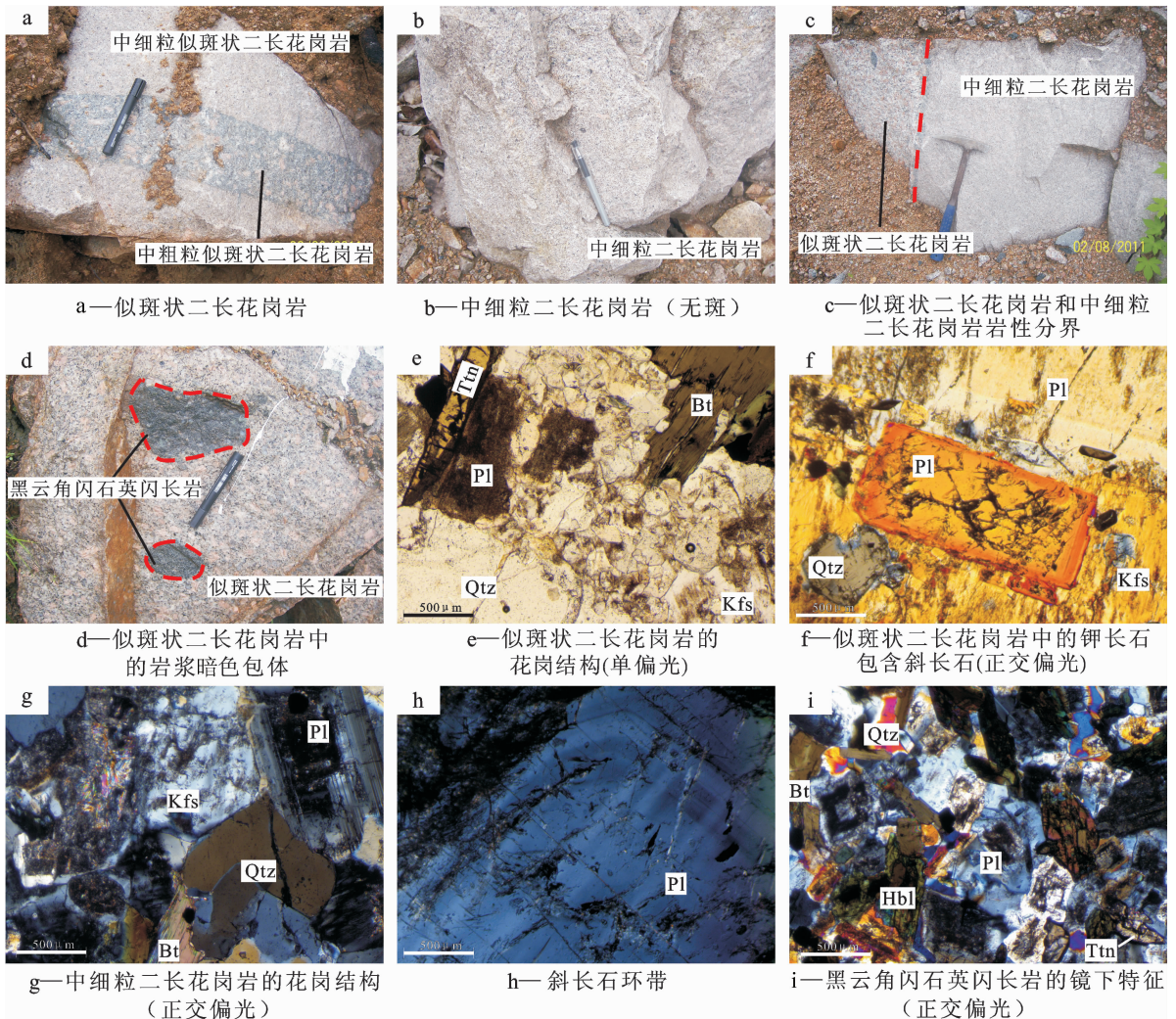
缘构造影响,具有形成时代早、活动时间长和呈带状分布的特征。NNE 向构造是燕山期叠置在 EW 向构造带之上的主导构造,在地壳浅部表现为 NNE 向断裂近等间距“行列式”分布,燕山期构造活动对区内中酸性小岩体及钼矿床的形成和分布具有主控意义^[7]。

矿集区内岩浆活动发育,主要有新元古代碱性火山岩和辉长岩体、侏罗纪花岗斑岩体。岩体多分布于近 EW 向与 NNE 向构造交汇处,出露面积多小于 1 km²^[10]。南泥湖岩体、上房沟岩体和石宝沟岩体等是与南泥湖矿集区成矿作用密切相关的燕山期花岗岩体^[11]。南泥湖岩体呈小岩株产出,南北长 450 m,东西宽 300 m,出露面积约 0.12 km²,岩体呈上小下大的不规则小岩株,岩性单一,为斑状花岗岩^[12]。

上房沟岩体呈岩筒状,地表长 500 m,宽 100 m,岩体上小下大,岩体主要由钾长花岗斑岩及少量斑状黑云母花岗岩组成^[13]。石宝沟岩体地表长约 2 km、宽约 1.5 km,面积约 3 km²,主要由似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩(无斑)组成。

2 岩体地质及岩相学特征

石宝沟花岗岩体出露于栾川县石庙乡石宝沟—竹园沟一带,处于黄背岭背斜近核部,主要侵位于新元古界栾川群白术沟组、三川组和煤窑沟组中。岩体侧伏方向 290°,与区域构造线方向基本一致^[29]。岩体岩性主要由似斑状二长花岗岩(图 2-a)和中细粒二长花岗岩(无斑)(图 2-b)组成,两者接触界限不清



Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英; Bt—黑云母; Hbl—角闪石; Ttn—榍石

图 2 石宝沟花岗岩体的岩相学特征

Fig. 2 Petrography of the Shibaogou granitoid pluton

晰(图 2-c),未见明显的冷凝边。其中主体岩性为似斑状二长花岗岩,在岩体中由南东至北西,其斑晶含量逐渐减少,粒度逐渐变细,在似斑状二长花岗岩内局部发育有岩浆暗色包体(图 2-d),岩性以黑云角闪石英闪长岩为主,呈灰绿色,大小不等,形态各异,与寄主岩石的界限比较清晰。岩体与围岩接触带发生硅化、钾化、矽卡岩化等蚀变,矽卡岩中具有辉钼矿化和闪锌矿化^[34]。

似斑状二长花岗岩:呈肉红色,块状构造,似斑状结构,斑晶主要为钾长石、斜长石和石英(图 2-e),粒度多在 2~4 mm,含量 25%~30%。其中钾长石呈半自形-他形板状,粒度多在 2~4 mm,最大可达 6 mm,含量 10%~20%,可见卡氏双晶,偶见格子双晶,局部还可见其包含斜长石(图 2-f);斜长石呈自形-半自形板状,粒度较钾长石细,多在 2~4 mm,大的可达 5 mm,含量为 10%~15%,发育聚片双晶和卡钠复合双晶,表面发生弱绢云母化;石英多呈他形粒状,粒度 1.5~4 mm,含量 10%~15%,具波状消光;黑云母呈半自形片状,含量 2%~5%,可见绿泥石化。基质主要为钾长石(10%~20%)、斜长石(5%~15%)、石英(5%~15%)及少量的黑云母,副矿物为榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

中细粒二长花岗岩:呈灰色或肉红色出露,等粒结构,主要矿物组成为钾长石、斜长石、石英和黑云母(图 2-g)。钾长石呈半自形-他形板状,格子双晶发育,粒径为 0.2~2.5 mm 不等,含量为 30%~40%;斜长石呈半自形-他形板状,发育聚片双晶,局部可见环带结构(图 2-h),表面发生弱绢云母化,粒径为 0.2~2 mm,含量 25%~35%;石英呈他形粒状,粒径多在 0.2~1.5 mm,含量 20%~25%;黑云母多呈半自形片状,多色性、吸收性明显,发育弱绿泥石化,含量 5%~10%。副矿物为榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

黑云角闪石英闪长岩:呈半自形粒状结构,主要由斜长石、钾长石、黑云母、角闪石及少量石英组成(图 2-i)。斜长石呈半自形-他形板状,发育聚片双晶,表面发生弱绢云母化,粒径 0.1~0.9 mm,含量 45%~55%;钾长石呈半自形-他形板状,粒径 0.1~0.4 mm,含量较少,为 5%~10%;石英呈他形粒状,粒径 0.1~0.2 mm,含量 10%;黑云母多呈半自形,局部绿泥石化,粒径 0.3~0.8 mm,含量 10%~15%;角闪石呈粒状,解理发育,粒径 0.1~1 mm,含量 10%~15%。副

矿物为榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。

3 样品采集与分析方法

用于定年的 2 个样品采自栾川县石庙镇石宝沟村,岩性分别为似斑状二长花岗岩(样号 SBG-01/2B,采样位置:北纬 33°51'57.3",东经 111°31'46.3")和中细粒二长花岗岩(样号 SBG-06/1B,采样位置:北纬 33°53'7.2",东经 111°31'49.5")。10 件新鲜岩石样品分别采自石宝沟花岗岩体的不同位置,用于元素地球化学分析。

锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICPMS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICPMS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度^[35]。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal8.3^[36-37]完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同文献^[36-38]。

主量元素、微量元素测试分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,主量元素采用 XRF 方法完成,分析精度一般优于 2%。微量元素采用 ICP-MS 完成,样品溶解在高压溶样弹中进行。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 Neptune PLUS 多接收等离子质谱和 Geolas 2005 准分子激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 44 μ m,测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点位于与 U-Pb 定年分析点的附近。分析过程中每 8 h 做一次法拉第杯增益校正 Gain 和电子噪声测量 Baseline。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282015 ± 31 (2SD, n=10),与文献报道值^[39-41]在误差范围内完全一致。数据处理采用 ICPMSDataCal8.3^[36-37]。

4 分析结果

4.1 锆石 LA-ICPMS 定年

4.1.1 锆石特征

石宝沟花岗岩体中所采 2 个样品 SBG-01/2B 和 SBG-06/1B, 其中所挑选的锆石多为无色透明, 玻璃光泽, 晶体呈短至长柱状, 自形-半自形。粒径一般长 150~300 μm , 宽 50~100 μm , 长宽比 2:1~3:1。锆石颗粒晶面完整, 平直光滑, 少量晶面较粗糙, 具蚀痕、麻点和凹凸不平的现象。阴极发光 (CL) 图像 (图 3) 显示, 锆石具有明显的震荡韵律环带, 表现为岩浆锆石的特征。似斑状二长花岗岩 (SBG-01/2B) 中的锆石 Th、U 含量分别变化于 $420 \times 10^{-6} \sim 4483 \times 10^{-6}$ 、 $332 \times 10^{-6} \sim 3176 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.28~1.01, 平均值为 0.50, 大于 0.40 (表 1); 中细粒二长花岗岩 (SBG-06/1B) 中的锆石 Th、U 含量变化于 $454 \times 10^{-6} \sim 1582 \times 10^{-6}$ 、 $1022 \times 10^{-6} \sim 2024 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.32~1.02, 平均值为 0.50, 大于 0.40 (表 1)。以上特征表明这两种岩性的锆石均为岩浆成因锆石。

4.1.2 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄

LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年分析结果 (表 1) 显示:

在似斑状二长花岗岩样品 SBG-01/2B 中 24 个分析点有 9 个点可能存在 Pb 丢失, 致使其谐和度较低, 在年龄统计时舍去这 9 个点的结果, 剩余 15

个点的分析结果在谐和图上组成密集的一簇 (图 4-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(156 \pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=0.34), 代表似斑状二长花岗岩的形成年龄。

中细粒二长花岗岩样品 SBG-06/1B 中, 所测 25 个点中有 8 个点 U 值较低, 导致年龄值离群, 剩余 17 个值为有效数据, 在谐和图上组成密集的一簇 (图 4-b), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(157 \pm 1)\text{Ma}$ (MSWD=0.10), 为中细粒二长花岗岩的形成年龄。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

石宝沟花岗岩的地球化学分析结果见表 2。

石宝沟似斑状二长花岗岩、中细粒二长花岗岩 SiO_2 含量较高, 为 70.48%~73.00%, TFe_2O_3 和 CaO 含量较低, 分别为 1.44%~2.25% 和 1.41%~2.63%, 高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3=13.49\% \sim 14.82\%$), 富碱 ($\text{K}_2\text{O}=3.91\% \sim 5.19\%$, $\text{Na}_2\text{O}=3.49\% \sim 4.45\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}=7.61\% \sim 8.91\%$, 里特曼指数 δ 值为 1.99~3.15), 低镁 ($\text{MgO}=0.30\% \sim 0.93\%$), 铝饱和指数 $A/\text{CNK}=0.82 \sim 1.02$, 为准铝质-弱过铝质和高钾钙碱性系列 (图 5)。与区域上其他岩体, 如南泥湖岩体和上房沟岩体 (表 2) 的岩石化学组成相似, 均具有高硅、富碱 ($\text{K} > \text{Na}$) 的特点, 但石宝沟花岗岩体的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 含量较高。

石宝沟岩体中的暗色包体 (黑云角闪石英闪长

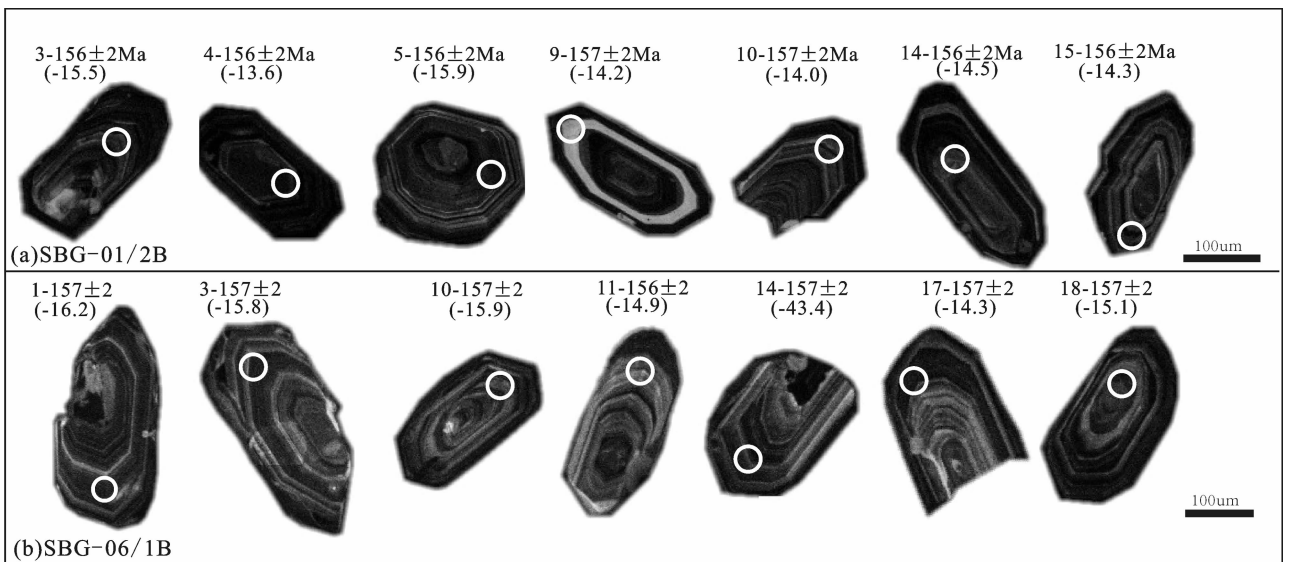


图 3 石宝沟花岗岩体锆石阴极发光图像 (图中括号内的负值代表 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)

Fig. 3 Zircon CL images of Shibaogou granitoid pluton

表 1 石宝沟花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果
Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data of Shibaogou granitoid pluton

样品点	Pb/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma,1σ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma,1σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma,1σ)
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
似斑状二长花岗岩 SBG-01/2B										
3	602	3773	3176	0.41	0.0485±0.0016	0.1655±0.0056	0.0244±0.0002	120±78	156±5	156±2
4	615	4285	2934	0.51	0.0536±0.0018	0.1834±0.0065	0.0245±0.0004	367±78	171±6	156±2
5	355	2184	1676	0.43	0.0481±0.0019	0.1640±0.0067	0.0246±0.0003	106±94	154±6	156±2
7	346	2501	1275	0.70	0.0526±0.0022	0.1778±0.0076	0.0244±0.0003	309±98	166±7	156±2
8	467	3048	2475	0.45	0.0514±0.0018	0.1747±0.0060	0.0245±0.0003	257±84	163±5	156±2
9	484	1492	1146	0.50	0.0549±0.0025	0.1852±0.0079	0.0246±0.0004	409±102	172±7	157±2
10	261	1838	1306	0.55	0.0509±0.0023	0.1739±0.0082	0.0246±0.0004	235±107	163±7	157±2
11	297	1825	1884	0.39	0.0475±0.0020	0.1606±0.0066	0.0243±0.0003	72±96	151±6	155±2
12	66	420	332	0.50	0.0507±0.0052	0.1671±0.0191	0.0236±0.0007	233±217	157±17	150±4
14	358	2369	2331	0.39	0.0474±0.0017	0.1611±0.0059	0.0245±0.0004	78±72	152±5	156±2
15	158	1447	1241	0.45	0.0516±0.0024	0.1755±0.0081	0.0245±0.0003	333±106	164±7	156±2
17	521	4483	1886	1.01	0.0502±0.0033	0.1692±0.0124	0.0243±0.0003	206±147	159±11	155±2
20	366	2742	2064	0.46	0.0489±0.0071	0.1587±0.0273	0.0241±0.0003	143±311	150±24	153±2
21	128	763	1285	0.28	0.0484±0.0076	0.1556±0.0288	0.0244±0.0005	117±333	147±25	156±3
23	135	1098	1208	0.55	0.0466±0.0047	0.1551±0.0180	0.0245±0.0003	28±226	146±16	156±2
中细粒二长花岗岩 SBG-06/1B										
1	59	454	1138	0.40	0.0509±0.0021	0.1737±0.0074	0.0246±0.0004	239±66	163±6	157±2
2	85	620	1734	0.37	0.0532±0.0022	0.1840±0.0086	0.0247±0.0004	339±93	171±7	157±2
3	62	506	1154	0.44	0.0519±0.0021	0.1761±0.0072	0.0246±0.0003	280±94	165±6	157±2
5	146	1380	1736	0.74	0.0532±0.0022	0.1836±0.0078	0.0247±0.0004	345±93	171±7	157±3
6	124	974	1908	0.44	0.0539±0.0020	0.1820±0.0066	0.0243±0.0003	369±83	170±6	155±2
7	62	487	1022	0.42	0.0482±0.0022	0.1645±0.0074	0.0246±0.0003	109±104	155±6	157±2
8	82	721	1306	0.55	0.0503±0.0022	0.1718±0.0077	0.0246±0.0003	209±104	161±7	156±2
9	79	604	1455	0.40	0.0535±0.0029	0.1865±0.0112	0.0247±0.0004	350±122	174±10	157±3
10	105	893	1419	0.65	0.0516±0.0023	0.1768±0.0080	0.0247±0.0003	265±99	165±7	157±2
11	66	465	1251	0.37	0.0504±0.0030	0.1738±0.0113	0.0245±0.0003	213±134	163±10	156±2
14	157	1582	1595	1.02	0.0552±0.0022	0.1900±0.0073	0.0247±0.0003	420±87	177±6	157±2
16	97	799	1208	0.64	0.0598±0.0028	0.2055±0.0099	0.0246±0.0003	598±99	190±8	157±2
17	92	633	2024	0.32	0.0508±0.0019	0.1747±0.0064	0.0247±0.0003	232±90	164±6	157±2
18	100	696	1788	0.41	0.0535±0.0021	0.1837±0.0072	0.0247±0.0003	350±89	171±6	157±2
20	80	619	1105	0.48	0.0517±0.0024	0.1761±0.0078	0.0247±0.0004	333±105	165±7	157±2
23	86	670	1550	0.45	0.0444±0.0017	0.1518±0.0056	0.0246±0.0003	error	144±5	157±2
25	103	800	1869	0.46	0.0452±0.0018	0.1550±0.0061	0.0246±0.0003	error	146±5	157±2

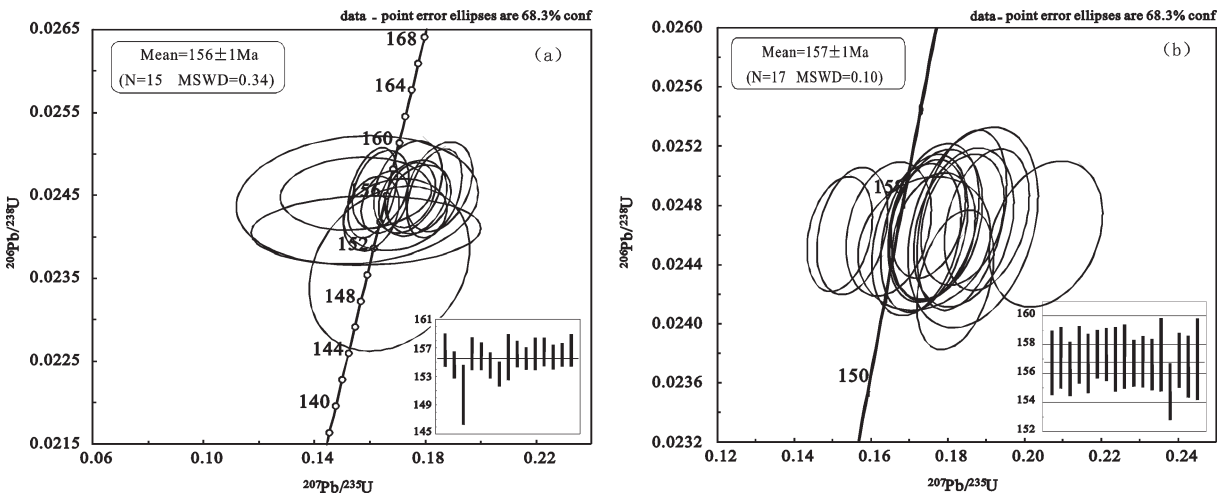


图 4 石宝沟花岗岩体似斑状二长花岗岩(a)和中细粒二长花岗岩(b)锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram for the porphyritic monzogranite (a) and middle-fine-grained monzogranite (b) from Shibaogou granitoid pluton

岩), SiO₂ 含量较低, 为 56.24%~61.99%, 高铝(Al₂O₃=15.30~16.88), 富碱(K₂O=3.69%~3.80%, Na₂O=4.15%~5.16%, K₂O+Na₂O=7.95%~8.86%, 里特曼指数 δ 值为 3.27~5.64), 高镁(MgO=2.18%~2.54%), 铝饱和指数 A/CNK=0.78~0.85, 为准铝质和钾玄岩系列(图 5)。

4.2.2 微量元素

石宝沟花岗质岩石的 Sr、Ba、K、Pb、Rb 含量较高, 如 Rb 为 151.02×10⁻⁶~200.20×10⁻⁶, 而 Li 含量较低(6.63×10⁻⁶~9.92×10⁻⁶), 不相容元素 Rb/Sr 比值为 0.34~0.43, 两种主体岩性的 Th/U 比值为 3.74~8.42, 平均 5.54, 表明 Th 比较富集。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6)中, 两种岩性标准化曲线

变化基本相同, 表现为富集 K、Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 而相对亏损 P、Nb、Ta、Ti 等高场强元素。其稀土元素总量偏低, 变化于 118.76×10⁻⁶~200.56×10⁻⁶, 轻重稀土分馏明显, LREE/HREE=16.78~22.14, 轻稀土分馏明显, (La/Yb)_N=18.02~31.76。虽然稀土元素总量变化比较大, 但在稀土元素球粒陨石标准化分配模式图上(图 6), 分配型式基本一致, 表现为轻稀土富集的右倾特征, 负铕异常不明显或呈正异常(δEu=0.81~1.12), 无铈异常。

石宝沟岩体中的暗色包体(黑云角闪石英闪长岩)同样具有较高的 Sr、Ba、K、Pb, 但 Ba、K 含量低, Li 的含量(16.66×10⁻⁶~22.20×10⁻⁶)增高, 此外, 可见 P、V、Mn、Co、Ni、Nb、Ti 等元素含量明显增高(表 2), Rb/

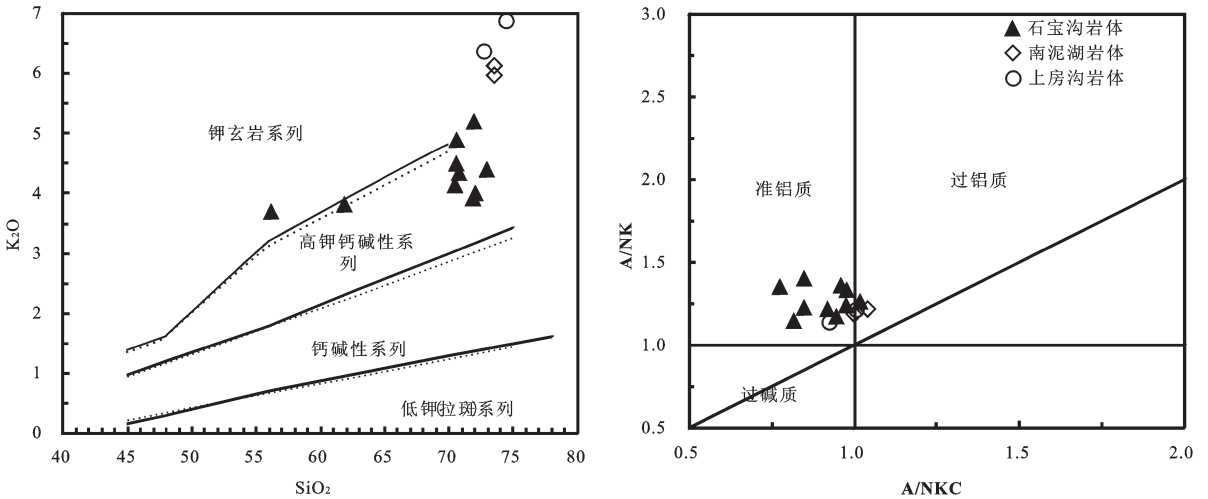


图 5 石宝沟花岗岩体及其附近岩体 SiO₂-K₂O 图解及 A/NKC-A/NK 图解(底图据文献[42-43])
Fig. 5 SiO₂-K₂O and A/NKC-A/NK diagrams for Shibaogou granitoid pluton and its surrounding intrusions (after Reference [42-43])

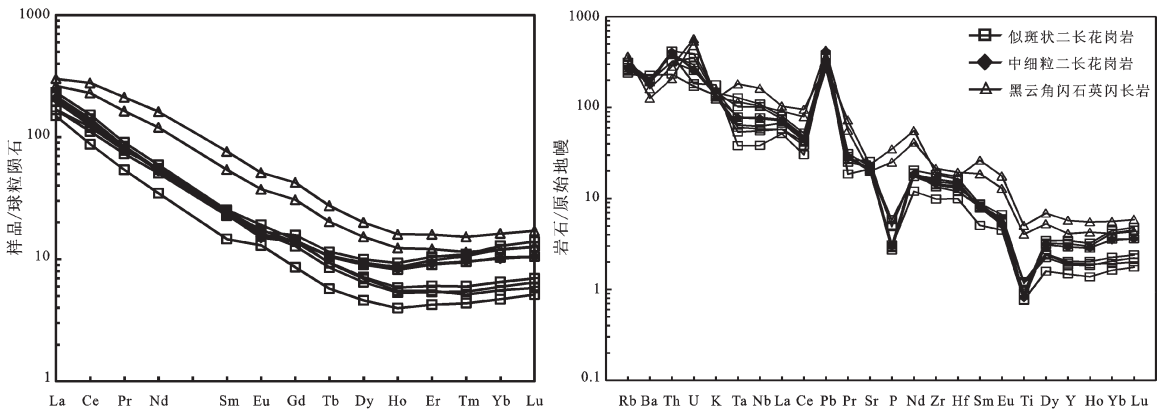


图 6 石宝沟花岗岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化图解(标准值据文献[44])
Fig. 6 Primitive mantle normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE patterns of Shibaogou granitoid pluton (normalization values after Reference [44])

表 2 石宝沟花岗岩体及其附近岩体的主量(%)、微量和稀土元素(10^{-6})及相关参数
Table 2 Major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of Shibaogou granitoid pluton and its surrounding intrusions

SBG-01/2B	石宝沟岩体										南泥湖岩体			上房沟岩体	
	似麻状二长花岗岩					中细粒二长花岗岩					黑云角闪 石英闪长岩		花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩
	SBG-03/1B	SBG-04/1B	SBG-02/1B	SBG-04/2B	SBG-05/1B	SBG-05/2B	SBG-06/1B	SBG-02/2B	SBG-05/3B	15	73.56	73.55	74.53	72.73	
70.59	71.84	70.48	70.82	72.07	72.00	73.00	56.24	61.99	73.56	73.55	74.53	72.73			
0.18	0.15	0.24	0.24	0.22	0.15	0.16	0.97	0.75	0.15	0.17	0.15	0.2			
13.80	14.02	13.49	14.17	13.65	14.29	13.50	16.88	15.30	12.89	13.03	11.37	12.61			
1.66	1.60	1.67	1.78	2.09	1.44	1.62	6.92	5.64	1.05	0.97	0.94	2.12			
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.05	0.16	0.18	0.1	0.03	0.03	0.02			
0.75	0.72	0.93	0.51	0.55	0.39	0.30	2.18	2.54	0.59	0.46	0.44	0.65			
2.55	2.32	1.60	2.07	1.85	1.41	1.49	4.96	3.89	0.98	1.09	1.16	1.1			
4.42	3.69	4.45	4.25	3.76	3.49	3.81	5.16	4.15	2.54	2.66	1.59	2.17			
4.49	3.91	4.90	4.13	3.99	5.19	4.37	3.69	3.80	5.97	6.13	6.9	6.36			
0.06	0.05	0.08	0.10	0.12	0.06	0.06	0.80	0.54	0.07	0.06	0.07	0.06			
0.56	0.68	0.81	0.56	0.65	0.64	0.56	0.78	0.74	1.68	1.38	0.85	0.78			
99.10	99.03	99.32	98.88	99.01	99.07	98.93	98.74	99.52	100.1	100.1	99.28	98.8			
8.91	7.61	8.14	8.57	7.75	8.68	8.19	8.86	7.95	8.51	8.79	8.49	8.53			
1.02	1.06	1.03	1.02	1.06	1.48	1.15	0.72	1.15	2.35	2.3	4.34	2.93			
2.86	1.99	3.15	2.39	2.05	2.58	2.22	5.64	3.27	2.37	1.1	2.29	2.45			
0.82	0.96	0.85	0.92	0.98	1.02	0.98	0.78	0.85	1.04	1	0.93	1.01			
1.14	1.36	1.17	1.21	1.30	1.26	1.23	1.35	1.40	1.21	1.18	1.13	1.2			
9.90	6.63	7.44	7.90	8.60	9.16	9.92	22.20	16.66							
274	257	293	465	554	281	283	3324	2374							
36700	32820	34369	33880	34260	44600	38000	30960	32500							
1.28	1.17	1.43	1.94	2.16	1.11	1.26	7.60	8.58							
1125	999	1184	1581	1514	987	1053	6524	5246							
12.39	9.53	15.53	17.21	21.24	11.94	10.82	81.32	81.20							
7.60	11.04	4.49	8.06	7.63	7.95	5.39	8.36	27.10							
279.4	286.6	268.6	257.9	268.4	168.9	376.0	1192	1266							
1.98	1.15	1.35	2.95	2.55	1.51	1.05	10.11	11.05							
3.97	4.10	3.16	4.79	3.31	4.86	2.72	8.21	14.61							
16.33	0.41	7.65	1.62	0.83	1.07	1.18	17.69	1.18							
26.14	17.81	43.28	25.64	23.34	29.10	21.74	90.80	85.82							
18.77	16.02	20.06	19.77	19.08	17.34	18.33	28.14	24.32							
184.7	151.0	200.2	168.0	174.5	163.1	171.1	233.4	227.4							
431.2	448.0	473.4	541.0	463.2	444.4	422.8	494.8	419.6							

续表 2

岩体	石宝沟岩体										南泥湖岩体		上房沟岩体	
	似斑状二长花岗岩					中细粒二长花岗岩					黑云角闪石英闪长岩		花岗岩	
岩性	SBG-01/2B	SBG-03/1B	SBG-04/1B	SBG-02/1B	SBG-04/2B	SBG-05/1B	SBG-05/2B	SBG-06/1B	SBG-02/2B	SBG-05/3B	15	15	15	15
Zr	171.2	149.7	205.2	161.7	157.4	157.1	110.4	182.8	213.0	239.6				
Nb	72.92	55.12	77.74	44.30	39.49	41.63	27.19	53.75	116.4	74.03				
Cs	1.90	1.64	2.84	2.43	3.12	4.03	2.81	3.94	10.30	10.63				
Ba	1356	1458	1426	1411	1584	1338	1447	1279	885.2	1122				
Hf	4.51	3.68	5.05	4.21	3.98	4.33	3.06	4.64	5.38	5.98				
Ta	4.18	3.23	5.24	2.63	2.20	2.48	1.56	3.15	7.45	4.73				
Pb	22.08	19.37	25.76	19.06	20.76	21.90	25.50	29.40	19.86	30.24				
Th	35.46	32.32	32.48	26.91	19.76	27.44	32.44	34.44	17.61	24.16				
U	8.21	6.15	5.69	5.38	3.59	7.34	3.85	5.38	11.24	11.98				
Rb/Sr	0.43	0.34	0.42	0.37	0.29	0.38	0.37	0.4	0.47	0.54				
Th/U	4.32	5.26	5.71	5	5.5	3.74	8.42	6.4	1.57	2.02				
La	51.46	50.72	55.04	46.33	39.78	39.58	35.38	49.00	71.18	62.40				
Ce	86.34	80.70	93.14	76.36	73.48	67.92	53.56	80.26	169.5	140.3				
Pr	7.97	7.95	8.58	7.55	7.39	6.92	5.11	7.70	20.10	15.48				
Nd	25.50	25.56	27.68	25.33	25.84	23.60	16.20	24.70	75.30	55.96				
Sm	3.59	3.61	3.86	3.75	3.89	3.48	2.24	3.53	11.65	8.27				
Eu	0.91	0.93	0.98	1.01	1.11	0.95	0.75	0.87	2.96	2.16				
Gd	2.93	2.90	3.24	2.85	2.96	2.62	1.77	2.86	8.71	6.30				
Tb	0.40	0.39	0.43	0.35	0.35	0.32	0.21	0.40	1.02	0.76				
Dy	2.37	2.29	2.53	1.81	1.75	1.64	1.17	2.30	5.07	3.87				
Ho	0.49	0.47	0.53	0.33	0.31	0.30	0.23	0.47	0.91	0.70				
Er	1.62	1.50	1.73	1.00	0.91	0.89	0.70	1.53	2.64	2.01				
Tm	0.27	0.24	0.28	0.15	0.13	0.14	0.11	0.24	0.39	0.29				
Yb	2.05	1.76	2.19	1.11	0.95	1.01	0.80	1.72	2.75	2.03				
Lu	0.33	0.27	0.36	0.18	0.15	0.16	0.13	0.27	0.43	0.32				
Y	14.48	13.37	15.74	9.24	8.84	8.42	6.71	13.25	26.08	18.68				
∑REE	186.2	179.3	200.6	168.1	159.0	149.5	118.4	175.9	372.7	300.9				
LREE	175.8	169.5	189.3	160.3	151.5	142.5	113.3	166.1	350.7	284.6				
HREE	10.45	9.80	11.28	7.78	7.51	7.10	5.12	9.79	21.93	16.27				
LREE/HREE	16.82	17.29	16.78	20.62	20.17	20.08	22.14	16.96	16.00	17.49				
La _N /Yb _N	18.02	18.06	18.06	30.02	30.19	28.08	31.76	20.46	18.55	22.01				
δ Eu	0.83	0.85	0.82	0.90	0.96	0.92	1.12	0.81	0.86	0.88				
δ Ce	0.94	0.89	0.94	0.91	0.98	0.93	0.86	0.91	1.08	1.08				

文献[45]

本文

注: A/NCK=(Al₂O₃)/(CaO+K₂O+Na₂O)摩尔数分数比, A/NK=(Al₂O₃)/(K₂O+Na₂O)摩尔数分数比;里特曼指数=(K₂O+Na₂O)²/(SiO₂-43)。球粒陨石、原始地幔数据来自文献[44], δ Eu=Eu_N/(Sm_N+Gd_N)*1/2, δ Ce=Ce_N/(La_N+Pr_N)*1/2, ∑REE、HREE 均不含 Y。

Sr 比值为 0.47~0.54, Th/U 比值降低, 为 1.57~2.02, 表明岩体的暗色包体中具有低的 Th 值。与主体岩性微量元素原始地幔标准化蛛网图对比, 黑云角闪石英闪长岩相对富集 U、Nd 等元素(图 6)。稀土总量明显高于花岗质岩石, 为 $300.87 \times 10^{-6} \sim 372.66 \times 10^{-6}$, LREE/HREE=16.00~17.49, $(La/Yb)_N=18.55 \sim 22.01$, 稀土元素球粒陨石标准化分配模式图(图 6)与主体岩性一致, 为右倾斜型, 负铕异常不明显, $\delta Eu=0.86 \sim 0.88$ 。

4.3 锆石 Hf 同位素组成

在对锆石 U-Pb 年龄测试后, 在锆石年龄分析

点的附近又进行了 Hf 同位素分析, 分析结果见表 3。除少数分析点外 (SBG-01/2B 中点 16、19、21, SBG-06/1B 中点 2、4、5、8、12), 大部分点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均低于 0.002, 表明绝大多数锆石形成后的放射性成因 Hf 积累十分有限, 因此, 所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值能较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征^[46-49]。

似斑状二长花岗岩样品 SBG-01/2B 中所测的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282163~0.282446, 由对应的测点年龄计算得到的 Hf 同位素初始比值($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 为 0.282161~0.282444, Hf 同位素组成变化范围较宽,

表 3 石宝沟花岗岩体的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Hf isotopic data of zircon from Shibaogou granitoid pluton

样号	T(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
似斑状二长花岗岩 SBG-01/2B													
1	151	0.032921	0.000362	0.001124	0.000014	0.282280	0.000011	0.282277	-17.4	-14.2	1.38	2.10	-0.97
2	156	0.028786	0.000243	0.000952	0.000007	0.282241	0.000009	0.282238	-18.8	-15.5	1.43	2.19	-0.97
3	156	0.044238	0.001649	0.001426	0.000051	0.282295	0.000009	0.282291	-16.9	-13.6	1.37	2.07	-0.96
4	156	0.040254	0.000295	0.001342	0.000004	0.282228	0.000008	0.282224	-19.2	-15.9	1.46	2.22	-0.96
6	156	0.047748	0.000418	0.001438	0.000014	0.282286	0.000011	0.282282	-17.2	-13.9	1.38	2.09	-0.96
7	156	0.033855	0.000228	0.001113	0.000003	0.282256	0.000011	0.282252	-18.3	-15.0	1.41	2.15	-0.97
8	157	0.037931	0.000268	0.001237	0.000011	0.282276	0.000011	0.282272	-17.6	-14.2	1.39	2.11	-0.96
9	157	0.031981	0.001030	0.001010	0.000028	0.282283	0.000012	0.282280	-17.3	-14.0	1.37	2.09	-0.97
10	155	0.023638	0.000464	0.000756	0.000012	0.282163	0.000010	0.282161	-21.5	-18.2	1.53	2.36	-0.98
11	150	0.024599	0.000343	0.000623	0.000007	0.282446	0.000011	0.282444	-11.5	-8.3	1.13	1.73	-0.98
13	156	0.044911	0.001633	0.001629	0.000047	0.282271	0.000009	0.282266	-17.7	-14.5	1.41	2.12	-0.95
14	156	0.041059	0.000571	0.001357	0.000013	0.282274	0.000009	0.282270	-17.6	-14.3	1.39	2.11	-0.96
15	156	0.035012	0.000588	0.001056	0.000013	0.282298	0.000015	0.282295	-16.7	-13.4	1.35	2.06	-0.97
16	155	0.089929	0.001518	0.003317	0.000069	0.282249	0.000020	0.282239	-18.5	-15.5	1.51	2.18	-0.90
17	157	0.046070	0.001314	0.001668	0.000058	0.282219	0.000010	0.282214	-19.5	-16.3	1.48	2.24	-0.95
18	156	0.024879	0.000380	0.000816	0.000016	0.282038	0.000017	0.282035	-26.0	-22.6	1.70	2.64	-0.98
19	153	0.053709	0.003410	0.002110	0.000129	0.282243	0.000018	0.282237	-18.7	-15.6	1.47	2.19	-0.94
20	156	0.029038	0.000640	0.001020	0.000038	0.282273	0.000008	0.282270	-17.6	-14.3	1.38	2.11	-0.97
21	156	0.057086	0.001068	0.002439	0.000047	0.282302	0.000021	0.282295	-16.6	-13.5	1.39	2.06	-0.93
中细粒二长花岗岩 SBG-06/1B													
1	157	0.029131	0.000219	0.001068	0.000006	0.282221	0.000009	0.282218	-19.5	-16.2	1.46	2.23	-0.97
2	157	0.054161	0.000684	0.002408	0.000035	0.282239	0.000016	0.282232	-18.8	-15.7	1.48	2.20	-0.93
3	157	0.032814	0.000157	0.001256	0.000007	0.282230	0.000009	0.282227	-19.2	-15.8	1.45	2.21	-0.96
4	157	0.067630	0.000371	0.002437	0.000026	0.282232	0.000017	0.282225	-19.1	-15.9	1.50	2.21	-0.93
5	155	0.078520	0.000303	0.002954	0.000014	0.282333	0.000028	0.282325	-15.5	-12.4	1.37	1.99	-0.91
6	157	0.054607	0.001278	0.001977	0.000038	0.282155	0.000014	0.282149	-21.8	-18.6	1.59	2.38	-0.94
7	156	0.036282	0.000437	0.001289	0.000014	0.282230	0.000013	0.282226	-19.2	-15.9	1.45	2.21	-0.96
8	157	0.062646	0.000488	0.002021	0.000025	0.282242	0.000015	0.282236	-18.7	-15.5	1.46	2.19	-0.94
9	157	0.044320	0.000367	0.001736	0.000027	0.282230	0.000015	0.282225	-19.2	-15.9	1.47	2.21	-0.95
10	156	0.036962	0.000395	0.001360	0.000025	0.282257	0.000010	0.282254	-18.2	-14.9	1.42	2.15	-0.96
12	157	0.078061	0.000568	0.002501	0.000010	0.282241	0.000012	0.282233	-18.8	-15.6	1.49	2.20	-0.92
13	153	0.031049	0.000690	0.001265	0.000030	0.282279	0.000013	0.282275	-17.4	-14.2	1.38	2.11	-0.96
14	157	0.030983	0.000416	0.001076	0.000009	0.282273	0.000010	0.282270	-17.7	-14.3	1.38	2.12	-0.97
15	157	0.031737	0.000465	0.001194	0.000012	0.282251	0.000010	0.282247	-18.4	-15.1	1.42	2.16	-0.96
16	157	0.073075	0.000674	0.001772	0.000009	0.281919	0.000011	0.281913	-30.2	-26.9	1.91	2.91	-0.95
17	157	0.067227	0.000694	0.001979	0.000007	0.282185	0.000015	0.282179	-20.8	-17.5	1.54	2.32	-0.94
18	156	0.051614	0.000543	0.001647	0.000028	0.282031	0.000017	0.282026	-26.2	-23.0	1.75	2.66	-0.95
19	157	0.042217	0.000588	0.001820	0.000032	0.282260	0.000015	0.282255	-18.1	-14.8	1.43	2.15	-0.95
20	157	0.030385	0.000191	0.001098	0.000007	0.282233	0.000008	0.282229	-19.1	-15.8	1.44	2.21	-0.97

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10000$; $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}] \}$; $T_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM2}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM2}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}] \}$; t : s=sample, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}} = 0.28325$, t : 锆石结晶年龄, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{c}} = 0.015$ 。

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 -18.2~-8.3, 单阶段模式年龄 $t_{\text{DM1}}=1.53\sim 1.13$ Ga, 两阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}=2.36\sim 1.73$ Ga, 其中 SBG-01/2B 18 点 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较低, 为 -22.6, 对应两阶段模式年龄为 2.64 Ga。由两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 直方图 (图 7-a,b) 可以看出, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体在 -16~-13 范围内, t_{DM2} 主体在 2.2~2.0 Ga 范围内。

对中细粒二长花岗岩样品 SBG-06/1B 共进行了 19 个点的 Hf 同位素分析, 结果表明, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281919~0.282333, 由对应的测点年龄计算得到初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281913~0.282325, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-26.9\sim -12.4$, 单阶段模式年龄 $t_{\text{DM1}}=1.91\sim 1.37$ Ga, 两阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}=2.91\sim 1.99$ Ga, 其中测点 SBG-06/1B 16 和 18 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 较低, 分别为 -26.9 和 -23.0。根据两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 直方图 (图 7-c,d), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体在 -16~-14 范围内, t_{DM2} 主体在 2.3~2.1 Ga 范围内。

5 讨论

5.1 岩体形成时代

本文获得的石宝沟花岗岩体似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(156\pm 1)\text{Ma}$ 和 $(157\pm 1)\text{Ma}$, 两者在误差范围内基本一致。杨荣勇等^[9]所获得的该岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(142.7\pm 5.0)\text{Ma}$, 相比年轻的原因可能是 Rb-Sr 系统被重置的结果。包志伟等^[20]曾提及该岩体中粗粒黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(147.2\pm 1.7)\text{Ma}$, 但并没有发表具体的年龄数据。同时本文的测年结果与野外观察相符合, 例如发现在岩体中具有似斑状二长花岗岩侵入中细粒二长花岗岩的现象, 两者界线不清晰, 指示似斑状二长花岗岩与中细粒二长花岗岩形成时代接近, 且前者形成较晚。

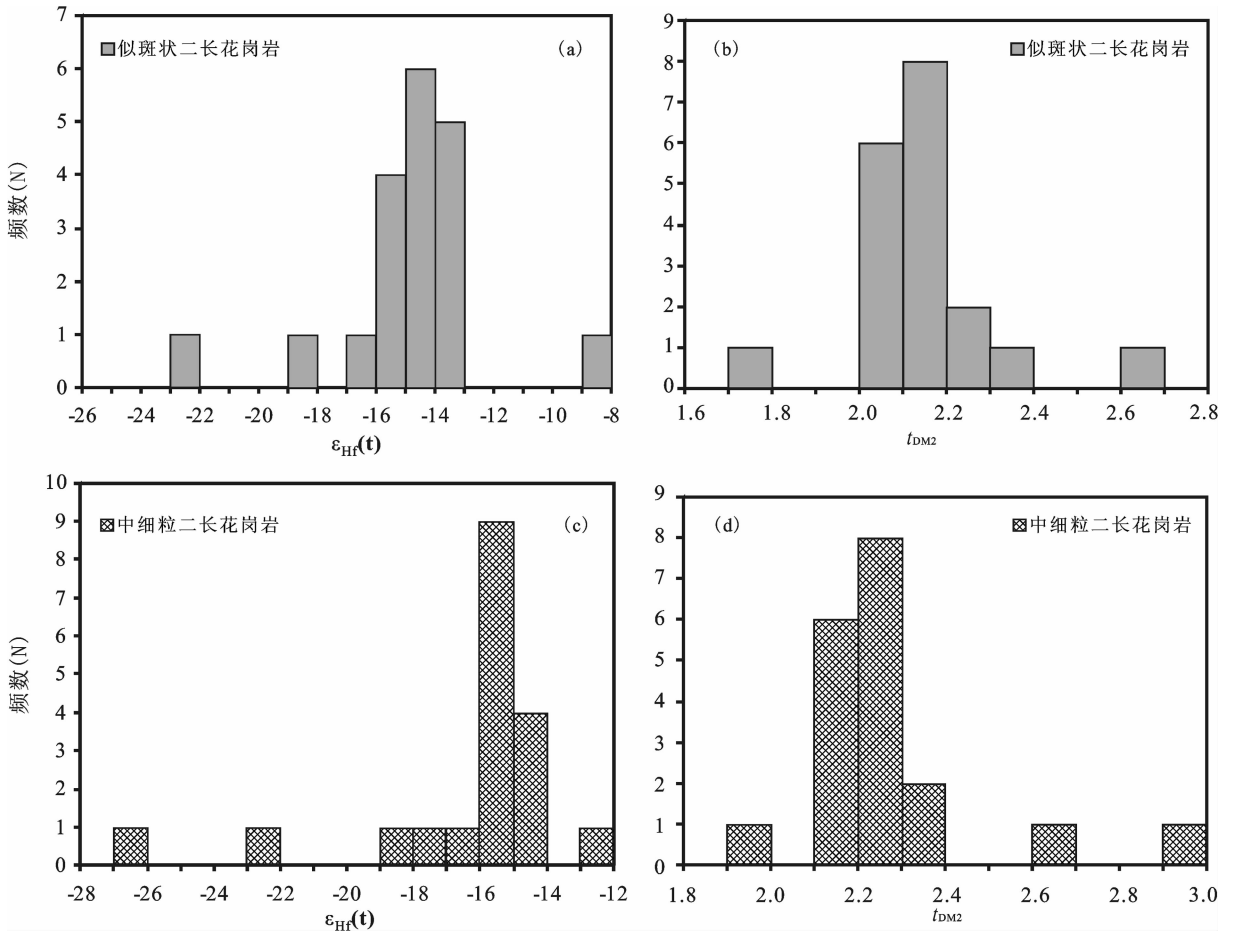


图 7 石宝沟花岗岩体锆石地壳模式年龄 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 t_{DM2} 柱状图

Fig.7 Zircon t_{DM2} and Hf isotopic compositions of granites from Shibaogou granitoid pluton

近年来,大量的锆石 U-Pb 测年数据显示,东秦岭地区晚中生代的岩浆岩年龄主要集中在 160~110 Ma [5,50-51]。王晓霞等^[5]的研究表明,秦岭晚中生代花岗岩的岩浆演化可分为两个阶段:第一阶段为晚侏罗世—早白垩世(160~130 Ma),该期花岗岩是秦岭晚中生代花岗岩的主体,主要分布在华北陆块南缘,发育有华山、老牛山、蓝田、合峪、花山等岩体,小的岩体多为花岗斑岩和钾长花岗斑岩,如金堆城、石家湾、黄龙铺、南泥湖、上房沟、雷门沟等岩体;第二阶段为早白垩世中晚期花岗岩(120~100 Ma),在华北陆块南缘东部发育有太山庙、伏牛山等大岩体和东沟、毛沟和张士英等小岩体。另外,目前东秦岭地区已积累众多与钼等多金属矿床成矿有关的中酸性侵入体的同位素年龄数据,越来越清晰地给出了东秦岭地区钼矿成矿和相关中酸性侵入体的成岩时代^[4,52-59]。对比该区域内其他岩体的形成时代,如南泥湖斑岩体的 SHRIMP 锆石年龄为 (158.2±3.1)Ma,上房沟斑岩体的 SHRIMP 锆石年龄为 (157.6±2.7)Ma^[60],可见石宝沟花岗岩体与南泥湖、上房沟等岩体属于同时代的花岗岩,均为晚侏罗世侵入体,属于晚中生代第二阶段岩浆作用。

5.2 岩石成因类型

石宝沟花岗岩体主要岩石类型为似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩,岩石中暗色矿物以黑云母为主,副矿物为磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿。SiO₂ 含量较高,为 70.48%~73.00%; Na₂O 含量为 3.49%~4.45%, K₂O/Na₂O 较低,为 1.02~1.48,平均为 1.11; CaO 含量较高,为 1.41%~2.63%; 铝饱和指数 A/

CNK=0.82~1.02(小于 1.1)。稀土元素球粒陨石标准化分配曲线为右倾平滑型,轻重稀土分馏明显,具微弱的负铕异常或正铕异常, $\delta \text{Eu}=0.81\sim 1.12$,平均为 0.90,无铈异常。在 SiO₂-Ce 判别图解(图 8-a)和 Zr-TiO₂ 判别图解(图 8-b)中投点均落在 I 型花岗岩区域内。以上特征均显示,石宝沟花岗岩属 I 型花岗岩。

5.3 成岩物质来源

石宝沟花岗岩质岩石的原始地幔标准化微量元素蛛网图显示,该岩体相对富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Sr 等),而亏损高场强元素(HREE、P、Nb、Ta 等),稀土元素球粒陨石标准化分配曲线表现为轻稀土富集的右倾型,这些特征表明石宝沟花岗岩体的物源以壳源物质为主。

前人研究表明,石宝沟花岗岩体 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值为 0.7093,高于地幔分熔体的 I_{sr} 值(0.704±),而局限于太华群的 I_{sr} 值(0.706~0.713)变化范围之内^[61],全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 7.65‰~8.00‰^[6],落在了太华群岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ (7.23‰~11.11‰)范围之内^[62]。前人对南泥湖和上房沟岩体的 Sr、O 同位素的研究显示,南泥湖岩体各岩相的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值为 0.70686±0.0020,全岩氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 8.9‰~11.08‰;上房沟岩体的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值为 0.70871±0.0066,全岩氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 7.2‰~9.6‰^[42],可见石宝沟花岗岩体与南泥湖和上房沟岩体具有相似的源区,均是以古老地壳物质为主,如太古宙太华群。

石宝沟花岗岩的 $\varepsilon_{\text{HF}}(t)$ 主要集中于-16~-13,个

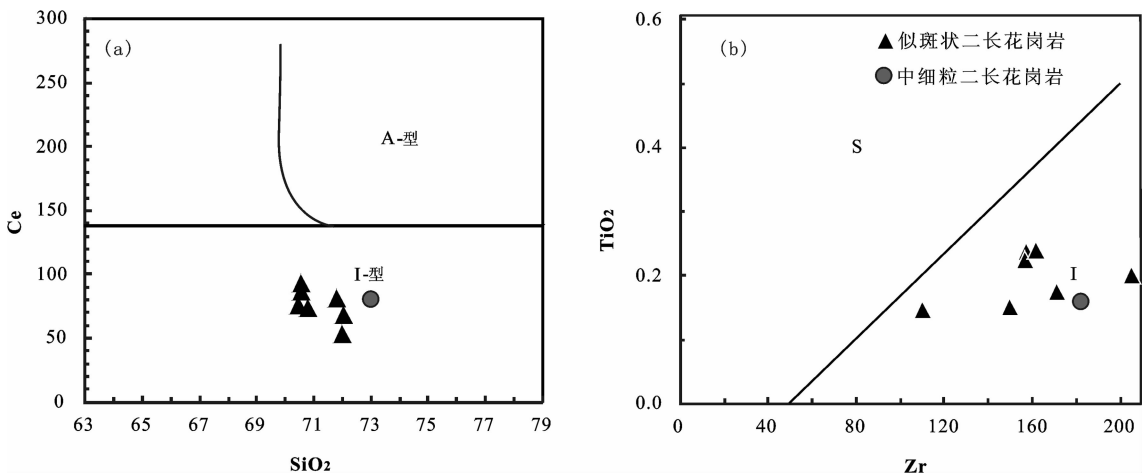


图 8 石宝沟花岗岩体 A-型与 I-型花岗岩 Ce-SiO₂(a) 和 TiO₂-Zr 判别图(b)

Fig. 8 Ce-SiO₂ (a) and TiO₂-Zr (b) diagrams for Shibaogou granitoid pluton

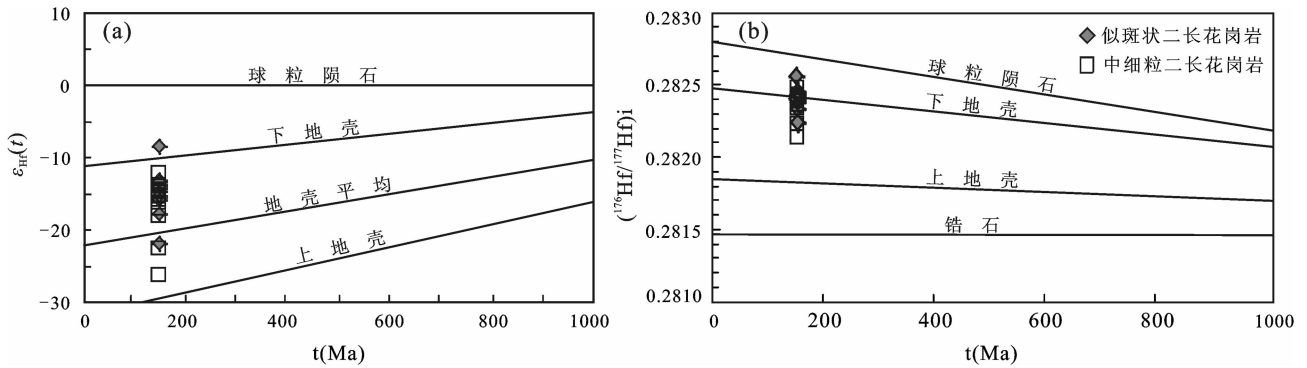


图 9 石宝沟花岗岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (a)和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i-t$ (b)图解
 Fig. 9 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (a) and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i-t$ (b) for Shibaogou granitoid pluton

别点(SBG01/2B-18,SBG06/1B-16,18)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较低,小于-22。在 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图 9-a)和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 图解(图 9-b)中,石宝沟花岗岩样品投点大部分落在了上、下地壳演化曲线之间,这也显示石宝沟花岗岩的源区物质是以古老的壳源物质为主。根据前人对华北陆块南缘的结晶基底太华群进行的锆石 U-Pb 和 Ar-Ar 年代学研究,可知太华群原岩的形成时间为 2.7 Ga 左右,在 2.2~2.3 Ga 发生变质^[63-64],这与石宝沟花岗岩体中大部分锆石二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM2}}=2.0\sim 2.3$ Ga)基本一致,少量小于 2.0 Ga。因此,太华群作为石宝沟花岗岩体的源岩可能性很大。而将太华群 Hf 同位素^[65]按 $t=156$ Ma (石宝沟花岗岩体成岩年龄)计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -50.2~-47.9,远小于石宝沟花岗岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-16~-13),说明太华群不可能单独作为该花岗岩体的物源,应该还有其他物质的参与。值得注意的是,石宝沟花岗岩体中出现少量 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较大的锆石(如 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-8.3$),暗示源区可能有年轻组分的参与。此外,在石宝沟花岗岩体的似斑状二长花岗岩中普遍发育岩浆暗色包体(黑云角闪石英闪长岩),其与寄主花岗岩具有相似的稀土元素配分形式和微量元素蛛网图,但包体的稀土元素总量高,Ti 和 P 的亏损不明显,Cr、Ni 明显比寄主花岗岩高,显示出非壳源的一些特征。目前的研究结果显示,花岗质岩石中的岩浆暗色包体主要与幔源组分有关,是岩浆混合的标志^[66-67],因此,石宝沟花岗岩体中的岩浆暗色包体也支持其在形成过程中有年轻地幔组分参与,同时也表明在岩体的形成过程中有岩浆混合作用的存在。

综上所述,石宝沟花岗岩体是古老的地壳物质

(成分上可能相当于太古宙太华群)部分熔融形成的长英质岩浆与可能起源于幔源的基性岩浆(以岩浆暗色包体为代表)混合而成,但以壳源岩浆为主。

6 结论

(1)石宝沟花岗岩主要由似斑状二长花岗岩和中细粒二长花岗岩组成,LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (156 ± 1) Ma 和 (157 ± 1) Ma,表明石宝沟花岗岩体形成于晚侏罗世。

(2)石宝沟花岗岩在地球化学上具有高硅(70.48%~73.00%)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.61\%\sim 8.91\%$)和轻稀土及大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Sr),亏损重稀土和高场强元素(HREE、P、Nb、Ta),铝饱和指数 $A/\text{CNK}=0.82\sim 1.02$,显示其为准铝质-弱过铝质高钾钙碱性系列 I 型花岗岩。

(3)石宝沟花岗岩的 Hf 同位素组成变化范围较大, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要在 -16~-13 范围内, t_{DM2} 主体 2.3~2.0 Ga 范围内,表明岩体主要由古老下地壳部分熔融形成,源区物质在成分上可能相当于太古宙太华群,岩体个别较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及岩浆暗色包体的存在,表明石宝沟花岗岩体物源并不单一,有年轻幔源组分的参与。

致谢:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室在锆石年龄测试、数据分析以及中国地质大学(北京)地质实验中心在地球化学分析中都给予了大力帮助,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献(Reference):

[1] 安三元, 卢欣祥. 东秦岭中生代斑岩组合的地质特征及成矿关系

- [C]//徐克勤,涂光焯编.花岗岩地质与成矿.南京:江苏科学技术出版社,1984:398-405.
- An Sanyuan, Lu Xinxiang. Characteristics of the Mesozoic porphyry association in the east Qinling and its mineralization[C]//Xu Keqin, Tu Guangchi (eds.). Granitoids and Mineralization. Nanjing: Science and Technology Publishing House, 1984:398-405(in Chinese).
- [2] 卢欣祥.东秦岭花岗岩 [C]//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.
- Lu Xinxiang. Granites in the east Qinling [C]//The Discussion on the Qinling Orogen. Xi'an: Northwest University Press, 1991: 250-260 (in Chinese with English abstract).
- [3] 卢欣祥.秦岭花岗岩大地构造图[M].西安:地图出版社,1999.
- Lu Xinxiang. Tectonic Map of Qinling Granite [M]. Xi'an: Cartographic Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [4] Mao Jinwen, Xie Guiqing, Pirajno F, et al. Late Jurassic-Early cretaceous granitoid magmatism in eastern Qinling, central-eastern China; SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2010, 57: 51-78.
- [5] 王晓霞,王涛,齐秋菊,等.秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J].岩石学报,2011,27(6):1573-1593.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the late Mesozoic granites in the Qinling, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1573-1593(in Chinese with English abstract).
- [6] 杨荣勇,徐兆文,任启江.东秦岭地区石宝沟和火神庙岩体的时代及岩浆物质来源[J].矿物岩石地球化学通报,1997,16(1):15-18.
- Yang Rongyong, Xu Zhaowen, Ren Qijiang. Ages and magma sources of Shibaogou and Huoshenmiao complexes in east Qinling [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16 (1):15-18 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张正伟,朱炳泉,常向阳,等.东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性[J].高校地质学报,2001,7(3):307-315.
- Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Petrogenetic-metallogenetic background and time-space relationship of the east Qinling molybdenum ore belt, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7 (3):307-315 (in Chinese with English abstract).
- [8] 卢欣祥,于在平,冯有利,等.东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J].矿床地质,2002,21(2):168-178.
- Lu Xinxiang, Yu Zaiping, Feng Youli, et al. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in east Qinling mountain [J]. Mineral Deposits, 2002, 21 (2):168-178 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王义天,叶会寿,叶安旺,等.小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义 [J]. 地质科学, 2010, 45 (1):167-180.
- Wang Yitian, Ye Huishou, Ye Wang'an, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages and their significances of the Wenyu and Niangniangshan granitic plutons in the Xiaoqinling area, central China [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45 (1):167-180(in Chinese with English abstract).
- [10] 张照伟,李文渊,赵东宏,等.东秦岭莲花沟岩体锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J].地球化学,2010,39(1):90-99.
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Zhao Donghong, et al. Zircon U-Pb dating of Lianhuagou pluton in east Qinling and its geological implications [J]. Geochimica, 2010, 39(1):90-99 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘长命,卢欣祥,张正伟.东秦岭花岗岩类稀土元素的地球化学特征[J].河南地质,1989,7(2):32-39.
- Liu Changming, Lu Xinxiang, Zhang Zhengwei. Geochemical features of rare elements for granites, east Qinling [J]. Henan Geology, 1989, 7(2):32-39(in Chinese).
- [12] 刘孝善,孙晓明.金堆城钼矿成矿流体包裹体及稳定同位素研究[J].地质与勘探,1989,25(2):12-19.
- Liu Xiaoshan, Sun Xiaoming. Ore-forming fluid inclusions and stable isotopes of Jinduicheng porphyry molybdenum deposit [J]. Geology and Exploration, 1989, 25 (2):12-19 (in Chinese with English abstract).
- [13] 聂凤军,樊建庭.陕西金堆城-黄龙铺地区含钼花岗岩类稀土元素地球化学研究[J].岩石矿物学杂志,1989,8(1):24-33.
- Nie Fengjun, Fan Jianting. A study on REE geochemistry of the molybdenum-bearing granitoids in the Jinduicheng-Huanglongpu area, Shaanxi [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1989, 8(1):24-33 (in Chinese with English abstract).
- [14] 罗铭玖,林潜龙,卢欣祥,等.东秦岭含钼花岗岩的地质特征[J].河南地质,1993,11(1):2-8.
- Luo Mingjiu, Lin Qianlong, Lu Xinxiang, et al. Geological features of molybdenum contained in east Qinling [J]. Henan Geology, 1993, 11(1):2-8(in Chinese).
- [15] 李永峰,毛景文,白凤军,等.东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J].地质论评,2004,49(6):652-659.
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Bai Fengjun, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Nannihu molybdenum (tungsten) orefield in the eastern Qinling and its geological significance [J]. Geological Review, 2004, 49(6):652-659(in Chinese with English abstract).
- [16] 李永峰,王春秋,白凤军,等.东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J].矿产与地质,2004,18(6):571-578.
- Li Yongfeng, Wang Chunqiu, Bai Fengjun, et al. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in east Qinling and their geodynamic settings [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18 (6): 571-578 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李永峰,毛景文,胡华斌,等.东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J].矿床地质,2005,24(3):292-304.
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Hu Huabin, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of mesozoic molybdenum deposits in east Qinling area [J]. Mineral Deposits, 2005, 24 (3): 292-304(in Chinese with English abstract).
- [18] 李厚民,陈毓川,叶会寿,等.东秦岭-大别地区中生代与岩浆活

- 动有关钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J].地质学报, 2008, 82(11): 1468-1477.
- Li Houmin, Chen Yuchuang, Ye Huishou, et al. Mo-(W)-Au-Ag-Pb-Zn mineralogical series related to mesozoic magmatic activities in the east Qinling-Dabie mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(11):1468-1477(in Chinese with English abstract).
- [19] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J].地质学报, 2008, 82(2):204-220.
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, et al. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenic geodynamical setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2):204-220(in Chinese with English abstract).
- [20] 包志伟, 李创举, 祁进平. 东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及成矿时代 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2951-2956.
- Bao Zhiwei, Li Chuangju, Qi Jinping. SHRIMP zircon U-Pb age of the gabbro dyke in the Luanchuan Pb-Zn-Ag orefield, east Qinling orogen and its constraint on mineralization time [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (11): 2951-2956 in Chinese with English abstract).
- [21] 郭波, 朱赖民, 李森, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床同位素及元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(3):265-281.
- Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, et al. Isotopic and element geochemical study of Jinduicheng superlarge porphyry Mo deposit in East Qinling area[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 265-281 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杜保峰, 魏俊浩, 王启, 等. 中国东部钼矿成矿背景与成岩-成矿时差讨论[J]. 矿床地质, 2010, 29(6):935-955.
- Du Baofeng, Wei Junhao, Wang Qi, et al. Discussion on metallogenic setting and time difference between magmatism and mineralization of molybdenum deposits in east China [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(6): 935-955(in Chinese with English abstract).
- [23] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东秦岭金堆城花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2010, 35(6):1011-1022.
- Jiao Jiangang, Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, et al. Metallogenic mechanism, magma source and zircon U-Pb age of Jinduicheng granitic porphyry, East Qinling [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35 (6):1011-1022 (in Chinese with English abstract).
- [24] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约 [J]. 矿床地质, 2010, 29(1):143-157.
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, et al. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shaanxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions [J]. Mineral Deposits, 2010, 29 (1):143-157 (in Chinese with English abstract).
- [25] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西黄龙铺地区碱性花岗岩斑岩及辉绿岩的年代学与地球化学: 岩石成因及其构造环境示踪 [J]. 中国地质, 2010, 37(1):12-27.
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, et al. Geochronology and geochemistry of the alkaline granite porphyry and diabase dikes in Huanglongpu area of Shaanxi Province: Petrogenesis and implications for tectonic environment [J]. Geology in China, 2010, 37(1):12-27(in Chinese with English abstract).
- [26] 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 等. 北秦岭马河钼矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2011, 28(1):267-278.
- Ke Changhui, Wang Xiaoxia, Li Jinbao, et al. Geochronology and geological significance of the granites from the Mahe Mo deposit in the north Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 28(1):267-278 (in Chinese with English abstract).
- [27] 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据 [J]. 岩石学报, 2012, 28(1):279-301
- Qi Qiuju, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, et al. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of north China block and their implications: new evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1):279-301 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王长明, 邓军, 张寿庭, 等. 河南南泥湖 Mo-W-Cu-Pb-Zn-Ag-Au 成矿区内生矿系统 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(6):47-52.
- Wang Changming, Deng Jun, Zhang Shouting, et al. Endogenic metallogenic systems of Nannihu Mo-W-Cu-Pb-Zn-Ag-Au ore-forming area [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(6):47-52(in Chinese with English abstract).
- [29] 张云政, 翁纪昌, 云辉. 竹园沟钼矿床地质特征及找矿远景分析 [J]. 中国地质, 2009, 36(1):166-173.
- Zhang Yunzheng, Weng Jichang, Yun Hui. Geological characteristics and ore-searching prospects of the Zhuyuangou tungsten-molybdenum ore deposit [J]. Geology in China, 2009, 36 (1):166-173(in Chinese with English abstract).
- [30] 张云政, 郑松森, 陈雷, 等. 豫西满子沟钼矿床地质特征及岩体的控矿作用分析 [J]. 河南地球科学通报, 2010, 上册:74-78.
- Zhang Yunzheng, Zheng Songsen, Chen Lei, et al. The geological features of Manzigou molybdenum deposit in western Henan and the analysis of rock's ore-controlling [J]. Acta Geological Sinica of Henan, 2010:74-78(in Chinese with English abstract).
- [31] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 豫西南泥湖矿田钼钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨 [J]. 现代地质, 2006, 20(1):165-174.
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, et al. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, Western Henan Province [J]. Geoscience, 2006, 20(1):165-174(in Chinese with English abstract).
- [32] 刘永春, 付治国, 高飞, 等. 河南栾川南泥湖特大型钼矿床成矿

- 母岩地质特征研究[J]. 中国铝业, 2006, 30(3):13-17.
- Liu Yongchun, Fu Zhiguo, Gao Fei, et al. Geological character research of ore-forming mother rock of Nannihu oversize molybdenum ore deposit of Luanchuan in Henan [J]. China Molybdenum Industry, 2006, 30(3):13-17(in Chinese with English abstract).
- [33] 瓮纪昌, 高胜淮, 石聪, 等. 栾川上房沟特大型钼矿床蚀变分带规律研究[J]. 中国铝业, 2008, 32(3):16-24.
- Weng Jichang, Gao Shenghuai, Shi Cong, et al. Study on the alteration zoning law of Shangfanggou Huge-size molybdenum ore deposit [J]. China Molybdenum Industry, 2008, 32 (3):16-24(in Chinese with English abstract).
- [34] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:1-729.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-729(in Chinese with English abstract).
- [35] Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2008, 23:1093-1101.
- [36] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [37] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen; U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2):537-571.
- [38] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010b, 55(15):1535-1546.
- [39] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10):2595-2604.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICPMS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(10):2595-2604(in Chinese with English abstract).
- [40] Elhoul S, Belousova E, Griffin WL, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2006, suppl, A158.
- [41] Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS [J]. Chemical Geology, 2008, 247: 100-118.
- [42] Peccerillo R and Taylor SR. Geochemistry of Eocene calalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1976, 58:63-81.
- [43] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides major and minor elements [J]. Lithos, 1989, 22:247-263.
- [44] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition process [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42:313-345.
- [45] 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988, 256-285.
- Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Zeming, et al. The Geology and Metallogeny of the Amalgamation zone between ancient North China plate and South China plate (Take Qinling-Tongbai as an example)[M]. Nanjing: Nanjing University Publishing House, 1988, 256-285 (in Chinese).
- [46] Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1981, 78:279-297.
- [47] Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, et al. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: a record of repeated crustal reworking[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2001, 141:83-94.
- [48] Kinny P D, Mass R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [C]//Hanchar J M, Hoskin P W O. Zircon. Rev. Mineral. Geochem., 2003, 53:327-341.
- [49] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2):185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2):185-220(in Chinese with English abstract).
- [50] 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 深部流体成矿系统[M]. 北京: 中国大地出版社, 2005:1-365.
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Ronghua, et al. Mantle-Derived Fluid-Related Ore-Forming System [M]. Beijing: China Land Press, 2005:1-365(in Chinese).
- [51] 向君峰, 赵海杰, 李永峰, 等. 华北地台南缘张士英岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2010, 26(3):871-887.
- Xiang Junfeng, Zhao Haijie, Li Yongfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Zhangshiying intrusive complex in the southern margin of the North China Craton and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 6(3): 871-887 (in Chinese with English abstract).
- [52] 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4):417-424.
- Li Houmin, Ye Huishou, Mao Jingwen, et al. Re-Os dating of molybdenites from Au (-Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2007, 26 (4): 417-424 (in Chinese with English abstract).
- [53] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do

- not report 204Pb[J]. Chem. Geol., 2002, 192(1/2):59-79.
- [54] 徐兆文, 陆现彩, 杨荣勇, 等. 河南省栾川县上房斑岩钼矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 2000, 36(1):14-16.
Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Yang Rongyong, et al. Geochemistry and metallogenesis of the Shangfang porphyry molybdenum deposit in Luanchuan, Henan[J]. Geology and Prospect, 2000, 36(1):14-16 (in Chinese with English abstract).
- [55] Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1994, 14(4):313-322.
- [56] 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 等. 东秦岭造山带花岗岩类长石铅同位素组成及其构造学意义[J]. 地质学报, 1997, 71(2):142-149.
Zhang Hongfei, Zhang Benren, Zhao Zhidan, et al. Feldspar lead isotopic compositions of granitoids from the eastern Qinling orogenic belt and their tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(2):142-149(in Chinese with English abstract).
- [57] 张正伟, 翟裕生, 邓军, 等. 华北古大陆南缘的金属成矿作用[J]. 地球学报, 2001, 22(2):129-134.
Zhang Zhengwei, Zhai Yusheng, Deng Jun, et al. Metallogenic process in the southern margin of north China paleocontinent[J]. Acta Geosci. Sinica, 2001, 22(2):129-134(in Chinese with English abstract).
- [58] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(7):1078-1088.
Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication [J]. Acta Geologic Sinica, 2006, 80 (7):1078-1088 (in Chinese with English abstract).
- [59] 李诺, 陈衍景, 张辉, 等. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J]. 地学前缘, 2007, 14(5):186-198.
Li Nuo, Chen Yanjing, Zhang Hui, et al. Molybdenum deposit in East Qinling [J]. Earth Science Front, 2007, 14 (5):186-198 (in Chinese with English abstract).
- [60] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):169-188.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- [61] 胡志宏, 胡受奚. 挤压-俯冲作用与增生花岗岩带 [M]. 北京:地质出版社, 1993:44-69.
Hu Zhihong, Hu Shouxi. Compression-Subductions and Twin Granite Belts[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:44-69 (in Chinese with English abstract).
- [62] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircon [J]. Nature, 1999, 399:252-255.
- [63] 倪志耀, 王仁民, 童英, 等. 河南洛宁太华岩群斜长角闪岩的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J]. 地质评论, 2003, 19(4): 361-366.
Ni Zhiyao, Wang Renmin, Tong Ying, et al. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ of amphibole from plagioclase amphibolite in the Taihua Group, Luoning, Henan, China[J]. Geological Review, 2003,19(4):361-366(in Chinese with English abstract).
- [64] Diwu C R, Sun Yong, Lin Ciluan, et al. LA-(MC)-ICPMS U-Pb Zircon geochronology and Lu-Hf isotope composition of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(23):2557-2571.
- [65] 时毓, 于津海, 徐夕生, 等. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2011, 27(10):3095-3108.
Shi Yu, Yu Jinhai, Xu Xisheng, et al. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircon of Taihua Group in Xiaqingling area, Shaanxi Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (10):3095-3108 (in Chinese with English abstract).
- [66] 莫宣学, 罗照华, 肖庆辉, 等. 花岗岩岩类岩石中岩浆混合作用的认识与研究方法[C]//肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社, 2002, 55-63.
Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Xiao Qinghui, et al. Cognition of magma hybrid in granites and its research methods [C]//Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House, 2001, 55-63 (in Chinese).
- [67] 周若. 花岗岩混合作用[J]. 地学前缘, 1994, 1(1/2):87-97.
Zhou Ruo. Granite hybridization[J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(1/2):87-97(in Chinese with English abstract).

Zircon U–Pb age, geochemistry and Hf isotopic compositions of Shibaogou granitoid pluton in the Nannihu ore district, western Henan Province

YANG Yang¹, WANG Xiao-xia², KE Chang-hui², LI Jin-bao³

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 3. *College of Earth Sciences and State Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China*)

Abstract: The Shibaogou granitoid pluton, consisting of porphyritic monzogranite and middle-fine-grained monzogranite as well as mafic magma enclaves, is located in the southern margin of the North China Craton. The zircon LA-ICPMS dating of the porphyritic monzogranite and mid-fine-grained monzogranite from this pluton yielded ages of 156 ± 1 Ma (MSWD=0.34, N=15) and 157 ± 1 Ma (MSWD=0.10, N=17), respectively. The rocks are of high K calc-alkaline series and belong to metaluminous to weak peraluminous I-type granite with A/CNK being 0.82~1.02, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 7.61%~8.91% and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 1.02~1.48. Their REE and trace elements are enriched in large ion lithophile elements (LREE, Rb, Ba, K and Pb), and depleted in high-field strength elements (HREE, P and Ti), with slightly negative to positive anomalies of Eu ($\delta \text{Eu} = 0.81 \sim 1.12$). Zircon Hf isotopic compositions of the porphyritic monzogranite and middle-fine-grained monzogranite are mainly characterized by $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $-22.6 \sim -8.3$ and $-26.9 \sim -12.4$, and the two-stage model ages of 2.64 to 1.73 Ga and 2.91 to 1.99 Ga, respectively. Geochemistry and zircon Hf isotopic compositions show that they were derived from an ancient continental crust (probably Archean Taihua Group), with the addition of juvenile components.

Key words: Late Mesozoic granite in Qinling; zircon U–Pb age; zircon Hf isotope; genesis of rocks

About the first author: YANG Yang, female, born in 1988, master candidate, majors in the study of mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: yangm0926@163.com.

About the corresponding author: WANG Xiao-xia, doctor, senior researcher, engages in the study of mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com.