

## 延边东部五道沟花岗闪长岩体的年代学与地球化学特征及其成矿意义

陈聪<sup>1</sup>, 任云生<sup>1</sup>, 赵华雷<sup>1</sup>, 杨群<sup>1</sup>, 邹欣桐<sup>1</sup>, 侯可军<sup>2</sup>, 蒋国豪<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春, 130061

2. 中国地质科学院 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

3. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳, 550002)

**摘要:** 为查明五道沟花岗闪长岩体与区内金、钨矿化的关系, 对五道沟钨矿床的含矿花岗闪长岩进行 LA-ICP-MS 单颗粒锆石 U-Pb 定年、微量元素和稀土元素分析。研究表明, 该花岗闪长岩体的锆石 U-Pb 年龄介于 264~269 Ma 之间, 加权平均年龄为(267.8±1.0) Ma, 岩体的侵位时代为中二叠世; 五道沟钨矿床和杨金沟金矿床的含矿岩体对侵位时代相近, 地球化学特征相似, 物质源区相同, 应为同一岩浆作用产物; 杨金沟金矿的含矿黑云母二长花岗岩与金矿石具有相似的稀土和微量元素组成, 含矿岩体即为成矿岩体, 而五道沟钨矿区的含矿花岗闪长岩体与白钨矿单矿物的微量元素组成具有显著差异。五道沟岩体为区内金矿的成矿岩体及含矿岩体, 而对于钨矿而言, 仅为含矿岩体, 二者并无直接的成因联系。五道沟钨矿区的深部或外围应存在与钨矿具有成因联系的隐伏岩体。

**关键词:** 五道沟花岗闪长岩体; 锆石 U-Pb 年龄; 石英脉型白钨矿矿床; 五道沟白钨矿矿床; 杨金沟金矿床

中图分类号: P588.121, P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2015)08-2962-12

## Geochronology, geochemistry and metallogenic significance of Wudaogou granodiorite intrusion in Eastern Yanbian, NE China

CHEN Cong<sup>1</sup>, REN Yunsheng<sup>1</sup>, ZHAO Hualei<sup>1</sup>, YANG Qun<sup>1</sup>, ZOU Xintong<sup>1</sup>, HOU Kejun<sup>2</sup>, JIANG Guohao<sup>3</sup>

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment,  
Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China

3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In order to determine the genetic relationship between the intrusion and W-Au mineralization, zircon U-Pb dating by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) and trace element analysis of the ore-hosting granodiorite in the Wudaogou scheelite deposit were carried out. The results show that  $w(^{206}\text{Pb})/w(^{238}\text{U})$  ages of zircons from the granodiorite range from 264 to 269 Ma and have a weighted mean age of (267.8±1.0) Ma, demonstrating that the intrusion is emplaced in the middle Permian. The ore-hosting rocks from both the Wudaogou and Yangjingou deposit are almost simultaneously emplaced, with similar geochemical characteristics and common material

收稿日期: 2014-08-12; 修回日期: 2014-11-10

**基金项目(Foundation item):** 国家自然科学基金资助项目(41272094); 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2013CB429802); 中国地质调查局项目(12120113098300); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放基金资助项目(201209)(Project 41272094 supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2013CB429802) supported by the Major State Research Development Program (973 Program) of China; Project (12120113098300) supported by the China Geological Survey's Program; Project (201209) supported by the State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry Foundation of Chinese Academy of Sciences)

**通信作者:** 任云生, 教授, 博士生导师, 从事矿床学与区域成矿规律研究; E-mail: renys@jlu.edu.cn

source which result from the same magmatism. In the Yangjingou gold deposit, the ore-hosting monzogranite and auriferous quartz veins have almost the same trace element composition, which indicates that the ore-hosting monzogranite is metallogenic intrusion. However, compositions of trace elements in scheelite minerals from Wudaogou scheelite deposit are obviously different from those in the granodiorite. These data show that the Wudaogou intrusion is not only the ore-hosting intrusion, but also the metallogenic intrusion for gold deposits in this area, whereas there is just ore-hosting intrusion for tungsten mineralization. In other words, the Wudaogou granodiorite has no genetic relationship with tungsten mineralization. There lies another intrusion genetically associated with tungsten mineralization in the deeper or surrounding of the Wudaogou deposit.

**Key words:** Wudaogou granodiorite intrusion; zircon U-Pb dating; scheelite-quartz lode deposit; Wudaogou scheelite deposit; Yangjingou gold deposit

五道沟花岗闪长岩体出露于吉林延边地区东部的五道沟—杨金沟一带, 北距著名的小西南岔大型铜金矿床约 12.5 km, 距杨金沟大型钨矿约 4.5 km。近年来, 在岩体内部及其与五道沟浅变质岩系接触带附近, 近年来发现了五道沟、四道沟和苇子沟白钨矿矿床(点)以及杨金沟金矿床<sup>[1-2]</sup>, 显示该岩体与区内金—钨矿化的时空及成因关系密切。但由于区内金—钨矿床发现较晚, 且地处森林覆盖区, 地质勘查与理论研究均十分薄弱, 岩浆作用与成矿关系、矿床的形成时代与构造背景等亟待深入研究。另一方面, 虽然区内不同时期的岩浆作用强烈, 中酸性侵入体(脉岩)分布广泛, 但地表出露十分有限; 缺乏高精度的同位素测年数据, 不同岩体乃至同一岩体的不同岩相之间的时空关系难以判断, 在很大程度上制约着该区成矿理论研究、成矿规律总结以及区域成矿作用对比研究。例如, 作为五道沟钨矿和杨金沟金矿的赋矿岩体的五道沟岩体, 其形成时代一直存在分歧。20世纪80年代, 利用 K-Ar 法测得二长花岗岩—花岗岩体的同位素年龄为 178.5~197 Ma<sup>[2]</sup>; 门兰静<sup>[3]</sup>利用锆石 U-Pb 法测得该岩体中石英闪长岩的同位素年龄为(263.1±5.3) Ma<sup>[3]</sup>。基于此, 本文作者在区内典型矿床地质特征研究基础上, 以五道沟钨矿床含矿花岗闪长岩为研究对象, 运用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法, 厘定了岩体的侵位时代, 并结合微量、稀土元素特征, 讨论其成岩物质源区及构造环境, 确定五道沟岩体与区内金矿化和钨矿化的关系, 为区内金、钨成矿理论及成矿规律研究提供实际材料和参考。

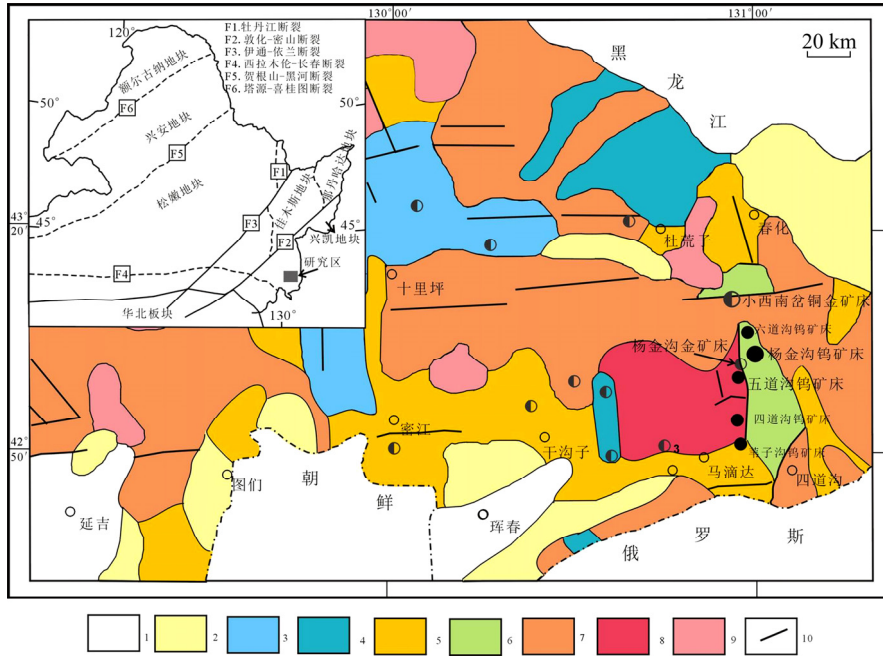
## 1 区域成矿背景及典型矿床特征

研究区隶属于西伯利亚板块、华北板块和环太平洋板块所挟持的兴蒙造山带东部(图 1)<sup>[4-5]</sup>。古生代时期, 表现为古亚洲洋消滅、西伯利亚板块与华北板块

陆缘相向增生而后碰撞拼接的演化历史; 中生代开始, 受古太平洋俯冲作用的影响, 经历了环太平洋构造域与古亚洲洋构造域的叠加与转换以及环太平洋构造域发展阶段。区内不同期次的构造—岩浆活动频繁且强烈, 为金、铜、钨等内生金属矿床的形成提供了良好的地质条件。区内已发现 2 个大型矿床(小西南岔铜金矿床和杨金沟钨矿床)、2 个中型矿床(杨金沟金矿床和五道沟钨矿床)及多个小型矿床和矿化点。

五道沟—杨金沟地区主要出露近南北向分布的晚古生代五道沟群(Pz<sub>1</sub>wd)浅变质岩系。南北向区域性大北城—春化—四道沟断裂和东西向东清—新河—马滴达断裂及一系列北西向次级断裂控制着杨金沟和五道沟钨矿以及杨金沟金矿的空间分布和矿体的形态、产状及规模。区内古生代和中生代的中酸性侵入体及各类脉岩发育, 古生代侵入体主要岩性为黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩, 其中花岗闪长岩体是五道沟钨矿床的主要赋矿围岩, 黑云母二长花岗岩为杨金沟金矿的含矿岩体; 中生代侵入岩以花岗质杂岩和花岗斑岩为主, 呈岩枝或岩株状分布, 与小西南岔和农坪斑岩型铜金矿床具密切的时空及成因联系<sup>[6-7]</sup>; 区内不同时期脉岩发育, 其岩石类型主要为闪长玢岩、辉绿辉长岩及煌斑岩等(图 2)。

五道沟钨矿床与杨金沟钨矿床、杨金沟金矿床、小西南岔铜金矿床同处于延边东部塔子沟—春化南北向金、铜、钨成矿带, 为确定该成矿带的成矿期次, 将以上 4 个典型矿床地质特征进行对比分析(表 1)<sup>[8-15]</sup>。由表 1 可知: 1) 五道沟钨矿床与杨金沟钨矿床成矿地质条件相同、矿化特征相似, 应同属岩浆热液脉型白钨矿矿床; 相对而言, 五道沟钨矿床的钨矿体多呈石英单脉产出, 矿体数量少、厚度大且品位高, 可能与控矿构造的规模不同有关; 2) 杨金沟金矿床与五道沟钨矿床虽然赋矿围岩相同, 但控矿构造的方向和性质明显不同, 杨金沟金矿床具有造山型金矿的矿物组合和蚀变特征, 与区内的白钨矿矿床属不同



1—第四系; 2—古近—新近系砾岩、玄武岩; 3—侏罗系火山岩; 4—三叠系火山岩; 5—二叠系变质岩系; 6—五道沟群变质岩系; 7—海西期闪长岩、斜长花岗岩; 8—海西期花岗岩闪长岩; 9—燕山期花岗岩、闪长岩; 10—断裂

图 1 延边东部区域地质与矿床(点)分布图(据文献[4]修改; 左上角为研究区大地构造位置图, 据文献[5])

Fig. 1 Regional geology and distribution of deposits in eastern Yanbian area (modified from Ref. [4]; the top left is tectonic map of NE China, from Ref. [5])

表 1 延边东部典型矿床地质特征对比表

Table 1 Comparison of geological characteristics of different deposits in eastern Yanbian area

矿床名称	五道沟钨矿床	杨金沟钨矿床	杨金沟金矿床	小西南岔铜金矿床
含矿岩体(地层)	海西期花岗岩闪长岩, 其次为五道沟群浅变质岩系	五道沟群浅变质岩系, 其次为海西期岩体	五道沟群浅变质岩系与海西期黑云母二长花岗岩	燕山晚期花岗杂岩体
控矿构造	岩体和围岩中的 NW 向断裂构造	NW 和 NWW 向断裂或五道沟群中、上段的层间破碎带	NE 向断裂破碎带	“Y”形构造, 南部收敛, 为近 SN 或 NW 向压扭性断裂, 北部为 NNW 向裂隙带
矿体特征	沿花岗岩闪长岩体中的 NW 向断裂呈单脉状, 矿体数量少, 单脉厚度大、品位高	呈细脉、网脉状沿五道沟群中、上段的 NW 和 NWW 向断裂或层间破碎带分布, 矿体数量多、厚度小、品位相对较低	沿黑云母二长花岗岩体及五道沟群的 NE 向断裂及破碎蚀变带呈厚板状、透镜状, 矿体数量少, 厚度变化大, 品位高	主要沿岩体的 SN, NW 向及其次级断裂呈单脉、复脉、网脉状, 矿体数量多、厚度和品位变化大
金属矿物	白钨矿为主, 少量黄铁矿、辉钼矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿	以白钨矿为主, 少量毒砂、磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿等, 偶见辉钼矿、铁闪锌矿	以黄铁矿为主, 还有少量毒砂、辉钼矿、黄铜矿、自然金等	黄铜矿、黄铁矿及磁黄铁矿, 还有少量胶黄铁矿、方黄铜矿、毒砂、自然金等
围岩蚀变	硅化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化、黑云母化和白云母化	硅化、钠长石化、黑云母化、白云母化及碳酸盐化	硅化、绢云母化、(黄铁)绢英岩化、绿泥石化和碳酸盐化	黑云母化、钾长石化、绢云母化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化及绿帘石化、阳起石化、透闪石化
成矿温度/℃	190~250	190~220	230~270	180~400
矿床成因	热液脉型矿床	热液脉型矿床	造山型金矿床	斑岩型矿床
资料来源	本文及文献[1]	文献[1-2, 8-9]	文献[10-11]	文献[12-15]

成矿作用的结果; 3) 小西南岔铜金矿床无论在赋矿围岩、控矿构造方面, 还是在矿物组合、围岩蚀变及成矿物理化学条件等方面, 均不同于上述 3 个典型矿床; 4) 延边东部地区至少存在岩浆热液脉型白钨矿矿床(杨金沟和五道沟钨矿床)、造山型金矿床(杨金沟金矿床)和斑岩型铜金矿床(小西南岔金矿床)等 3 类矿床。

## 2 样品描述与分析方法

### 2.1 样品描述

用于同位素测年、稀土元素和微量元素测试的花岗闪长岩样品均取自五道沟矿区①-1 号矿体附近的含矿岩体, 采样位置见图 2, 取样位置坐标为东经 130°54.089', 北纬 43°05.868'。岩石具有中细粒半自形

结晶结构, 块状构造(图 3(a)); 主要由石英(约 40%, 体积分数, 下同)、斜长石(约 40%)、钾长石(10%)、黑云母(5%~10%)及少量角闪石等组成。岩石的硅化现象很明显, 绿泥石化和绿帘石化现象也较普遍(图 3(b)), 石英具三边平衡结构(图 3(c)); 斜长石多发生绢云母化(图 3(b), 3(c))。

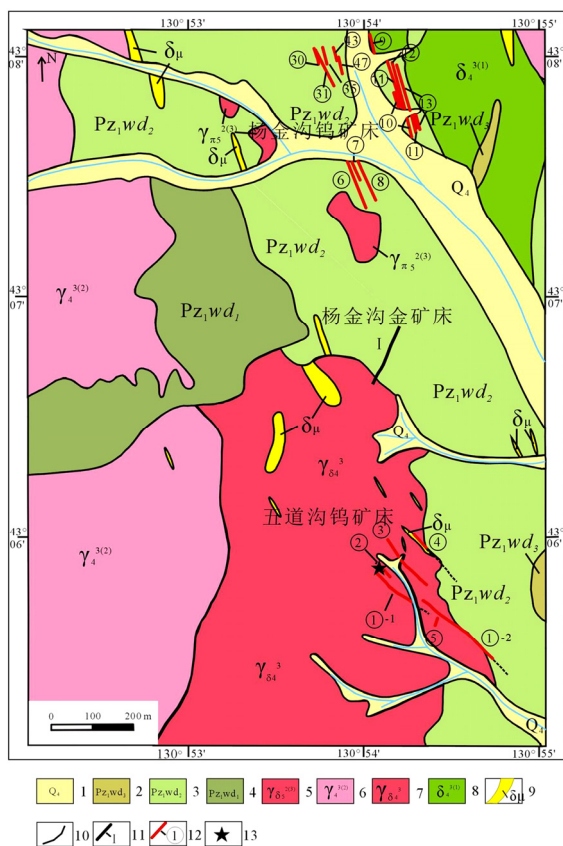
测试用的白钨矿单矿物样品取自五道沟钨矿区①-1 号矿体, 白钨矿呈不规则粗粒状、团块状产于石英脉中, 在紫外线光照射下发出鲜艳的蓝白荧光(图 3(d))。

### 2.2 分析方法

锆石挑选由河北省区域地质调查研究所完成; 锆石样品制备(靶), 反射光、透射光及阴极发光(CL)图像在中国地质科学院地质研究所实验室进行; LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析在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 MC-ICP-MS 实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。详细实验测试过程见文献[16]。锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为(337.76±2.49)Ma(样品分析点数 n=2, 1σ, 其中, σ 为误差), 对应的年龄推荐值为(337.13±0.37)Ma (2σ)<sup>[17]</sup>, 两者在误差范围内完全一致。

花岗闪长岩的微量及稀土元素分析测试工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。微量和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ELAN DRC-e 型 ICP-MS)完成, 分析精度高于 5%。具体的实验流程见文献[18]。

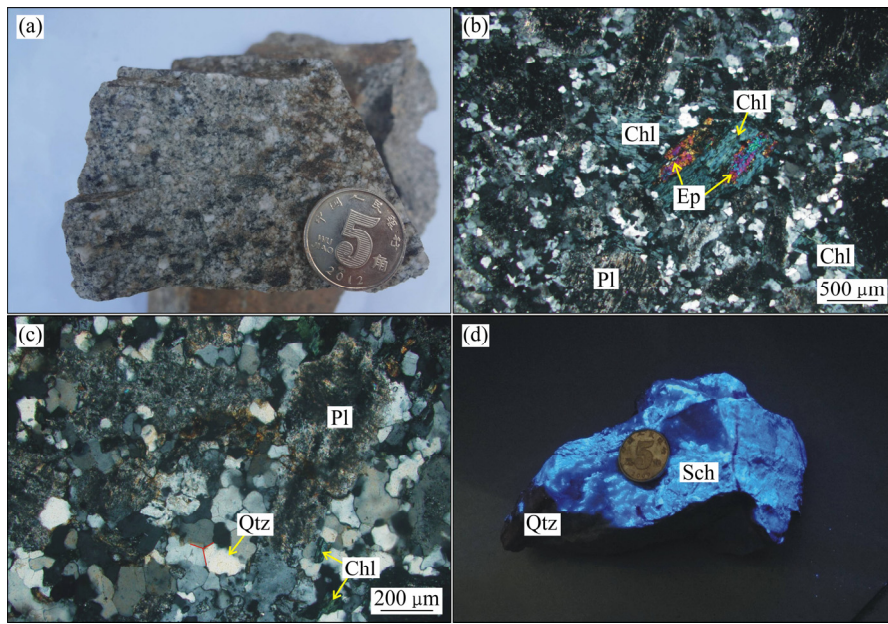
将白钨矿单矿物碎至粒径为 250~355 μm, 利用重选的方法将其初步富集, 然后借助荧光灯, 在双目镜下剔除杂质, 确保白钨矿的纯度达到 99%以上, 最后将纯净的白钨矿碎至粒径为 75 μm。白钨矿样品的稀土元素分析在天津地质矿产研究所进行, 分析仪器为美国热电公司 X2 型等离子体质谱仪(ICP-MS)。分析流程如下: 1) 称取试样 50 mg 于封闭溶液器的 Teflon 内罐中, 加入 1.0 mL HF, 0.5 mL HNO<sub>3</sub>, 盖上 Teflon 上盖, 装入钢套中, 拧紧钢套盖。将溶液器置于烘箱中, 于 190 °C 保温 24 h; 2) 取出溶液器, 冷却后开盖, 取出 Teflon 内罐, 在电热板上于 200 °C 蒸发至干; 3) 再加入 0.5 mL HNO<sub>3</sub>, 蒸发至干, 并重复 1 次; 4) 加入 HNO<sub>3</sub> 溶液(体积分数 50%)5 mL, 再次封闭于钢套中, 于 130 °C 保温 3 h, 冷却后开盖, 移至洁净塑料瓶中, 用开水定容为 50 mL, 摇匀后静置, 最后进行 ICP-MS 分析。



1—第四系; 2—五道沟群上段; 3—五道沟群中段; 4—五道沟群下段; 5—燕山期花岗斑岩; 6—海西期黑云母斜长花岗岩; 7—海西晚期花岗闪长岩、二长花岗岩; 8—海西晚期闪长岩; 9—闪长玢岩; 10—地质界线; 11—金矿体及其编号; 12—钨矿体及其编号; 13—采样位置

图 2 延边五道沟—杨金沟地区地质矿产图  
Fig. 2 Geology and mineral resources map in Wudaogou—Yangjingou region, Yanbian





(a) 中细粒半自形结构, 块状构造; (b) 斜长石(Pl)的绢云母化, 黑云母的绿泥石化(Chl)及绿帘石化(Ep); (c) 石英(Qtz)三边平衡结构, 斜长石(Pl)的绢云母化; (d) 石英脉(Qtz)中的团块状白钨矿(Sch)

图 3 五道沟钨矿床含矿花岗闪长岩手标本和显微照片以及含白钨矿石英脉照片

Fig. 3 Photograph and micrographs of Wudaogou ore-hosting granodiorite intrusion and photograph of scheelite-quartz vein

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

花岗闪长岩体中的锆石无色透明, 结晶较好, 多呈长柱状或短柱状, 长 100~400 μm, 长宽比为 1.2:1~4.2:1, 表面洁净、光滑。阴极发光 CL 图像(图 4)显示, 锆石晶体内部结构清晰, 震荡生长环带显著。

16 粒锆石中 Th 和 U 的质量分数分别为 (47.9~283.9) × 10<sup>-6</sup> (平均为 125.99 × 10<sup>-6</sup>) 和 (151.5~499.8) × 10<sup>-6</sup> (平均为 269.45 × 10<sup>-6</sup>), w(Th)/w(U)

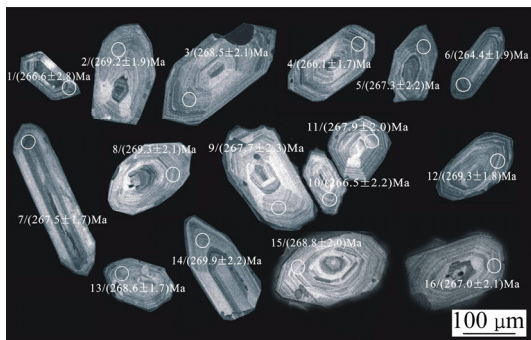


图 4 五道沟花岗闪长岩中的锆石的 CL 图像

Fig. 4 CL images and dating spots of zircons from Wudaogou granodiorite intrusion

为 0.31~0.58, 均大于 0.10, 平均为 0.44。锆石的 CL 图像和上述 Th, U 含量特征表明: 所测锆石均为典型的岩浆成因锆石, 其年龄可以代表岩体结晶年龄。

锆石 U-Pb 法测试数据见表 2, 谐和图和加权平均年龄图见图 5。

从表 2 和图 5 可以看出: 含矿花岗闪长岩体岩浆锆石的分析结果位于谐和线及其附近的小区域内, 且各分析点分布集中, 16 个测点的 w(<sup>206</sup>Pb)/w(<sup>238</sup>U) 年龄为 264~269 Ma, 其加权平均值为 (267.8 ± 1.0) Ma (平均

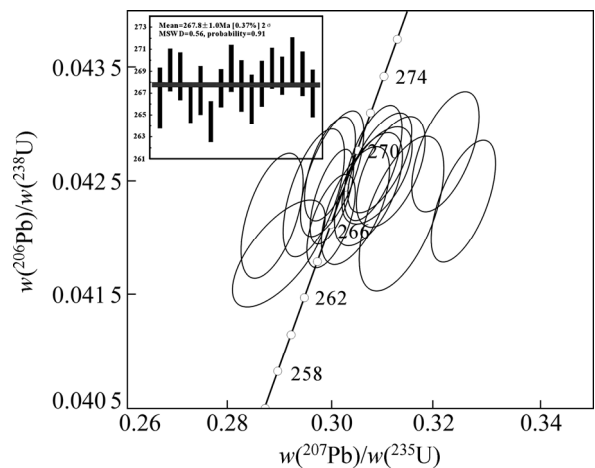


图 5 五道沟花岗闪长岩加权平均年龄及谐和年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and weighted age of zircons from Wudaogou granodiorite intrusion

标准权重偏差为 0.56), 代表了花岗闪长岩的结晶年龄, 表明该岩体形成于海西晚期, 形成时代为中二叠世中期。

3.2 稀土元素和微量元素特征

在五道沟矿区选取 4 件花岗闪长岩样品, 进行微量元素和稀土元素分析, 同时在白钨矿-石英脉中采集 5 件白钨矿单矿物样品进行稀土元素分析, 测试结果及相关参数见表 3; 并与近年来项目组测得的杨金沟金矿含矿岩体的测试结果进行比较<sup>[10]</sup>。

由表 3 可以看出: 五道沟钨矿床含矿花岗闪长岩

总稀土元素质量分数  $w(\sum\text{REE})$  总体偏低, 为  $77.32 \times 10^{-6} \sim 83.30 \times 10^{-6}$ ; 轻稀土富集明显, 重稀土相对亏损, 总轻稀土元素质量分数  $w(\sum\text{LREE})$  为  $(67.14 \sim 73.53) \times 10^{-6}$ , 总重稀土元素质量分数  $w(\sum\text{HREE})$  为  $(9.51 \sim 10.97) \times 10^{-6}$ , 轻稀土元素与重稀土元素质量比  $m(\sum\text{LREE})/m(\sum\text{HREE})$  为 6.84~8.24,  $w(\text{La}_N)/w(\text{Yb}_N) = 6.45 \sim 8.13$ ; 在球粒陨石标准化配分曲线图上(图 6(a))<sup>[19-20]</sup>, 呈明显的右倾型, 表现为弱的负 Ce 异常 ( $\delta\text{Ce}$  平均为 0.98) 和正 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu}$  平均为 1.02)。其微量元素蛛网图(图 6(b))显示, 该岩体富集 Rb 和 Ba

表 2 花岗闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Wudaogou granodiorite intrusion

测点	$w(^{232}\text{Th})/10^{-6}$	$w(^{238}\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/ w(\text{U})$	同位素比值				年龄/Ma(1 $\sigma$ )
				$w(^{207}\text{Pb})/w(^{235}\text{U})(1\sigma)$	$w(^{206}\text{Pb})/w(^{238}\text{U})(1\sigma)$	$w(^{208}\text{Pb})/w(^{232}\text{Th})(1\sigma)$	$w(^{207}\text{Pb})/w(^{206}\text{Pb})(1\sigma)$	
1	283.9	499.8	0.568 09	0.313 18(0.005 39)	0.042 22(0.000 45)	0.001 07(0.000 13)	0.053 69(0.000 58)	266.6(2.8)
2	137.2	294.7	0.465 49	0.300 28(0.003 69)	0.042 64(0.000 31)	0.001 41(0.000 18)	0.051 20(0.000 55)	269.2(1.9)
3	162.0	328.6	0.492 88	0.298 88(0.003 47)	0.042 54(0.000 35)	0.001 70(0.000 17)	0.051 07(0.000 50)	268.5(2.1)
4	213.4	389.1	0.548 48	0.299 53(0.002 98)	0.042 14(0.000 28)	0.001 35(0.000 14)	0.051 58(0.000 40)	266.1(1.7)
5	109.7	229.8	0.477 38	0.325 07(0.004 18)	0.042 33(0.000 35)	0.002 51(0.000 28)	0.055 85(0.000 63)	267.3(2.2)
6	95.8	241.9	0.396 10	0.289 54(0.005 82)	0.041 87(0.000 30)	0.003 74(0.000 54)	0.050 28(0.000 95)	264.4(1.9)
7	280.4	482.9	0.580 70	0.299 79(0.002 69)	0.042 36(0.000 27)	0.001 54(0.000 17)	0.051 35(0.000 33)	267.5(1.7)
8	84.1	209.4	0.401 38	0.307 52(0.003 76)	0.042 66(0.000 34)	0.003 02(0.000 35)	0.052 48(0.000 60)	269.3(2.1)
9	47.9	159.6	0.300 21	0.296 29(0.004 10)	0.042 40(0.000 37)	0.004 99(0.000 67)	0.050 82(0.000 62)	267.7(2.3)
10	76.7	194.0	0.395 06	0.288 14(0.004 09)	0.042 20(0.000 36)	0.002 64(0.000 33)	0.049 81(0.000 73)	266.5(2.2)
11	52.2	151.5	0.344 47	0.306 84(0.004 24)	0.042 43(0.000 33)	0.004 23(0.000 52)	0.052 67(0.000 71)	267.9(2.0)
12	130.4	292.6	0.445 69	0.309 11(0.003 99)	0.042 66(0.000 29)	0.002 02(0.000 28)	0.052 73(0.000 71)	269.3(1.8)
13	114.9	294.1	0.390 55	0.308 45(0.004 70)	0.042 55(0.000 28)	0.001 93(0.000 28)	0.052 60(0.000 70)	268.6(1.7)
14	85.2	179.8	0.473 63	0.321 64(0.004 50)	0.042 76(0.000 35)	0.002 78(0.000 46)	0.054 70(0.000 71)	269.9(2.2)
15	54.3	175.9	0.308 55	0.311 03(0.004 31)	0.042 58(0.000 32)	0.003 16(0.000 64)	0.053 17(0.000 74)	268.8(2.0)
16	87.9	187.5	0.468 74	0.304 21(0.004 44)	0.042 29(0.000 34)	0.002 56(0.000 58)	0.052 29(0.000 70)	267.0(2.1)

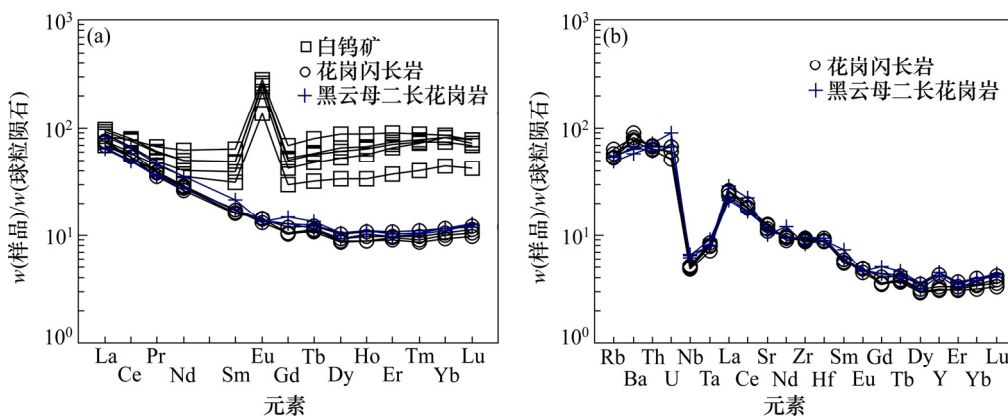


图 6 五道沟花岗闪长岩、杨金沟黑云二长花岗岩及白钨矿中稀土和微量元素标准化图解(数据见表 3; 球粒陨石与原始地幔标准化数值分别据文献[19]和[20])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized element patterns of Wudaogou granodiorite, Yangjinguo biotite-monzogranite and scheelites (Data listed in Table 3; chondrite and primitive mantle-normalized values are from Refs. [19] and [20], respectively)

表 3 五道沟钨矿和杨金沟金矿含矿岩体与五道沟钨矿中白钨矿单矿物的微量元素和稀土元素含量(质量分数)及相关参数

Table 3 Compositions of trace element of ore-hosting rocks in Wudaogou scheelite deposit,

Yangjingou gold deposit and scheelite minerals in Wudaogou scheelite deposit

 $\times 10^{-6}$ 

元素	五道沟矿区含矿岩体 (花岗闪长岩)(本文)				杨金沟金矿含矿岩体 (黑云母二长花岗岩) <sup>[10]</sup>			五道沟钨矿中的白钨矿单矿物(本文)				
	WCR-2	WCR-5	WCR-6	WCR-7	YB009-3-1	YB009-3-2	YB009-3-3	WD1	WD2	WD3	WD4	WD5
La	17.80	17.90	18.00	16.50	15.00	15.50	20.10	23.30	16.20	20.00	21.80	21.10
Ce	32.90	32.90	36.00	32.60	29.60	30.60	39.90	49.40	35.50	48.00	46.70	41.30
Pr	3.75	3.63	3.68	3.38	3.40	3.42	4.42	5.84	4.27	6.38	5.59	4.64
Nd	13.60	13.00	13.20	12.20	12.90	12.90	16.50	23.40	16.60	28.90	23.30	18.90
Sm	2.67	2.51	2.65	2.46	2.72	2.72	3.27	7.41	4.84	9.86	7.53	5.95
Eu	0.83	0.83	0.76	0.84	0.80	0.78	0.78	14.60	7.94	16.30	15.30	12.90
Gd	2.44	2.19	2.18	2.11	2.67	2.61	3.07	10.30	6.11	14.20	10.70	8.67
Tb	0.46	0.42	0.40	0.41	0.47	0.43	0.51	2.13	1.19	3.02	2.17	1.79
Dy	2.61	2.24	2.18	2.34	2.66	2.39	2.69	15.40	8.53	22.20	16.50	13.50
Ho	0.61	0.50	0.50	0.55	0.62	0.58	0.62	3.59	1.93	4.95	3.79	3.18
Er	1.77	1.52	1.56	1.61	1.78	1.60	1.72	11.60	6.22	15.00	12.20	10.80
Tm	0.28	0.22	0.23	0.25	0.28	0.27	0.27	1.89	1.03	2.26	1.98	1.85
Yb	1.98	1.58	1.71	1.77	2.00	1.90	1.98	12.70	7.58	14.80	13.80	13.80
Lu	0.31	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.33	1.76	1.08	1.96	1.86	1.97
Y	19.70	14.70	14.20	15.50	20.50	19.30	20.60	142.00	73.00	151.00	146.00	134.00
Cu	1.90	47.50	40.20	3.62	4.64	2.68	11.72					
Ga	13.50	14.20	13.90	13.90	13.70	14.50	13.90					
Rb	33.50	36.50	40.40	34.40	30.90	34.20	35.10					
Sr	236.00	266.00	244.00	272.00	250.00	252.00	218.00					
Zr	99.00	101.00	104.00	106.00	110.00	110.00	94.20					
Nb	3.73	3.48	3.66	3.62	4.79	4.73	4.44					
Ba	548.00	527.00	575.00	637.00	408.00	474.00	443.00					
Hf	2.73	2.83	2.79	2.97	2.81	2.98	2.81					
Ta	0.35	0.30	0.34	0.33	0.33	0.38	0.34					
Pb	4.57	3.70	3.62	4.80	3.00	3.03	4.47					
Th	5.87	5.34	5.71	5.50	5.68	5.12	6.20					
U	1.43	1.08	1.42	1.29	1.42	1.42	1.89					
w( $\Sigma$ REE)	82.00	79.71	83.30	77.32	75.20	76.02	96.14	183.32	119.02	207.83	183.22	160.35
w(LREE)	70.72	69.94	73.53	67.14	64.42	65.92	84.97	123.95	85.35	129.44	120.22	104.79
w(HREE)	10.97	9.52	9.51	9.89	10.78	10.10	11.18	59.37	33.67	78.39	63.00	55.56
w(LREE)/w(HREE)	6.84	7.92	8.24	7.28	5.97	6.53	7.60	2.09	2.53	1.65	1.91	1.89
w(L <sub>N</sub> )/w(Y <sub>N</sub> )	6.45	8.13	7.55	6.69	5.07	5.51	6.86	1.24	1.44	0.91	1.07	1.03
$\delta$ Eu	0.97	1.06	0.93	1.09	0.89	0.88	0.74	5.11	4.46	4.21	5.21	5.48
$\delta$ Ce	0.94	0.95	1.03	1.01	0.94	0.95	0.96	0.97	0.99	0.99	0.97	0.94
w(Rb)/w(Sr)	0.14	0.14	0.17	0.13	0.124	0.136	0.161					
w(Rb)/w(Ba)	0.06	0.07	0.07	0.05	0.076	0.072	0.079					
w(Nb)/w(Ta)	10.69	11.45	10.70	11.07	14.57	12.41	13.01					
w(Zr)/w(Hf)	36.26	35.69	37.27	35.70	39.15	36.91	33.52					

相关参数

等大离子亲石元素以及 Th 和 U 等高场强元素, Nb 和 Ta 强烈亏损。花岗闪长岩体样品的  $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  和  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  分别为 35.69~37.27 和 0.13~0.17。

## 4 讨论

### 4.1 五道沟钨矿床含矿岩体的物质源区

微量元素特征对成岩成矿的物质源区具有重要的指示意义<sup>[12, 21]</sup>。五道沟钨矿床含矿花岗闪长岩样品的  $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ (10.69~11.45) 总体介于地壳平均值(约 11.00)<sup>[19]</sup>和地幔平均值(17.50)<sup>[22]</sup>之间;  $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ (35.69~37.28) 小于地壳平均值(44.68)<sup>[23]</sup>而大于地幔平均值(30.74)<sup>[19]</sup>; 岩体的  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ (0.13~0.17) 也介于上地幔值(0.03)与地壳值(0.35)之间<sup>[24]</sup>, 上述岩石地球化学特征均反映了壳幔混源的特点。此外, 稀土元素质量分数较低、向右倾斜的稀土配分模式、不太明显的铷和铯异常也体现了五道沟花岗闪长岩体的深源性; 而 Nb 的亏损及 U 和 Th 的富集(图 6(b)) 暗示了该期次花岗质岩浆中有陆壳物质参与<sup>[25]</sup>。

综上所述, 五道沟含矿花岗闪长岩体可能来源于受到地壳混染的上地幔。

### 4.2 成岩时代及构造背景

五道沟岩体的成岩时代对本区岩浆活动期次及钨矿成矿时代的确定具有重要意义。本次测年中的 16 个测点谱和性较好, 加权平均年龄为(267.8±1.0) Ma, 与门兰静<sup>[3]</sup>的测年结果接近, 完全可以代表五道沟岩体岩浆结晶的年龄, 即岩浆作用发生于中二叠世中期。

在大地构造位置上, 延边地区被夹持于佳木斯地块、兴凯地块及华北板块之间, 先后经历了古亚洲洋的演化、古太平洋构造域的叠加与改造以及新生代超壳断裂的复合与改造<sup>[26]</sup>。越来越多的岩石学、地层及古生物学、构造地质学资料表明, 华北板块与其北侧地体群(兴安地体、松嫩地体、佳木斯地体)的最终碰撞拼合位置为西拉木伦河—长春—延吉一线, 时代为晚二叠世末—早三叠纪初期<sup>[8, 27]</sup>; 曹花花<sup>[28]</sup>提出, 早二叠世至晚二叠世期间兴凯地块西南缘一直处于古亚洲洋的俯冲作用下, 并导致了弧—陆(兴凯地块)的碰撞与拼合; 王挽琼等<sup>[29]</sup>根据华北板块北缘西段的黑云母二长花岗岩岩石学、年代学及地球化学特征, 认为早、中二叠世古亚洲洋仍未消亡。可见, 古生代时期, 本区属古亚洲洋构造域, 处于不同板块俯冲碰撞的构造背景。

在火成岩构造环境、物质源区的  $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ ,  $w(\text{Ta})-w(\text{Y})$ ,  $w(\text{Th})/w(\text{Yb})-w(\text{Ta})/w(\text{Yb})$  和  $w(\text{Th})/w(\text{Yb})-$

$w(\text{Sr})/w(\text{Nd})$  判别图解<sup>[30-32]</sup>如图 7 所示。由图 7 可见: 五道沟花岗闪长岩样品均落在火山弧花岗岩区域。这与张炯飞等<sup>[33]</sup>认为兴凯地块西南缘存在火山弧的观点一致; 岩体形成于活动大陆边缘的构造背景, 与板片流体有关, 进一步揭示其成岩与板块俯冲密切相关。此外, 五道沟花岗闪长岩体所显示的强烈的负 Nb 异常是与俯冲有关岩浆的共同特点<sup>[34]</sup>, 故认为该岩体的形成与古亚洲洋板块对兴凯地块的俯冲作用密切相关。

### 4.3 五道沟钨矿床和杨金沟金矿床含矿岩体关系

地质资料表明, 五道沟钨矿床的含矿岩体与其北部杨金沟金矿床的含矿岩体属同一岩体(图 2)。本文测定的五道沟含矿花岗闪长岩体年龄为(267.8±1.0) Ma, Zhao 等<sup>[10]</sup>测得与本矿床相邻的杨金沟金矿的含矿黑云母二长花岗岩成岩年龄为(262.3±1.3) Ma, 两者吻合程度较好, 进一步暗示两岩体时间、空间上均具有密切的联系。

五道沟和杨金沟矿区含岩体的稀土和微量元素对比分析发现(表 3), 二者的稀土元素总量接近(平均值分别为  $80.58 \times 10^{-6}$  和  $82.45 \times 10^{-6}$ ), 分馏程度均较高( $w(\text{La}_N)/w(\text{Yb}_N)$  分别为 6.45~8.13 和 5.07~6.86), 轻稀土元素明显富集, 重稀土严重亏损, REE 配分曲线具有相同的变化趋势(图 6(a)), 呈显著右倾型, 且均显示微弱的正 Eu、负 Ce 异常; 二者的微量元素组成相似, 微量元素特征参数范围近于相同, 均富含 Rb 和 Ba 等大离子亲石元素(LILE)以及 Th 和 U, 亏损 Nb 和 Ta 等高场强元素(HFSE), Zr 和 Hf 无明显亏损, 微量元素原始地幔标准化蛛网图的变化趋势相同(图 6(b))。上述的显著相似性暗示二者具有相同的物质源区。

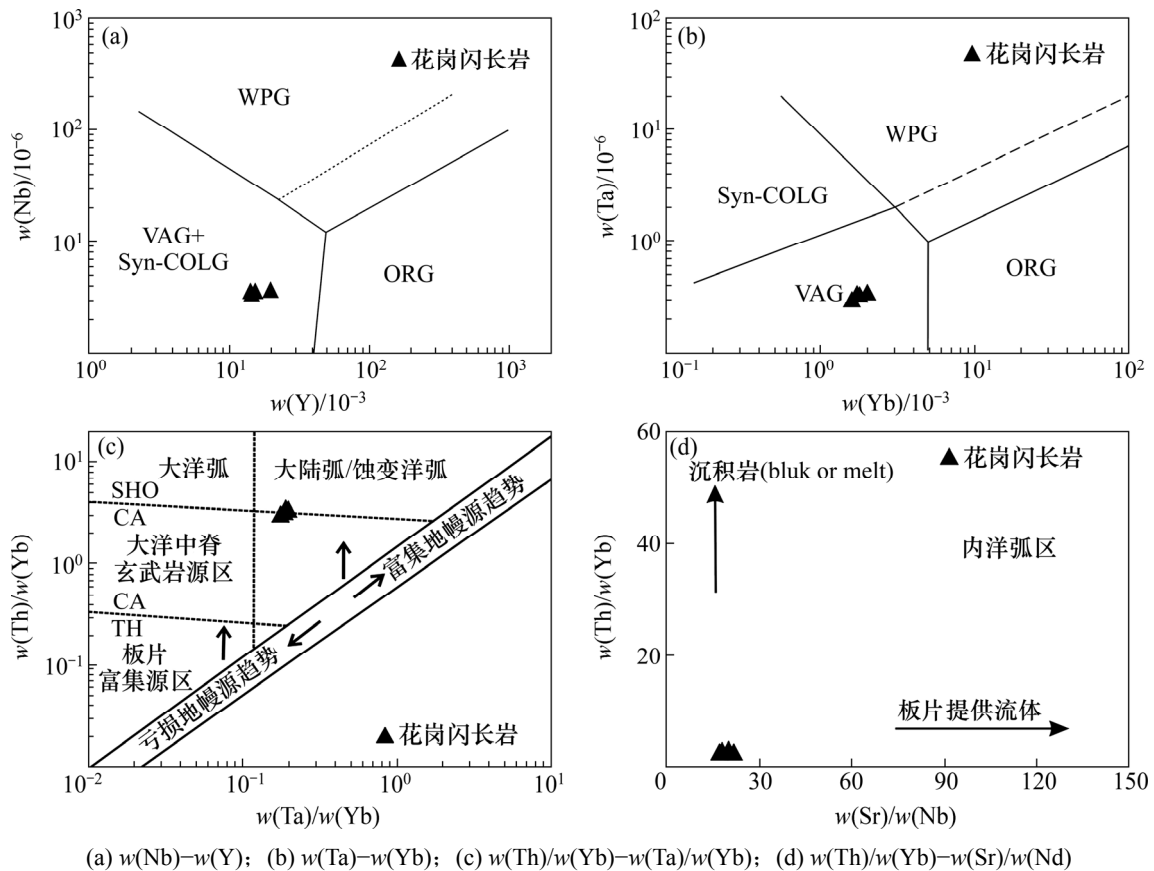
因此, 五道沟钨矿床和杨金沟金矿床含矿岩体为海西晚期同一岩浆事件的产物, 应为同一复式岩体的不同岩相。

### 4.4 岩体与金、钨矿化的关系

如前文所述, 杨金沟金矿床与五道沟钨矿床的含矿岩体为同一岩体。Zhao 等<sup>[10]</sup>通过对杨金沟金矿的含矿黑云母二长花岗岩及含矿石英脉稀土、微量元素对比研究, 认为金矿与含矿黑云母二长花岗岩物质源区相同, 二者成因关系密切。五道沟钨矿含矿花岗闪长岩与钨矿关系值得探讨。

因稀土元素具有特殊的电子结构、地球化学性质, 且该族元素的行为可以预测, 故其已成为热液矿床成矿物质来源的有效示踪剂<sup>[35-36]</sup>。由于白钨矿可容纳高含量的 REE<sup>[37]</sup>, 从而其稀土元素组成和配分模式等被广泛应用于示踪热液型金矿和钨矿的成矿流体性质及矿质来源, 并取得了理想的效果<sup>[38]</sup>。





(a)  $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ ; (b)  $w(\text{Ta})-w(\text{Yb})$ ; (c)  $w(\text{Th})/w(\text{Yb})-w(\text{Ta})/w(\text{Yb})$ ; (d)  $w(\text{Th})/w(\text{Yb})-w(\text{Sr})/w(\text{Nd})$

WPG 为板内花岗岩; VAG+Syn-COLG 为同碰撞花岗岩; VAG 为火山弧花岗岩; ORG 为大洋脊花岗岩

图 7 五道沟花岗闪长岩体的构造环境判别图解((a)与(b)底图据文献[30]; (c) 据文献[31]; (d) 据文献[32])

Fig. 7 Discrimination diagrams of tectonic setting of granodiorite in Wudaogou scheelite deposit ((a) and (b) after Ref. [30]; (c) modified from Ref. [31]; (d) after Ref. [32])

五道沟钨矿床的含矿花岗闪长岩与矿石中白钨矿单矿物的稀土元素组成对比结果显示(表 3, 图 6(a)), 花岗闪长岩稀土元素总量(平均为  $80.58 \times 10^{-6}$ )明显比白钨矿的低(平均为  $170.75 \times 10^{-6}$ ), 花岗闪长岩体轻、重稀土分馏程度相对较高( $w(\text{La}_N)/w(\text{Yb}_N)=6.45 \sim 8.13$ ), 配分曲线呈显著的右倾型, 且并无明显的  $\delta\text{Eu}$  和  $\delta\text{Ce}$  异常, 而白钨矿轻重稀土分馏不明显, 稀土元素配分曲线较平缓, 并具有明显的  $\delta\text{Eu}$ (平均为 4.89)正异常。

为进一步确定赋矿花岗闪长岩体与区内白钨矿化的成因联系, 需深入分析地质体之间稀土型式的异同及其有关地质过程中发生的稀土分馏现象。研究表明, 地下水淋滤、矿物沉淀期间由 REE 分馏以及后期的地质改造程度等均可引起地质体稀土元素组成的变化。

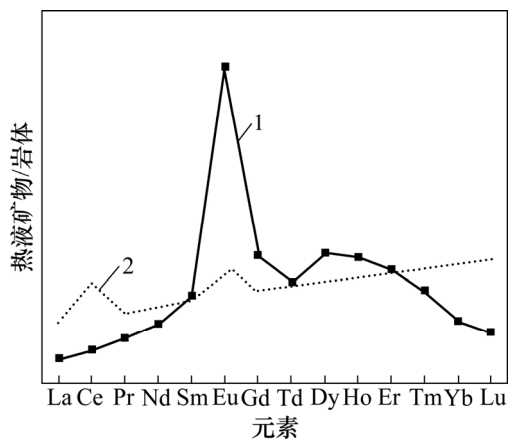
郭光军等<sup>[35]</sup>综合前人成果认为: 母岩中的稀土元素如果在地下水淋滤后进入溶液并以络合物的形式进行迁移的过程中发生了分馏作用, 其中 Eu, Ce, Y 和 HREE 的迁移量要比其他 LREE 的大, 它们将在热液中相对富集; 热液对母岩的分馏曲线向左倾, 且出现

Eu 和 Ce 的正异常。白钨矿对岩体的稀土元素配分曲线形式如图 8 所示。由图 8 可知: 曲线左倾型式不明显, 且未出现明显的 Ce 正异常, 故排除了花岗闪长岩经淋滤作用发生分馏, 使其部分稀土元素在热液中富集的可能。

另一方面, 热液矿物中的 Eu 异常可能是矿物沉淀期间由 REE 分馏引起, 也可能是由已从显示 Eu 异常的溶液中沉淀引起。本文中白钨矿显示明显的正 Eu 异常, 已有研究表明, 这主要取决于成矿热液含有较高浓度的  $\text{Eu}^{2+}$ <sup>[8, 38]</sup>, 并非热液矿物沉淀过程中的稀土元素分馏导致, 而成矿热液中的高  $\text{Eu}^{2+}$  浓度可能与含矿花岗闪长岩的蚀变作用有关。本文所研究的样品发生了一定程度的热液蚀变作用, 以斜长石的绢云母化最为普遍。具有正 Eu 异常的斜长石在发生绢云母化等蚀变时, 会析出部分  $\text{Ca}^{2+}$ , 同时提升了成矿热液的  $\text{Eu}^{2+}$  含量<sup>[38]</sup>。白钨矿继承了围岩的部分稀土元素(包括 Eu 在内), 这可能是由于在白钨矿沉淀之前, 成矿流体与含矿岩体之间可能发生了强烈的水岩反应<sup>[35]</sup>。

本区区域成矿背景研究、含矿岩体的野外调研及室内岩相学研究中并未发现五道沟花岗闪长岩体受到强烈的地质改造。因此, 可排除后期地质改造导致地质体稀土元素配分型式发生变化的可能。

综合分析表明, 五道沟花岗闪长岩体并不是钨成矿物质的主要来源, 仅作为五道沟钨矿床的含矿岩体; 五道沟矿区的深部或(和)外围应发育钨矿的成矿岩体。



1—花岗闪长岩实测分馏型式; 2—预测分馏型式

图8 花岗闪长岩实测(本文)及预测  
(文献[34])稀土分馏型式对比图

Fig. 8 Comparison of REE patterns of scheelite versus ore-hosting granodiorite and that predicted by Ref. [34]

## 5 结论

1) 延边东部近年新发现的杨金沟、五道沟、四道沟和苇子沟等白钨矿矿床(点)以及杨金沟金矿床均位于五道沟复式岩体及其与五道沟群接触带附近, 五道沟与杨金沟钨矿床为同一热液成矿作用于不同围岩的产物; 五道沟钨矿与杨金沟金矿虽产于同一含矿岩体, 但属不同成矿作用产物; 小西南岔铜金矿床形成于该区发生的另一期热液成矿作用。

2) 五道沟钨矿床含矿花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(267.8±1.0) Ma, 侵位时代为中二叠世中期, 与杨金沟金矿含矿岩体形成时代基本相同, 结合二者稀土、微量元素组成特征对比认为, 它们属同一岩体的不同岩相, 均为海西晚期同一岩浆事件的产物。

3) 五道沟花岗闪长岩体微量、稀土元素特征表明, 其成岩物质来源于受到地壳物质混染的上地幔,

形成于活动大陆边缘环境, 与板片流体有关。综合区域地质演化历史, 认为该期岩浆作用与古亚洲洋俯冲消减作用、西伯利亚和华北板块的碰撞作用有关。

4) 对于杨金沟金矿而言, 含矿的黑云母二长花岗岩体与金矿具有密切的时空和成因联系; 而对于五道沟、杨金沟等钨矿床而言, 五道沟花岗闪长岩体仅提供赋矿空间, 与钨矿并无成因联系, 钨矿的成矿岩体应位于五道沟花岗闪长岩体的深部或外围。

特别感谢吉林省有色金属地质勘查局 603 队李晨辉总工程师和卢秀全高级工程师在野外工作中的支持与帮助。

## 参考文献:

- [1] 任云生, 鞠楠, 赵华雷, 等. 延边东部五道沟脉型白钨矿矿床地质特征及流体包裹体[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1736-1744.  
REN Yunsheng, JU Nan, ZHAO Hualei, et al. Geological characteristics and fluid inclusions of Wudaogou lode scheelite deposit in Eastern Yanbian, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1736-1744.
- [2] 卢秀全, 胡春亭, 钟国军. 吉林省珲春杨金沟白钨矿床地质特征及成因初探[J]. 吉林地质, 2005, 24(3): 16-21.  
LU Xiuquan, HU Chunting, ZHONG Guojun. Geologic features and genesis of the Yangjingou scheelite deposit, Hunchun, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2005, 24(3): 16-21.
- [3] 门兰静. 延边—东宁地区晚中生代浅成热液金铜矿床的成矿流体与成矿机理研究[D]. 长春: 吉林大学地球科学学院, 2011: 1-125.  
MEN Lanjing. An ore-forming fluid study on late Mesozoic epithermal Au-Cu deposits in Yanbian-Dongning area: implication for the Metallogenic Mechanism[D]. Changchun: Jilin University. College of Earth Sciences, 2011: 1-125.
- [4] 时俊峰, 张玉生. 吉林省珲春杨金沟白钨矿区地质特征及找矿方向[J]. 吉林地质, 2003, 22(3): 31-35.  
SHI Junfeng, ZHANG Yusheng. The geologic features of the Yangjingou scheelite mining area, Hunchun, Jilin Province and direction for ore prospecting[J]. Jilin Geology, 2003, 22(3): 31-35.
- [5] WU Fuyuan, SUN Deyou, GE Wenchun, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.
- [6] 孙景贵, 陈雷, 赵俊康, 等. 延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 319-328.  
SUN Jinggui, CHEN Lei, ZHAO Junkang, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in

- Xiaoxinancha gold-rich copper orefield of Yanbian and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(3): 319–328.
- [7] REN Yunsheng, JU Nan, ZHAO Hualei, et al. Geochronology and geochemistry of metallogenic porphyry bodies from the Nongping Au-Cu deposit in the eastern Yanbian Area, NE China: Implication for metallogenic environment[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86 (3): 619–629.
- [8] 任云生, 赵华雷, 雷恩, 等. 延边杨金沟大型钨矿床白钨矿的微量和稀土元素地球化学特征及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(12): 3720–3726.
- REN Yunsheng, ZHAO Hualei, LEI En, et al. Trace element and rare earth element geochemistry of the scheelite and ore genesis of the Yangjingou large scheelite deposit in Yanbian area, northeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 26(12): 3720–3726.
- [9] 艾德新, 李峰, 刘玉平. 吉林杨金沟白钨矿床控矿因素及远景预测[J]. *长春工程学院院报(自然科学版)*, 2008, 9(4): 55–57.
- AI Dexin, LI Feng, LIU Yuping. Scheelite deposit ore-controlling factors and prediction in Yangjingou of Jilin Province[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2008, 9(4): 55–57.
- [10] ZHAO Hualei, REN Yunsheng, HOU Henan, et al. Age and tectonic setting of the first orogenic gold deposit discovered in the Yanbian Region, NE China, *International Geology Review*, 2013, 55(7): 882–893.
- [11] 李晨辉. 延边东部杨金沟金矿床地质特征与成矿物理化学条件研究[J]. *黄金地质*, 2011, 32(12): 22–26.
- LI Chenhui. Geologic features and ore-forming physical-chemical condition of Yangjingou gold deposit in eastern Yanbian area [J]. *Gold*, 2011, 32(12): 22–26.
- [12] 任云生, 王辉, 屈文俊, 等. 延边小西南岔铜金矿床辉钼矿 Re—Os 同位素测年及其地质意义[J]. *中国地质大学学报(地球科学)*, 2011, 36(4): 721–728.
- REN Yunsheng, WANG Hui, QU Wenjun, et al. Re—Os isotopic dating of molybdenite from Xiaoxi'nancha copper-gold deposit in the Yanbian area and its geological significance[J]. *Journal of China University of Geosciences (Earth Science)*, 2011, 36(4): 721–728.
- [13] MEN Lanjing, SUN Jinggui, ZHANG Zengjie, et al. An isotopic (Sr, Nd and Pb) tracer study on the Xiaoxinancha Gold-rich Copper Deposit in Yanbian, China: implication for the geodynamics model of diagenesis and metallogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2011, 85(1):175–188.
- [14] 孙景贵, 门兰静, 赵俊康, 等. 延边小西南岔大型富金铜矿床矿区内的暗色脉岩的锆石年代学及其地质意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 517–527.
- SUN Jinggui, MEN Lanjing, ZHAO Junkang, et al. Zircon chronology of melanocratic dykes in the district of the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 517–527.
- [15] 赵俊康, 孙景贵, 门兰静, 等. 小西南岔富金铜矿床流体包裹体中子矿物特征及意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(3): 384–388.
- ZHAO Junkang, SUN Jinggui, MEN Lanjing, et al. Characteristics and implications of daughter minerals in fluid inclusions of Xiaoxinancha gold-rich copper deposit[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(3): 384–388.
- [16] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481–492.
- HOU Kejun, LI Yanhe, TIAN Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481–492.
- [17] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon: a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1–35.
- [18] QI Liang, ZHOU Meifu. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2008, 248: 83–103.
- [19] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell Science Publisher, 1985.
- [20] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 3–107.
- [21] 刘锋, 杨富全, 毛景文, 等. 阿尔泰阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1416–1425.
- LIU Feng, YANG Fuquan, MAO Jingwen, et al. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite in Altay orogeny[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1416–1425.
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London, Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- [23] Weaver B L, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 1984, 310: 575.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 241–265.
- [25] Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: Longman Publishing Group, 1993: 80–142.
- [26] 彭玉鲸, 纪春华, 辛玉莲. 中俄朝毗邻地区古吉黑造山带岩石及年代记录[J]. *地质与资源*, 2002, 11(2): 65–75.
- PENG Yujing, JI Chunhua, XIN Yulian. Petrology and geochronology of the Paleo-Jilin-Heilongjiang orogenic belt in the adjacent areas of China, Russia, and Korea[J]. *Geology and Resources*, 2002, 11(2): 65–75.

- [27] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 174–180.  
SUN Deyou, WU Fuyuan, ZHANG Yanbin, et al. The final closing time of the west Lamulun River—Changchun—Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2): 174–180.
- [28] 曹花花. 珲春地区晚海西期辉长岩—闪长岩的形成时代和地球化学[D]. 长春: 吉林大学地球科学学院, 2010: 1–67.  
CAO Huahua. Chronology and geochemistry of Late Hercynian gabbro and diorite in Hunchun area[D]. Changchun: Jilin University. College of Earth Science, 2010: 1–67.
- [29] 王挽琼, 刘正宏, 王兴安, 等. 内蒙古乌拉特中旗海西期黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1771–1780.  
WANG Wanqiong, LIU Zhenghong, WANG Xingan, et al. SHRIMP U-Pb dating of the zircon from the Hercynian biotite monzonitic granites in Urad Zhongqi, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1771–1780.
- [30] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal Petrology, 1984, 25(4): 956–983.
- [31] Pearce J A. Trace element Characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]. Chochester: Wiley, 1982: 525–548.
- [32] Woodhead J D, Fggins S M, Johnson R W. Magma genesis in the New Britain Island Arcs: Further insights into melting and mass transfer processes[J]. Journal Petrology, 1998, 39(9): 1641–1668.
- [33] 张炯飞, 祝洪臣. 延边地区花岗岩的成因类型及其形成的大地构造环境[J]. 辽宁地质, 2000, 17(1): 25–33.  
ZHANG Jiongfei, ZHU Hongchen. A preliminary study on the genetic types and tectonic setting of granite in Yanbian area[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(1): 25–33.
- [34] Briquieu L, Bougault H, Joron J L. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: Petrogenetic implications[J]. Earth Planet Sci Lett, 1984, 85: 384–400.
- [35] 郭光军, 王时麒. 河北围场小扣花营锰银矿床稀土元素地球化学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 510–518.  
GUO Guangjun, WANG Shilin. REE geochemistry of Xiaokouhuaying silver manganese deposit in Hebei Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 510–518.
- [36] 张东亮, 彭建堂, 符亚洲, 等. 湖南香花铺钨矿床含钙矿物的稀土元素地球化学[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 65–74.  
ZHANG Dongliang, PENG Jiantang, FU Yazhou, et al. Rare-earth element geochemistry in Ca-bearing minerals from the Xianghuapu tungsten deposit, Hunan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 65–74.
- [37] 刘琰, 邓军, 李潮峰, 等. 四川雪宝顶白钨矿稀土元素地球化学与 Sm-Nd 同位素定年[J]. 科学通报, 2007, 52(16): 1923–1928.  
LIU Yan, DENG Jun, LI Chaofeng, et al. REE geochemistry and Sm-Nd isotopic dating of scheelite from the Xuebaoding deposit in Sichuan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(16): 1923–1928.
- [38] 熊德信, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素组成特征及其意义[J]. 岩石学报, 2010, 22(3): 733–741.  
XIONG Dexin, SUN Xiaoming, SHI Guiyong, et al. Trace elements, rare earth elements (REE) and Nd-Sr isotopic compositions in scheelites and their implications for the mineralization in Daping gold mine in Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 22(3): 733–741.

(编辑 赵俊)