



# 河北平泉下金宝花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、 Hf 同位素特征及其地质意义

张建国<sup>1,2,3</sup>, 邵拥军<sup>1,2</sup>, 刘忠法<sup>1,2</sup>, 汪程<sup>1,2</sup>, 邹艳红<sup>1,2</sup>, 李宏斌<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

**摘要:** 下金宝岩体位于永安一下营坊—毛家沟构造岩浆岩活动带上, 与本区金、银、铜等多金属成矿关系密切。对下金宝含矿花岗斑岩的锆石进行 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学和微量元素地球化学研究, 岩体锆石 U-Pb 年代学表明, 锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(158.0 \pm 2.5) \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ , MSWD 为 0.76,  $n=16$ ), 表明该岩体形成于燕山早期。锆石 Ti 温度计计算结果显示, 下金宝岩体中锆石的结晶温度除一个测点小于  $700^\circ\text{C}$  外, 其余测点温度均大于  $700^\circ\text{C}$ , 表明锆石结晶于形成深度较深、温度较高的岩浆。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-10.913 \sim -7.5828$ , 均为负值, Hf 同位素特征表明, 下金宝岩体主要起源于下地壳岩石的部分熔融, 形成于由挤压向伸展转换的大地构造环境中。其动力学机制如下: 燕山早期华北地块发生岩浆底侵作用, 下地壳岩石重熔, 并伴有部分地幔物质的参与, 形成深部岩浆房, 在深部压力作用下, 原始岩浆沿深断裂上升, 岩浆在演化过程中发生结晶分异作用, 导致岩浆出溶流体, 形成富水的岩浆热液, 在近地表伴随温度和压力的降低, 岩浆冷凝形成本区含矿斑岩体。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年代学; 锆石 Hf 同位素; 成岩过程; 成岩动力学; 下金宝岩体

**中图分类号:** P588.13; P597.3

**文献标志码:** A

下金宝矿床位于华北地台北缘多金属成矿集中区内, 处于华北地台北缘弧形断裂带与北北东向断裂带交汇部位。华北地台北缘金矿床(点)星罗密布, 作为我国金的重要产地, 前人在成矿作用<sup>[1-3]</sup>、构造特征<sup>[4]</sup>、成矿规律<sup>[5]</sup>等方面做了大量研究工作, 积累了丰富的资料, 认为中生代以来的构造-岩浆活动与本区金的成矿作用有密切的联系。尽管在大区域上积累丰富的资料, 但对下金宝矿床的研究较少, 主要集中于流体包裹体<sup>[6]</sup>、成矿作用<sup>[7]</sup>及矿床成因<sup>[8]</sup>等方面。区内岩浆岩发育, 并且与成矿关系密切, 但前人对岩体研究较少, 关于本区与成矿关系密切的下金宝岩体的成岩年龄、成岩环境以及岩体成因, 目前鲜见有报道。本文作者首次通过单颗粒锆石 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及原位微区 Hf 同位素分析, 对下金宝岩体的物源、形成环境、侵位时代及成岩机制进行探讨, 丰富本区的研究成果, 为本区成岩成矿环境、成岩成矿时代及成矿动力学背景的研究提供新的参考。

## 1 地质概况

下金宝金矿区位于华北地台龙须门中生代次火山岩盆地的东北缘<sup>[6]</sup>, 是永安一下营坊—毛家沟构造岩浆活动带的重要组成部分(见图 1)。矿区出露地层主要有太古界迁西群拉马沟组灰绿色斜长角闪片麻岩; 元古界长城系常州沟组(Chc)、大洪峪组(Chd)和高于庄组(Chg)石英砂岩、泥灰质白云岩、白云质灰岩; 元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)及杨庄组(Jxy)碳酸盐岩。矿区断裂构造、褶皱构造和接触带构造极为发育, 其中, 断裂构造可分为 NE-NNE 向、E-W 向及 S-N 向 3 组, 褶皱构造主要表现为太古界穹窿构造, 层间滑脱带发育, 接触带构造主要发育与岩体与碳酸盐地层接触部位, 以上各类型构造联合控制了本区岩浆活动和矿化的分布。区内岩浆活动强烈, 岩浆岩发育, 其中矿区范围内出露最大的岩体为下金宝花岗斑岩体, 与金、

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41472302); 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室发展基金资助项目(2008)

**收稿日期:** 2015-04-19; **修订日期:** 2015-07-02

**通信作者:** 刘忠法, 讲师, 博士; 电话: 13574886497; E-mail: liuzf61521@csu.edu.cn

银、铜多金属成矿关系密切。下金宝岩体及其与碳酸盐岩的接触带控制了矿体的产状、形态和规模。围绕岩体与矿体,主要发育硅化、绢云母化、钾化、钠化、高岭石化、矽卡岩化、碳酸盐化及黄铁矿化、方铅—闪锌矿化、铜钼矿化等蚀变和矿化,其中硅化、绢云母化与成矿关系最为密切。

## 2 岩体特征

本次研究对象为与成矿关系密切的下金宝花岗斑岩体,该岩体位于矿区西部,主要侵位于太古界—侏罗系地层层位中,呈SE-NW向展布,出露面积约0.35 km<sup>2</sup>。研究样品采集自下金宝新鲜岩体,岩石呈肉红色—浅肉红色,斑状结构,块状构造。矿物成分主要为钾长石、斜长石、石英和黑云母,少量的绢云母和

高岭石,副矿物主要为锆石和磷灰石,斑晶主要为石英、钾长石和少量的斜长石组成,基质由微—细粒钾长石和石英组成。岩石中钾长石含量35%~40%左右(质量分数,下同),斑晶呈半自形—自形板状晶形,可见卡斯巴双晶,环带结构不可见,均发生不同程度的泥化;斜长石含量30%左右,斑晶为半自形板状晶形,发育聚片双晶和卡纳复合双晶,环带结构少见,常发生不同程度的绢云母化和碳酸盐化;石英占25%~30%,呈他形粒状充填于其他矿物颗粒之间,粒径0.2~2 mm;黑云母部分蚀变为钛铁质物质,含量3%左右;其他矿物含量不足2%。

从岩体到围岩蚀变分带依次为岩体—石英钾长石化带—石英绢云母化带—泥化带—矽卡岩化带。金矿体的产出主要与石英绢云母化带密切相关,石英绢云母化带发育部位矿体厚大且品位较高。整体来看,矿化没有超出蚀变带的范畴,矿化带的分布与岩体蚀变带

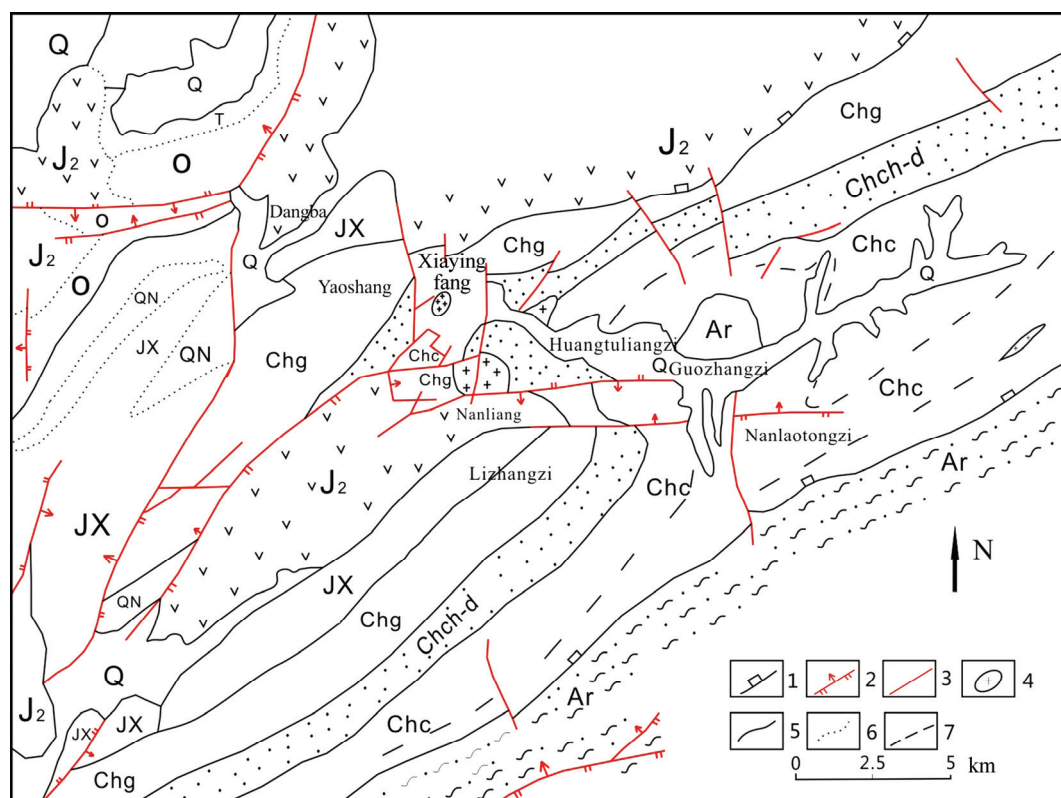


图1 河北平泉下金宝矿区地质简图<sup>[9]</sup>(Q—第四系; J<sub>2</sub>—中侏罗统; J<sub>1</sub>—下侏罗统; T<sub>1</sub>—三叠系; O—奥陶系; QN—青白口系; JX—蓟县系; Chg—长城系高于庄组; Chch-d—长城系串岭组—大洪峪组; Chc—长城系常州沟组; Ar—太古代片麻岩); 1—滑脱构造面; 2—逆断层; 3—实测或推断断层; 4—岩体; 5—地质界限; 6—不整合界限; 7—地层走向线

**Fig. 1** Geological sketch map of Xiajinbao, Hebei province (Q—Quaternary; J<sub>2</sub>—Middle Jurassic; J<sub>1</sub>—Lower Jurassic; T<sub>1</sub>—Lower Triassic; O—Ordovician; QN—Qingbaikou system; JX—Jixian system; Chg—Gaoyuzhuang formation of Changcheng system; Chch-d—Chuanling-Dahong formation of Changcheng system; Chc—Changzhou formation of Changcheng system; Ar—Gneiss of archaean)<sup>[9]</sup>; 1—Detachment structure; 2—Reverse fault; 3—Measured or inferred faults; 4—Rock body; 5—Geological boundary; 6—Unconformity-bounded; 7—Direction of strata lines

的分布基本一致, 矿化与岩体表现出密切的成因联系。

### 3 分析方法

通过样品中锆石的阴极发光图像, 对样品中锆石进行仔细挑选, 选择晶形较好, 呈柱状, 无裂隙, 无包裹体, 振荡环带发育的 16 颗锆石, 其中样品 K6 中 10 颗锆石, 样品 Z176 中 6 颗, 对选择的 16 颗锆石进行 U-Pb 同位素定年和 Hf 同位素的打点测试, Hf 同位素测试点的位置与 U-Pb 同位素定年测试点的位置相同。

本次研究样品中锆石的阴极发光(CL)照相在 JEOL-JXA-8100 型电子探针仪上完成, 工作时加速电压 15 kV, 束电流  $2 \times 10^{-8}$  A, 完成单位为北京铅年领航科技有限公司。

LA-ICP-MS 型锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素测试在中国冶金地质总局山东局测试中心实验室完成。激光剥蚀等离子体质谱仪器型号为 Thermo Xseries 2, 配置 Coherent 公司生产的 COMPexPro CO2F Geolas 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统, 分析过程激光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ , 频率为 8 Hz, 能量密度  $8.5 \text{ J/cm}^2$ , 剥蚀时间 110 s, 其中前 30 s 为空白信号, 中间 55 s 为剥蚀时间, 后 25 s 为吹扫残留信号时间。测试数据采用软件 ICPMSDataCal<sup>[10]</sup>进行处理。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,

采用仪器为激光剥蚀多接收杯等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 (Lambda Physik 公司, 德国), MC-ICP-MS 仪器为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific 公司, 德国)。分析时, 使用氦气作为载气, 采用单点剥蚀模式, 激光波长 193 nm, 激光束直径 44  $\mu\text{m}$ , 激光输出能量可以调节, 实际输出能量密度为  $5.3 \text{ J/cm}^2$ 。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)同样采用软件 ICPMSDataCal<sup>[10]</sup>完成。

### 4 样品的分析结果

#### 4.1 锆石成因及微量元素特征

岩浆锆石一般具有特征的岩浆振荡环带, 振荡环带的宽度可能与锆石结晶时岩浆的温度有关<sup>[11]</sup>。从锆石的阴极发光图像可以看出, 本区锆石均呈自形柱状, 振荡环带和韵律环带发育, 具有内核, 为岩浆结晶的产物(见图 2), 其环带宽度较均匀, 暗示岩浆中锆石结晶时温度变化较均匀。锆石的粒径为 50~350  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 1:1~4:1, 晶面和锥体形态较完好, 没有后期蚀变现象。

前人大量的研究表明, 不同成因的锆石其 Th、U 的含量及其比值不同。岩浆锆石的 Th 和 U 的含量高, Th/U 值变化范围多在 0.1~1.0 之间<sup>[12-13]</sup>, 一般大于 0.5<sup>[12]</sup>; 而变质锆石的 Th、U 的含量低, Th/U 的值一般小于 0.1<sup>[14]</sup>, 多为 0.01 左右<sup>[15]</sup>。由锆石微量元素测试结果(见表 1)可知, 样品 K6 的 10 个测点中, Th 的

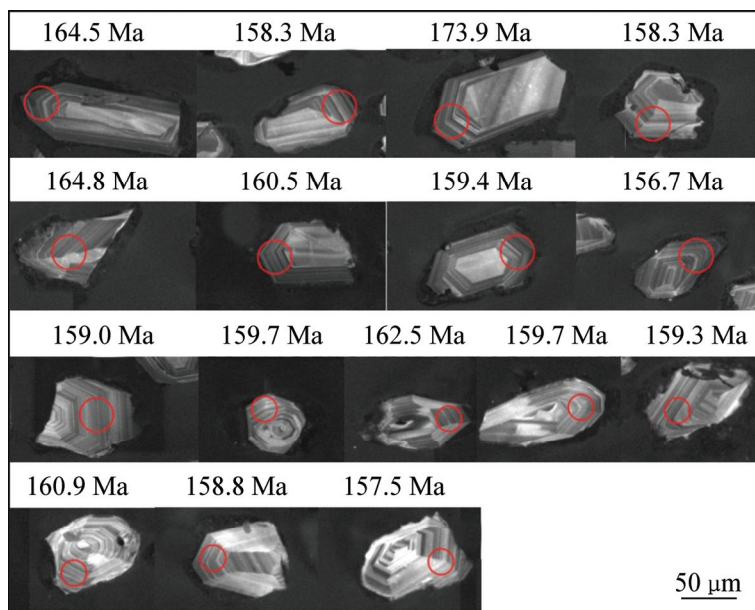


图 2 锆石阴极发光图像及分析点位置、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值

Fig. 2 Cathodoluminescence images, location of U-Pb spot analyses and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of zircon in host granite-porphyry



表 1 下金宝岩体锆石微量元素含量分析结果

Table 1 Results of trace element for single-grain zircon of Xiajinbao rock body

| Sample  | w/10 <sup>-6</sup> |      |      |      |       |      |      |      |      |       |       |        |       |        |       |        |        |       |      |        |        |   |
|---------|--------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|------|--------|--------|---|
|         | No.                | Ti   | Y    | Nb   | La    | Ce   | Pr   | Nd   | Sm   | Eu    | Gd    | Tb     | Dy    | Ho     | Er    | Tm     | Yb     | Lu    | Hf   | Ta     | Th     | U |
| K6-01   | 15.68              | 1332 | 5.71 | 0.06 | 67.53 | 0.10 | 2.20 | 4.63 | 1.38 | 23.74 | 8.04  | 103.31 | 40.92 | 199.70 | 45.77 | 491.22 | 95.79  | 20457 | 1.29 | 170.82 | 273.90 |   |
| K6-02   | 8.22               | 1356 | 6.12 | 0.10 | 64.67 | 0.10 | 1.68 | 4.17 | 1.14 | 22.27 | 8.07  | 101.63 | 41.05 | 202.79 | 47.51 | 520.96 | 101.21 | 22005 | 1.33 | 188.73 | 299.54 |   |
| K6-03   | 13.27              | 956  | 2.92 | 1.21 | 39.69 | 0.40 | 2.69 | 3.29 | 0.85 | 17.62 | 5.67  | 75.17  | 29.28 | 141.96 | 32.82 | 359.45 | 70.24  | 0     | 0.71 | 94.66  | 170.96 |   |
| K6-04   | 9.27               | 1508 | 7.08 | 0.02 | 66.49 | 0.09 | 1.87 | 4.46 | 1.28 | 23.04 | 8.19  | 110.30 | 45.35 | 229.49 | 53.55 | 586.16 | 113.26 | 17118 | 1.63 | 149.98 | 278.76 |   |
| K6-05   | 12.92              | 968  | 2.92 | 0.02 | 33.78 | 0.05 | 1.15 | 2.99 | 0.81 | 15.06 | 5.61  | 72.78  | 28.94 | 146.29 | 33.97 | 377.54 | 74.74  | 17529 | 0.74 | 84.62  | 185.25 |   |
| K6-07   | 17.64              | 1339 | 6.12 | 0.00 | 55.55 | 0.06 | 1.71 | 3.53 | 1.08 | 21.23 | 7.69  | 99.64  | 40.14 | 202.93 | 47.88 | 534.12 | 104.64 | 21111 | 1.38 | 119.77 | 240.60 |   |
| K6-09   | 18.95              | 1500 | 7.48 | 4.03 | 82.89 | 1.10 | 5.99 | 5.21 | 1.36 | 25.51 | 8.51  | 113.74 | 45.84 | 224.30 | 52.68 | 579.40 | 108.39 | 20492 | 1.63 | 201.77 | 336.19 |   |
| K6-10   | 7.88               | 1066 | 4.41 | 1.75 | 57.88 | 0.49 | 3.77 | 3.80 | 1.06 | 19.15 | 6.54  | 82.60  | 32.70 | 158.12 | 36.10 | 403.59 | 74.79  | 22367 | 0.98 | 163.75 | 266.80 |   |
| K6-11   | 19.36              | 1303 | 6.27 | 0.03 | 75.83 | 0.09 | 1.99 | 3.79 | 1.13 | 23.25 | 8.50  | 106.49 | 40.68 | 191.57 | 43.70 | 479.41 | 85.71  | 19363 | 1.57 | 237.68 | 363.60 |   |
| K6-15   | 11.31              | 880  | 3.37 | 0.00 | 51.42 | 0.08 | 1.21 | 2.71 | 0.80 | 16.08 | 5.65  | 71.68  | 27.13 | 132.16 | 30.48 | 331.32 | 60.12  | 13872 | 0.98 | 152.15 | 254.14 |   |
| Z176-16 | 0.00               | 1517 | 3.68 | 3.67 | 62.11 | 1.09 | 7.08 | 6.79 | 1.78 | 29.52 | 10.08 | 122.18 | 47.15 | 221.86 | 50.11 | 535.34 | 99.77  | 19131 | 0.93 | 197.70 | 267.70 |   |
| Z176-17 | 16.08              | 1440 | 6.14 | 0.68 | 63.50 | 0.29 | 2.11 | 4.06 | 1.32 | 23.10 | 8.19  | 105.81 | 43.85 | 216.52 | 52.17 | 564.45 | 110.87 | 18141 | 1.35 | 157.15 | 277.03 |   |
| Z176-18 | 0.00               | 1467 | 4.85 | 0.08 | 61.20 | 0.13 | 2.86 | 5.11 | 1.83 | 29.73 | 9.40  | 115.47 | 44.89 | 217.48 | 50.27 | 546.23 | 105.00 | 10046 | 1.22 | 185.68 | 282.85 |   |
| Z176-19 | 24.79              | 1340 | 5.51 | 3.05 | 68.83 | 0.85 | 5.44 | 4.82 | 1.31 | 24.20 | 8.18  | 103.29 | 40.46 | 199.17 | 46.24 | 504.08 | 95.99  | 24539 | 1.26 | 190.98 | 294.58 |   |
| Z176-29 | 5.43               | 1265 | 4.59 | 0.49 | 48.22 | 0.17 | 2.36 | 4.36 | 1.24 | 21.03 | 7.56  | 95.70  | 38.59 | 188.05 | 45.21 | 494.97 | 93.60  | 17039 | 1.07 | 118.46 | 218.64 |   |
| Z176-32 | 20.88              | 1324 | 5.28 | 1.71 | 59.58 | 0.52 | 3.68 | 4.27 | 1.22 | 21.85 | 7.61  | 101.26 | 39.98 | 197.11 | 46.38 | 505.90 | 95.96  | 21069 | 1.26 | 159.30 | 263.39 |   |

含量为  $84.62\times10^{-6}\sim237.68\times10^{-6}$ ，平均值为  $156.39\times10^{-6}$ 。U 的含量为  $170.96\times10^{-6}\sim363.60\times10^{-6}$ ，平均值为  $266.98\times10^{-6}$ 。其中 Th/U 的值为 0.46~0.65，平均值为 0.58；样品 Z176 的 6 个测点中，Th 的含量为  $118.46\times10^{-6}\sim197.79\times10^{-6}$ ，平均值为  $165.56\times10^{-6}$ 。U 的含量为  $218.64\times10^{-6}\sim294.58\times10^{-6}$ ，平均值为  $264.07\times10^{-6}$ 。其中 Th/U 的值为 0.54~0.74，平均值为 0.62。由此判断，本区岩体锆石为典型的岩浆锆石。本次测试的样品中，测点 K6-07 和 K6-15 中 La 的含量低于仪器的检测线，故不予统计。两个样品中剩余的 14 个测点，其稀土总量 ( $\sum\text{REE}$ ) 为  $780.32\times10^{-6}\sim1258.95\times10^{-6}$ ，平均值为  $1067.90\times10^{-6}$ 。LREE/HREE 的值为 0.05~0.09，平均值为 0.071，轻稀土表现出明显的亏损，重稀土表现出强烈的富集，并且表现出逐步富集的特征，由于 Zr 的离子半径比轻稀土元素离子半径要小，与重稀土元素离子半径相当，因此，锆石中相对富集重稀土，而亏损轻稀土元素。配分曲线与岩浆锆石稀土元素特征基本一致<sup>[16]</sup>。从上述测试分析结果和稀土元素球粒陨石标准化图(见图 3)中可以看出，样品中 Eu 呈负异常，Eu 值在 0.25~0.36 之间，平均值为 0.31，这说明形成下金宝岩体的岩浆在演化过程中经过了斜长石的结晶分离，并且锆石形成于结晶分异后的岩浆<sup>[15, 17]</sup>。Ce 值为 33.78~82.89，平均值为 59.95，在稀土元素球粒陨石标准化图解(见

图 3)中，显示强正异常。由于锆石中  $\text{Ce}^{4+}$  的离子半径更接近于  $\text{Zr}^{4+}$  和  $\text{Hf}^{4+}$  的，而  $\text{Eu}^{2+}$  离子半径较大，因此，锆石中  $\text{Ce}^{4+}$  更容易以类质同像进入锆石晶格<sup>[15, 18]</sup>，造成 Ce 相对富集和 Eu 的相对亏损。

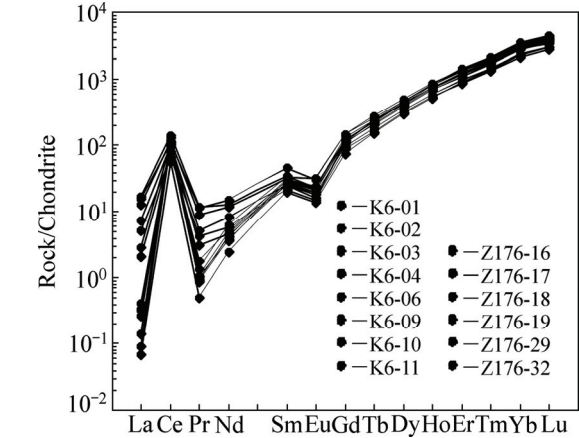


图 3 锆石的稀土元素球粒陨石标准化图

Fig. 3 Chondrite normalized REE patterns for zircon in host granite-porphyry of Xiajinbao

4.2 样品中锆石 U-Pb 年代学结果

本次研究对样品中的 16 颗岩浆锆石进行 U-Pb 同位素定年，所有测试经过校正后的结果见表 3。从表 3 中可以看出下金宝岩体  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄区间为

(156.7±3.1)~(173.9±3.7) Ma。本研究用 ISOPLOT 程序<sup>[19]</sup>对下金宝岩体 16 颗锆石进行了谐和曲线投影, 并对 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄进行了加权平均计算, 下金宝岩体锆石 U-Pb 年龄均在谐和线上及其附近(见图 4), 其加权平均年龄为(158.0±2.5) Ma(1σ, MSWD 为 0.76, n=16), 由于测试锆石均为岩浆锆石, 其加权平均年龄代表了下金宝花岗斑岩体的结晶年龄, 表明该岩体形成于燕山早期。

4.3 样品中锆石 Hf 同位素特征

岩体锆石 Hf 同位素结果(见表 2)显示, 两件样品中所有测试点的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值为  $7.74 \times 10^{-4} \sim 1.561 \times 10^{-3}$ , 均小于  $2 \times 10^{-3}$ , 表现出非常低的比值, 表明锆石在结晶后基本没有明显的放射性成因 Hf 的累积<sup>[20-21]</sup>。依据单颗粒锆石年龄计算得出两件样品中 16 颗锆石的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值介于 0.282372~0.282462, 平均值为 0.282409; 锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 -10.913~-7.5828 之间, 均为负值, 表明下金宝岩体主要起源于地壳岩石的部分熔融<sup>[22-24]</sup>。下金宝岩体  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值在 -0.97669~-0.95298 之间, 平均值为 -0.96137, 小于硅镁质地壳的  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值<sup>[25]</sup>和硅铝质地壳的  $f_{\text{Lu/Hf}}$  值<sup>[26]</sup>, 二阶段模式年龄更能反映其源区物质在地壳的平均存留年龄<sup>[16]</sup>。经计算得到下金宝岩体二阶段模式年龄(TDM2)介于 1496.638~1673.632 Ma 之间。两件样品中

的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 同位素地壳模式年龄均具有较小的变化范围, 暗示岩体的岩浆物质来源应该具有较为均一的锆石 Hf 同位素组成<sup>[27]</sup>。下金宝岩体的锆石 Hf 同位素组成在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图(见图 5)上, 主要集中于下地壳的演化线上下很小的范围内, 也反映了下金宝岩体来源于地壳物质的部分熔融。岩体中锆石 Hf 同位素的二阶段模式年龄( $T_{\text{DM}2}$ )接近于区域上长城系地层的年龄(约 1400~1800 Ma), 故认为下金宝岩体的岩浆物质极有可能来源于这个地壳源区。

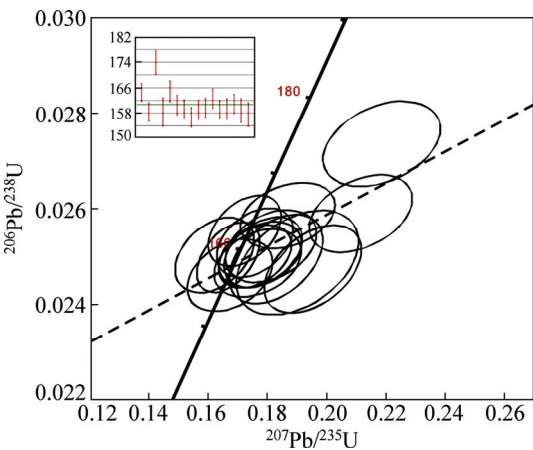


图 4 下金宝岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 4 U-Pb Concordia diagram of zircon of Xiajinbao rock body

表 2 下金宝岩体锆石 Hf 同位素测试结果

Table 2 Results of Hf isotope of Xiajinbao rock body

| Sample No. | t/Ma  | <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf | 1σ       | <sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf | 1σ       | <sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf | 1σ       | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $T_{\text{DM}}/\text{Ma}$ | $T_{\text{DMC}}/\text{Ma}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|------------|-------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------|
| K6-1       | 164.5 | 0.282406                             | 0.000014 | 0.001509                             | 0.000030 | 0.033249                             | 0.000597 | -12.950635                | -9.53827                  | 1211.893                  | 1606.254                   | -0.95454           |
| K6-2       | 158.3 | 0.282420                             | 0.000012 | 0.001374                             | 0.000020 | 0.030778                             | 0.000424 | -12.459401                | -9.11657                  | 1187.877                  | 1579.874                   | -0.95861           |
| K6-4       | 158.3 | 0.282408                             | 0.000013 | 0.001206                             | 0.000036 | 0.026823                             | 0.000853 | -12.889740                | -9.27519                  | 1199.685                  | 1598.064                   | -0.96369           |
| K6-5       | 164.8 | 0.282416                             | 0.000012 | 0.001262                             | 0.000010 | 0.028677                             | 0.000229 | -12.597570                | -9.05277                  | 1189.849                  | 1583.42                    | -0.96198           |
| K6-7       | 160.5 | 0.282424                             | 0.000012 | 0.001187                             | 0.000015 | 0.026191                             | 0.000352 | -12.299078                | -8.91533                  | 1175.589                  | 1569.586                   | -0.96424           |
| K6-9       | 159.4 | 0.282383                             | 0.000015 | 0.001265                             | 0.000043 | 0.028439                             | 0.000987 | -13.741773                | -10.3668                  | 1235.559                  | 1649.706                   | -0.96189           |
| K6-10      | 156.7 | 0.282421                             | 0.000012 | 0.001237                             | 0.000028 | 0.028503                             | 0.000686 | -12.417700                | -9.03925                  | 1181.872                  | 1576.42                    | -0.96274           |
| K6-11      | 159.0 | 0.282402                             | 0.000012 | 0.001213                             | 0.000008 | 0.027417                             | 0.000189 | -13.085197                | -9.70445                  | 1207.707                  | 1613.162                   | -0.96346           |
| K6-15      | 159.7 | 0.282409                             | 0.000013 | 0.000774                             | 0.000006 | 0.017566                             | 0.000127 | -12.828529                | -9.44415                  | 1183.666                  | 1597.336                   | -0.97669           |
| Z176-16    | 162.5 | 0.282384                             | 0.000015 | 0.001440                             | 0.000007 | 0.033357                             | 0.000196 | -13.727737                | -10.2662                  | 1240.788                  | 1648.013                   | -0.95661           |
| Z176-17    | 159.1 | 0.282415                             | 0.000016 | 0.001345                             | 0.000012 | 0.029965                             | 0.000326 | -12.613840                | -9.28907                  | 1193.124                  | 1588.626                   | -0.95949           |
| Z176-18    | 159.3 | 0.282462                             | 0.000032 | 0.001561                             | 0.000034 | 0.038918                             | 0.001354 | -10.948415                | -7.5828                   | 1133.043                  | 1496.638                   | -0.95298           |
| Z176-19    | 160.9 | 0.282419                             | 0.000012 | 0.001440                             | 0.000009 | 0.032785                             | 0.000246 | -12.478206                | -9.10025                  | 1190.719                  | 1580.521                   | -0.95663           |
| Z176-29    | 158.8 | 0.282401                             | 0.000013 | 0.001276                             | 0.000011 | 0.028400                             | 0.000263 | -13.117993                | -9.80727                  | 1211.03                   | 1616.476                   | -0.96158           |
| Z176-32    | 157.5 | 0.282372                             | 0.000013 | 0.001149                             | 0.000015 | 0.025862                             | 0.000312 | -14.13049915              | -10.9130                  | 1247.194                  | 1673.632                   | -0.96539           |

表 3 下金宝岩体锆石 U-Pb 年代学结果

Table 3 Results of zircon U-Pb geochronology of Xiajinbao rock body

| Sample No. | w(B)/10 <sup>-6</sup> |       | Isotopic ratio                       |        |                                     |        |                                     |        |                                      | Age/Ma                              |      |                                     |     |
|------------|-----------------------|-------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-----|
|            | Th                    | U     | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1σ     | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1σ     | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1σ     | <sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1σ   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1σ  |
| K6-01      | 170.8                 | 273.9 | 0.0528                               | 0.0030 | 0.1870                              | 0.0105 | 0.0259                              | 0.0005 | 0.0080                               | 174.0                               | 9.0  | 164.5                               | 2.8 |
| K6-02      | 188.7                 | 299.5 | 0.0518                               | 0.0027 | 0.1768                              | 0.0097 | 0.0249                              | 0.0005 | 0.0084                               | 165.3                               | 8.3  | 158.3                               | 2.9 |
| K6-03      | 94.7                  | 171.0 | 0.0594                               | 0.0037 | 0.2187                              | 0.0131 | 0.0273                              | 0.0006 | 0.0089                               | 200.8                               | 10.9 | 173.9                               | 3.7 |
| K6-04      | 150.0                 | 278.8 | 0.0552                               | 0.0036 | 0.1902                              | 0.0136 | 0.0249                              | 0.0007 | 0.0072                               | 176.8                               | 11.6 | 158.3                               | 4.5 |
| K6-05      | 84.6                  | 185.3 | 0.0605                               | 0.0034 | 0.2116                              | 0.0115 | 0.0259                              | 0.0005 | 0.0090                               | 194.9                               | 9.6  | 164.8                               | 3.4 |
| K6-07      | 119.8                 | 240.6 | 0.0520                               | 0.0028 | 0.1814                              | 0.0101 | 0.0252                              | 0.0005 | 0.0089                               | 169.2                               | 8.7  | 160.5                               | 3.1 |
| K6-09      | 201.8                 | 336.2 | 0.0518                               | 0.0027 | 0.1777                              | 0.0092 | 0.0250                              | 0.0005 | 0.0088                               | 166.1                               | 8.0  | 159.4                               | 2.8 |
| K6-10      | 163.8                 | 266.8 | 0.0491                               | 0.0028 | 0.1674                              | 0.0095 | 0.0246                              | 0.0005 | 0.0085                               | 157.2                               | 8.3  | 156.7                               | 3.1 |
| K6-11      | 237.7                 | 363.6 | 0.0495                               | 0.0022 | 0.1669                              | 0.0070 | 0.0250                              | 0.0005 | 0.0075                               | 156.7                               | 6.1  | 159.0                               | 3.0 |
| K6-15      | 152.1                 | 254.1 | 0.0535                               | 0.0029 | 0.1786                              | 0.0087 | 0.0251                              | 0.0005 | 0.0082                               | 166.9                               | 7.5  | 159.7                               | 3.0 |
| Z176-16    | 197.7                 | 267.7 | 0.0501                               | 0.0026 | 0.1725                              | 0.0081 | 0.0255                              | 0.0005 | 0.0077                               | 161.5                               | 7.0  | 162.5                               | 3.1 |
| Z176-17    | 157.1                 | 277.0 | 0.0518                               | 0.0023 | 0.1759                              | 0.0081 | 0.0250                              | 0.0004 | 0.0078                               | 164.5                               | 7.0  | 159.1                               | 2.7 |
| Z176-18    | 185.7                 | 282.9 | 0.0476                               | 0.0025 | 0.1623                              | 0.0088 | 0.0250                              | 0.0005 | 0.0076                               | 152.7                               | 7.7  | 159.3                               | 3.3 |
| Z176-19    | 191.0                 | 294.6 | 0.0520                               | 0.0025 | 0.1759                              | 0.0085 | 0.0253                              | 0.0005 | 0.0085                               | 164.5                               | 7.3  | 160.9                               | 3.0 |
| Z176-29    | 118.5                 | 218.6 | 0.0561                               | 0.0035 | 0.1830                              | 0.0104 | 0.0249                              | 0.0006 | 0.0081                               | 170.7                               | 8.9  | 158.8                               | 3.8 |
| Z176-32    | 143.4                 | 243.6 | 0.0583                               | 0.0033 | 0.1954                              | 0.0108 | 0.0247                              | 0.0006 | 0.0081                               | 181.3                               | 9.2  | 157.5                               | 3.8 |

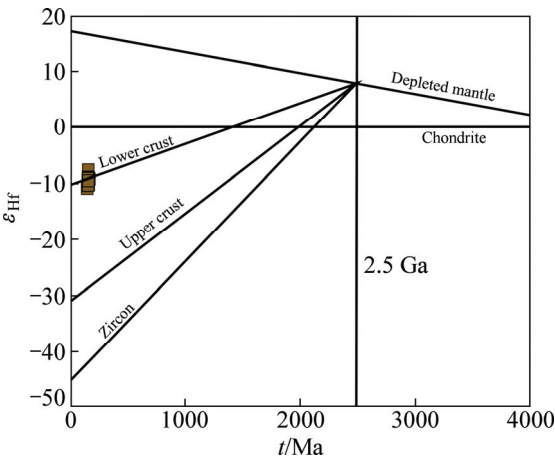


图 5 下金宝岩体锆石 Hf 同位素组成及  $\epsilon_{\text{Hf}}-t$  图解  
Fig. 5 Zircon Hf isotopic compositions and plots of  $\epsilon_{\text{Hf}}-t$  of Xiajinbao intrusion

5 讨论

5.1 锆石微量元素组成对成岩过程的制约

利用 WATSON 等<sup>[28]</sup>推荐的锆石 Ti 温度计计算方程： $\lg(\text{Ti}, 10^{-6})=6.01 \pm 0.03-(5080 \pm 30)/T(\text{K})$ ，计算岩浆锆石的结晶温度  $T_{\text{Tiz}}$ (见表 4)，FERRISS 等<sup>[29]</sup>通过热力学计算认为该方程在压力大于 3.5 GPa 下不适用，由于本区下金宝花岗斑岩体为浅成岩，因此，该岩体

锆石在适用范围内，计算出的结果可以代表锆石结晶时的温度。根据 Ti 含量估算的  $T_{\text{Tiz}}$  和 Zr/Hf、Yb/Nd、Nb/Ta、Th/U 值分别对应锆石微区 U-Pb 年龄作图(见图 6)，从图 6 中可以看出，样品 K6 和样品 Z176 的  $T_{\text{Tiz}}$  和 Zr/Hf、Yb/Nd、Nb/Ta、Th/U 值随着锆石 U-Pb 年龄的变小，呈现出不太一样的变化规律。样品 K6 随着锆石 U-Pb 年龄的变小，Yb/Nd 和  $T_{\text{Tiz}}$  先升高再震荡降低，但 Yb/Nd 值的变化幅度较小，Nb/Ta、Th/U 总体变化规律不明显，Zr/Hf 整体呈下降趋势；样品 Z176 随着锆石 U-Pb 年龄的变小，Yb/Nd 值整体呈升高趋势， $T_{\text{Tiz}}$  和 Th/U 值整体呈降低趋势，Zr/Hf 早期的变化规律不明显，但后期的有急剧降低的趋势，Nb/Ta 值先升高再震荡降低，其变化幅度很小。锆石样品 K6 和锆石样品 Z176 产自同一岩体的不同部位，但是在这两件样品中，锆石的微量元素却表现出不尽相同的地球化学行为。这可能由于花岗质岩浆的黏度较大，再加上岩浆结晶过程中温度的降低，使得某些元素在岩浆中流动性变差，所以在岩浆结晶过程中不同部位的元素变现出的地球化学行为是不尽相同。

熔体中含 Al 矿物含量的增加可以引起锆石 Zr/Hf 值的增大<sup>[30-32]</sup>。导致 Zr/Hf 减小的原因可能是在岩浆结晶的过程中，有贫 Al 物质的加入，或者富含 Al 矿物的晶出<sup>[33]</sup>。岩浆演化过程中造岩矿物长石的结晶分离会导致熔体 Eu 呈现出负异常，本研究的锆石中，

表 4 下金宝岩体锆石结晶温度的计算结果

**Table 4** Calculation results of crystallization temperature of zircon in host Xiajinbao intrusion

| Sample | Temperature/°C | Sample  | Temperature/°C |
|--------|----------------|---------|----------------|
| K6-01  | 782.10         | K6-11   | 802.56         |
| K6-02  | 724.08         | K6-15   | 751.93         |
| K6-03  | 766.44         | Z176-16 | —              |
| K6-04  | 734.37         | Z176-17 | 784.50         |
| K6-05  | 764.00         | Z176-18 | —              |
| K6-07  | 793.43         | Z176-19 | 827.57         |
| K6-09  | 800.43         | Z176-29 | 689.98         |
| K6-10  | 720.44         | Z176-32 | 772.31         |

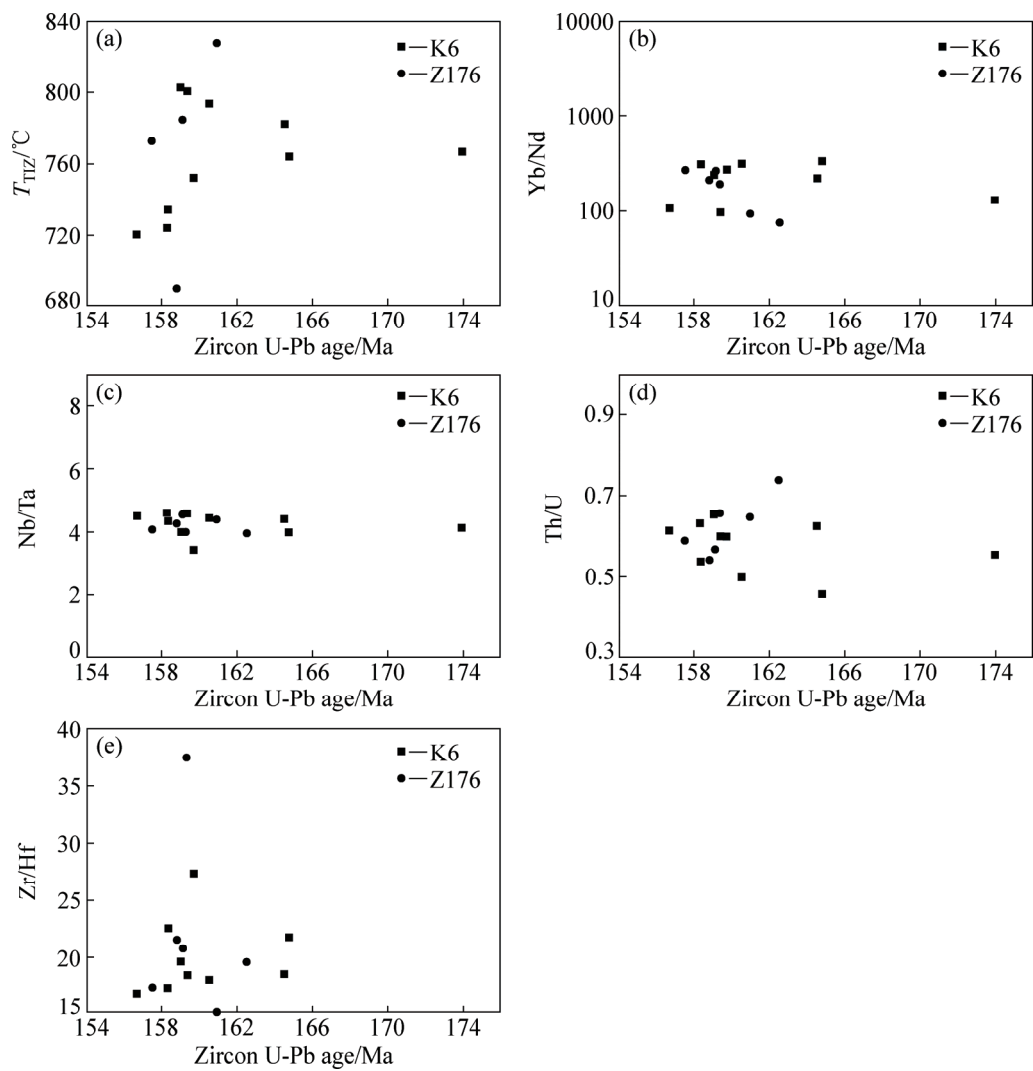


图 6 下金宝岩体锆石  $T_{\text{Tiz}}$  与锆石 U-Pb 年龄关系及微量元素比值和与锆石 U-Pb 年龄关系图

Fig. 6  $T_{\text{Tiz}}$  vs U-Pb age diagrams(a)and trace element ratio versus U-Pb age diagrams (b)~(e) of zircon of Xiajinbao rock body

Eu 均呈现出负异常,说明锆石结晶的同时,也有长石的结晶,长石是富 Al 的硅酸盐矿物,长石的结晶是导致 Zr/Hf 比值减小的原因。样品 Z176 中的 Yb/Nd 值的增大,代表锆石轻稀土减少、重稀土增加,代表

上地幔或下地壳物质的混入,  $T_{\text{Tiz}}$  具有先上升后下降的趋势也说明了更深、温度更高的上地幔物质混入,李应栩等<sup>[33]</sup>也认为  $T_{\text{Tiz}}$  的升高应与上涌的玄武质上地幔或下地壳物质补充进岩浆房中有关; Nb/Ta 的值的

变化幅度均比较小, 暗示在岩浆结晶过程中, 导致 Yb/Nd 的值增大的原因并非是由于围岩的同化混染, 而是与富 LREE 物质的结晶有关。MILLER 等<sup>[34]</sup>研究认为, Th/U 的值对岩浆富水环境有一定的指示意义。黄勇 等<sup>[35]</sup>在研究西藏雄村斑岩铜金矿床斑岩体研究时发现, 石英闪长斑岩晚期阶段 Th/U 比值增大范围明显大于角闪石英闪长玢岩的 Th/U 比值增大范围, 认为石英闪长斑岩岩浆更富水, 本区下金宝岩体 Th/U 比值随岩浆的演化整体呈增加趋势, 表明下金宝岩体锆石是在富水的环境中结晶的。花岗质岩浆富水, 说明熔体出溶了流体<sup>[33]</sup>, 表明岩浆在演化过程中经历了岩浆-流体的演化过程。

综上所述, 锆石的微量元素特征显示, 下金宝花岗斑岩体是下地壳物质重熔的产物, 在岩浆形成的过程中可能有少量上地幔物质的混入, 岩浆在演化过程中经历了结晶分异作用, 上地壳物质的同化混染作用不明显, 并且存在岩浆-流体的演化过程, 在近地表伴随温度和压力的降低, 岩浆冷凝形成岩体, 流体冷却成矿物质沉淀, 形成本区含矿斑岩体。

## 5.2 锆石 U-Pb、Hf 同位素对成岩动力学的制约

翁文灏于 75 年前认识和提出了燕山运动, 并把燕山运动分为 A 幕(175~160 Ma)、B 幕(156~139 Ma)和中间幕(165~156 Ma)<sup>[36]</sup>。刘洪涛等<sup>[37]</sup>认为在 160 Ma 以前的中生代早-中期, 华北克拉通北缘地区的地壳仍处于加厚和隆升过程之中, 而没有发生明显的地壳减薄, 相当于燕山造山作用的早期, 这和燕山运动的 A 幕在时间上有很好的对应。马君<sup>[38]</sup>通过对区域上马兰峪隆起核部的高锆花岗岩(都山岩体(220 Ma)、肖营子岩体(179.5 Ma)、高家店岩体(195 Ma)、贾家山岩体(199 Ma)、低锆花岗岩(如青山口岩体(199.1±2 Ma)、茅山岩体(170 Ma)、王坪石岩体(163±1.3 Ma)等)和强过铝质花岗岩(以麻地岩体(166.3 Ma)为代表)的研究认为, 在 220~160 Ma 期间, 该地区正处在地壳强烈加厚的时期。马兰峪隆起核部的中酸性侵入岩均形成于强烈加厚地壳的底部, 马兰峪隆起核部的高锆花岗岩和低锆花岗岩虽然形成的条件有所差别, 但仍均属于加厚地壳的产物。本研究的下金宝岩体的锆石 U-Pb 年龄为 158 Ma, 比上述区域上岩体的结晶时间稍晚, 时间正处于刘洪涛等<sup>[37]</sup>提出的华北克拉通北缘地区中生代重大构造转折发生的时间区间内(160~150 Ma), 大地构造环境处于由挤压环境向伸展环境演化阶段, 这个时间段相当于燕山运动的中间幕<sup>[36]</sup>。马强等<sup>[39]</sup>对区域上(北京西山、内蒙古宁城道、冀北承德、

辽宁北票、凌源等地)出露的蓝旗组(髫髻山组)火山岩的年龄进行了统计, 认为区域上蓝旗组(髫髻山组)的形成时代介于 166~153Ma 之间, 主要集中于 159~157Ma 之间, 统计结果与本研究的下金宝岩体的锆石 U-Pb 年龄(158.0±2.5 Ma)接近。邱家镶等<sup>[40]</sup>、李伍平等<sup>[41~44]</sup>、彭艳东等<sup>[45]</sup>、马强等<sup>[39]</sup>研究认为区域上蓝旗组(髫髻山组)火山岩是陆内岩石圈挤压造山作用的产物, 岩石发生熔融的原因可能与地幔岩浆的底侵作用有关。杨蔚<sup>[46]</sup>认为在 166~148 Ma 间, 辽西地区发生规模较大的玄武岩底侵作用, 来自上地幔熔融产生的基性岩浆(玄武质熔体)侵入到下地壳, 并导致下地壳岩石部分熔融。而且本研究结果也显示, 岩浆结晶过程中没有地壳物质的混入,  $T_{\text{iz}}$  的震荡性升高应该与脉动性上涌的玄武质上地幔物质的底侵有关, 那么有理由相信当时区域上的大地构造环境正处于造山运动挤压环境向伸展环境转变过程中。对于花岗质岩石来说, 其来源主要是古老或新生的地壳岩石的部分熔融, 且主要起源于(正常或加厚的)地壳的中下部<sup>[47]</sup>。引起地壳深部的岩石发生熔融的原因有以下 3 点: 1) 温度的升高; 2) 挥发分的加入; 3) 压力的降低<sup>[48]</sup>。而花岗质的岩浆通常都是水不饱和的<sup>[49]</sup>, 那么引起深部地壳的熔融的原因除了温度升高外, 应该有降压作用的参与。本研究的下金宝岩体形成于挤压环境向伸展环境转换的大地构造环境中, 这个转换过程是一个岩石圈深部降压的过程, 引起下地壳物质发生部分熔融的原因是岩石圈深部降压, 下地壳物质在 160 Ma 以前的挤压环境下初步加热的基础上, 又经历了来自地幔岩浆的底侵作用和由挤压—伸展环境过渡时期的减压作用, 在二者共同作用下, 下地壳岩石部分熔融形成本区原始岩浆。

## 6 结论

1) 下金宝花岗斑岩体锆石具明显的环带结构和韵律结构, Th/U 为 0.46~0.74, 为典型的岩浆锆石, Ce 正异常和 Eu 负异常明显; 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 158.0±2.5 Ma(1 $\sigma$ , MSWD 为 0.81,  $n=16$ ), 形成于燕山早期。

2) 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 -10.913~-7.5828 之间, 均为负值, 表明下金宝岩体主要起源于地壳岩石的部分熔融; Hf 同位素的二阶段模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )接近于区域上长城系地层的年龄(约 1400~1800 Ma), 因此, 形成下金宝岩体的物源极有可能来源于这个地壳源区。



3) 下金宝金矿花岗斑岩中锆石的微量元素和 Hf 同位素研究结果显示,花岗斑岩形成于由挤压环境向伸展环境转换的大地构造环境中,岩浆起源于长城系的下地壳物质的熔融。由于燕山期华北地块的岩浆底侵作用,下地壳岩石重熔,在岩浆形成的过程中有少量上地幔物质的混入,岩浆在演化过程中,由于发生结晶分异作用,导致岩浆出溶流体,形成岩浆和流体的岩浆热液,在近地表伴随温度和压力的降低,岩浆冷凝形成岩体,流体冷却成矿物质沉淀,形成本区含矿斑岩体。

## REFERENCES

- [1] 邓晋福,冯艳芳,刘 翠,肖庆辉,苏尚国,周 肃,高延光. 太行-燕辽地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 623-633.  
DENG Jin-fu, FENG Yan-fang, LIU Cui, XIAO Qing-hui, SU Shang-guo, ZHOU Su, GAO Yan-guang. Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) orogenic processes, magma sources and metallogenesis as well as coal formation in the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning region[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 623-633.
- [2] 贾三石,王恩德,付建飞,宋建潮,席晓凤. 冀东-辽西主要金矿集区地质特征的差异性与成矿作用的统一性探析[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1493-1506.  
JIA San-shi, WANG En-de, FU Jian-fei, SONG Jian-chao, XI Xiao-feng. Geological differences and mineralization unity of the key gold ore concentrated regions in Eastern Hebei and Western Liaoning Provinces[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(9): 1493-1506.
- [3] 康 明,杨 柳,王 丰,李 振,王璐阳,何 伟. 渣尔泰山地区白垩纪酸性火山岩地质特征及成矿作用[J]. 岩石学报, 2014, 30(12): 3681-3692.  
KANG Ming, YANG Liu, WANG Feng, LI Zhen, WANG Lu-yang, HE Wei. Geological characteristics and mineralization of Cretaceous acid volcanic rock in the Zha'ertaihan area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3681-3692.
- [4] 牛树银,王宝德,张建珍,马宝军,孙爱群,聂凤军,江思宏,陈 超. 内蒙古金厂沟梁金矿的构造特征及深部找矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 348-354.  
NIU Shu-yin, WANG Bao-de, ZHANG Jian-zhen, MA Bao-jun, SUN Ai-qun, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, CHEN Chao. Structural controls on the Jinchanggouliang gold deposit in Inner Mongolia and ore prospecting at depth[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(3): 348-354.
- [5] 张 璟. 辽西地区金矿成矿规律及成矿预测[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
ZHANG Jing. Metallogenic regularity and prediction to gold deposits in Western Liaoning Province[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [6] 栾文楼,于耀先. 河北平泉下营坊金矿床流体包裹体地球化学及其找矿意义[J]. 贵金属地质, 1995, 4(3): 161-167.  
LUO Wen-lou, YU Yao-xian. Geochemistry of fluid inclusion of Xiayingfang gold deposit in Pingquan of Hebei Province and ore-searching signification[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 1995, 4(3): 161-167.
- [7] 袁万明,于耀先,栾文楼,王宝德,雷世和,李红阳. 河北下营坊花岗斑岩铜成矿作用标志[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(3/4): 47-253.  
YUAN Wan-ming, YU Yao-xian, LUAN Wen-lou, WANG Bao-de, LEI Shi-he, LI Hong-yang. Mineralizing features of Xiayingfang granite-porphyry in Nierthen Hebei, China[J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 1996, 19(3/4): 47-253.
- [8] 叶美林. 河北平泉下营坊金矿床成因浅析[J]. 工程设计与研究, 2013(135): 6-9.  
YE Mei-lin. The genesis of Xiayingfang in Pingquan, Hebei Province[J]. *Engineering Design and Research*, 2013(135): 6-9.
- [9] 雷世和,李云怀,胡 军. 河北平泉下营坊不对称褶曲的厘定及控岩控矿意义[J]. 现代地质, 1995, 9(4): 459-466.  
LEI Shi-he, LI Yun-huai, HU Jun. Identification of S-type asymmetrical fold and its action on controlling magmatism and mineralization in Xiayingfang district, Pingquan, Hebei Province[J]. *Geoscience*, 1995, 9(4): 459-466.
- [10] LIU Y S, GAO S, HU Z C. 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 from mantle xenoliths[J]. *J Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [11] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.  
WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. Zircon genetic mineralogy constraints on the explaining of the U-Pb age[J]. *Chinese and its Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [12] HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *J Meta Geol*, 2000, 18: 423-439.
- [13] BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O' REILLY S Y, FISHER N L. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602-622.
- [14] MÖLLER A, O' BRIEN P J, KENNEDY A. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry:

- An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway)[J]. Geological Society (London) Special Publications, 2003, 220: 65–81.
- [15] HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. The composition of zircon and igneous metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27–62.
- [16] 郭波, 朱赖民, 李 犇, 弓虎军, 王建其. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 265–281.  
GUO Bo, ZHU Lai-min, LI Ben, GONG Hu-jun, WANG Jian-qi. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the Southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 265–281.
- [17] CLAIBORNE L, MILLER C, WOODEN J. Trace element composition of igneous zircon: A thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(4): 511–531.
- [18] SHANNON R. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. Acta Crystallographica Section A, 1976, 32(5): 751–767.
- [19] LUDWING K R. Isotope 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Special Publication, 2003, 4: 1–70.
- [20] 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 谢烈文, 柳小明. 冀北张宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素[J]. 地球科学, 2006, 31(1): 71–80.  
YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, SHAO Ji-an, XIE Lie-wen, LIU Xiao-ming. In-situ U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from volcanic rocks of the Houcheng and Zhangjiakou formations in the Zhang-Xuan Area, Northeast China[J]. Earth Science, 2006, 31(1): 71–80.
- [21] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 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 Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, GAO Shan. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 185–220.
- [22] 汪相, GRIFFIN W L, 王志成, 周新民, 汪传胜. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学[J]. 科学通报, 2003, 48(4): 379–382.  
WANG Xiang, GRIFFIN W L, WANG Zhi-cheng, ZHOU Xin-min, WANG Chuan-sheng. The zircon Hf isotope geochemistry of Yajiang granite, Hunan Province[J]. Chinese and its Science Bulletin, 2003, 48(4): 379–382.
- [23] VERVOORT J D, PATCHETT P J, ALBARÈDE F, BLICHERT-TOFT J, RUDNICK R, DOWNES H. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 181: 115–129.
- [24] GRIFFIN W L, BELOUSOVA E A, SHEE S R. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. Precambrian Research, 2004, 131 (3/4): 231–282.
- [25] AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 4205–4225.
- [26] VERVOORT J D, PACHELT P J, GEHRELS G E, NUTMAN A P. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. Nature, 1996, 379: 624–627.
- [27] 关俊雷, 耿全如, 王国芝, 彭智敏, 张 璋, 丛 峰, 李 娜. 北冈底斯带日松花岗岩体的锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素组成[J]. 地质学报, 2014, 88(1): 26–52.  
GUAN Jun-lei, GENG Quan-ru, WANG Guo-zhi, PENG Zhi-min, ZHANG Zhang, CONG Feng, LI Na. Zircon U-Pb and Hf isotope compositions of the Risong Granite in North Gangdese, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(1): 26–52.
- [28] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth[J]. Science, 2005, 308: 841–844.
- [29] FERRISS E D A, ESSENE E J, BECKER U. Computational study of the effect of pressure on the Ti-in-zircon geothermometer[J]. European Journal of Mineralogy, 2008, 20(5): 745–755.
- [30] LINNEN R L, KEPPLER H. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66: 3293–3301.
- [31] CLAIBORNE L L, MILLER C F, WALKER A B, WOODEN J L, MAZDAB F K, BEA F. Tracking magmatic processes through Zr /Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada[J]. Mineralogical Magazine, 2006, 70(5): 517–543.
- [32] ZARAIISKY G P, AKSYUK A M, DEVIYATOVA V N, UDORATINA O V, CHEVYCHELOV V Y. The Zr/Hf ratio as a fractionation indicator of rare-metal granites[J]. Petrology, 2009, 17(1): 25–45.
- [33] 李应棚, 谢玉玲, 陈 伟, 唐燕文, 李光明, 张 丽, 刘云飞, 柳小明. 西藏恰功铁矿二长花岗岩斑岩锆石的 U-Pb 年代学与地球化学特征及意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2023–2033.  
LI Ying-xu, XIE Yu-ling, CHEN Wei, TANG Yan-wen, LI Guang-ming, ZHANG Li, LIU Yun-fei, LI Xiao-ming. U-Pb age and geochemical characteristics of zircon in monzogranite porphyry from Qiagong deposit, Tibet, and geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2023–2033.

- [34] MILLER C, THFNI M, FRANK W, SCHUSTER R, MELCHER F, MEISEL T. Geochemistry and tectono-magmatic affinity of the Yungbwaophiolite, SW Tibet[J]. *Lithos*, 2003, 66: 155–172.
- [35] 黄勇, 唐菊兴, 张丽, 郎兴海. 西藏雄村斑岩铜金矿床 III 号矿体岩浆岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及微量元素组成[J]. *矿床地质*, 2014, 33(2): 361–372.
- HUANG Yong, TANG Ju-xing, ZHANG Li, LANG Xing-hai. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic and trace element composition of intrusions from No. III orebody of Xionggun porphyry copper-gold deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(2): 361–372.
- [36] 赵越, 张拴宏, 徐刚, 杨振宇, 胡健民. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 854–863.
- ZHAO Yue, ZHANG Shuan-hong, XU Gang, YANG Zhen-yu, HU Jian-min. The Jurassic major tectonic events of Yanshanianin traplate deformation belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9/10): 854–863.
- [37] 刘洪涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 433–448.
- LIU Hong-tao, ZHAI Ming-guo, LIU Jian-ming, SUN Shi-hua. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 433–448.
- [38] 马君. 冀东马兰峪隆起核部中生代中酸性侵入岩岩石地球化学特征及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 1–91.
- MA Jun. Geochemical characteristics and mesozoic intermediate and felsic plutons in Malanyu Uplift, Eastern Hebei Province, and it's tectonic implications[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 1–91.
- [39] 马强, 郑建平. 辽西北票蓝旗组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3287–3297.
- MA Qiang, ZHENG Jian-ping. In-situ U-Pb dating and Hf isotope analyses of zircons in the volcanic rock of the Lanqi formation in the Beipiao area, western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3287–3297.
- [40] 邱家骧, 廖群安. 北京地区中元古代与中生代火山岩的酸度、系列、构造环境及岩浆成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 1998, 17(2): 104–117.
- QIU Jia-xiang, LIAO Qun-an. The acidity, series, tectonic settings and magmatic origin of middle proterozoic and mesozoic volcanic rocks from Beijing area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1998, 17(2): 104–117.
- [41] 李伍平. 辽西中侏罗统海房沟组火山岩的地球化学特征[J]. *地球科学*, 2013, 38(6): 1153–1168.
- LI Wu-ping. Geochemical characteristics of the middle Jurassic volcanic rocks of Haifanggou formation, Western Liaoning Province, North China[J]. *Earth Science*, 2013, 38(6): 1153–1168.
- [42] 李伍平, 李献华, 路凤香. 辽西中侏罗世高 S 低型火山岩的成因及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 523–532.
- LI Wu-ping, LI Xian-hua, LU Feng-xiang. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, North Eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 523–532.
- [43] 李伍平, 路凤香, 李献华. 北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 247–254.
- LI Wu-ping, LU Feng-xiang, LI Xian-hua. Genesis of Late Jurassic trachyandesite in Western Hills of Beijing and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3): 247–254.
- [44] 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(2): 123–133.
- LI Wu-ping, LU Feng-xiang, LI Xian-hua, ZHOU Yao-qi, SUN Shan-ping, LI Jia-zhen, ZHANG Da-gang. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan formation in Western Hills of Beijing[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(2): 123–133.
- [45] 彭艳东, 张东立, 张长捷. 辽西北票、义县地区髻髻山旋回火山岩的地球化学特征[J]. *地质与资源*, 2003, 12(3): 177–184.
- PENG Yan-dong, ZHANG Li-dong, ZHANG Chang-jie. Chemistry of volcanic rocks of Tiaojishan formation in Beipiao-Yixian, Western Liaoning, China[J]. *Geology and Resources*, 2003, 12(3): 177–184.
- [46] 杨蔚. 辽西中生代火山岩年代学及地球化学研究: 对华北克拉通岩石圈减薄机制的制约[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007: 1–121.
- YANG Wei. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Constraints on mechanism for the lithospheric thinning in the North China Craton[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007: 1–121.
- [47] BROWN M. The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: The migmatite-to-crustallyderived granite connection in thickened orogens[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 36: 83–130.
- [48] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, ZHENG Yong-fei. Discussions on the Petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [49] THOMPSON A B. Sometime-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths[J]. *Geological Society*, 1999, 168: 7–25.

## Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope characteristics of Xiaojinbao granite-porphyry body, Hebei Province, and its geological significance

ZHANG Jian-guo<sup>1,2,3</sup>, SHAO Yong-jun<sup>1,2</sup>, LIU Zhong-fa<sup>1,2</sup>,  
WANG Chen<sup>1,2</sup>, ZOU Yan-hong<sup>1,2</sup>, LI Hong-bin<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor,  
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;  
3. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Xiaojinbao granite-porphyry body is located in Yong'an-Xiayingfang-Maojinggou tectono-magmatite zone, which is closely related to Au, Ag and Cu polymetallic metallogenic. Zircon U-Pb geochronology and trace element geochemistry of the ore-bearing granite porphyry in the Xiaojinbao was studied first time. The weighted average of  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $(158.0 \pm 2.5)$  Ma ( $1\sigma$ , MSWD is 0.76,  $n=16$ ), the result shows that Xiaojinbao granite-porphyry body forms in early Yanshanian. Using zircon Ti thermometer, the forming temperature of zircon was calculated and all of them more than 700 °C except one point, it shows that zircon crystallized in deep and high temperature magma. The  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircon ranging from -10.9130 to -7.5828, and all of them are less than 0. The characteristics of Hf isotope show that Xiaojinbao granite-porphyry body originates from the partial melting of lower crust, and the formation environment is conversion environment from compression to extension. The geodynamic mechanisms of Xiaojinbao granite-porphyry body formation were proposed based on the zircon U-Pb geochronology and trace element. The lower crust remelted under the magma under plating of the North China block in early Yanshanian, at the same time, involving in part of mantle material. Primary magma increases along the deep fault based on the deep pressure, showing a crystallization differentiation. The exsolution fluid from magma forms the water-rich magmatic hydrothermal. The ore-bearing granite porphyry is a product form by condensation of magmatic hydrothermal under the lower temperature and pressure of near-surface.

**Key words:** zircon U-Pb geochronology; zircon Hf isotope; diagenesis; diagenetic geodynamic; Xiaojinbao rock body

**Foundation item:** Project (41472302) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project supported by Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, China

**Received date:** 2015-04-19; **Accepted date:** 2015-07-02

**Corresponding author:** LIU Zhong-fa; Tel: +86-13574886497; E-mail:liuzf61521@csu.edu.cn

(编辑 王超)