

doi:10.3799/dqkx.2017.557

# 湘东锡田燕山期 A 型花岗岩黑云母矿物 化学特征及其成岩成矿意义

周 云<sup>1,2</sup>, 梁新权<sup>3</sup>, 蔡永丰<sup>1,2</sup>, 付 伟<sup>1,2</sup>

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004

2. 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西桂林 541004

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

**摘要:** 黑云母的化学组成特征对揭示花岗岩的源区特征、形成环境、后期热液作用以及成矿元素富集特征具有重要的指示意义。对与锡田钨锡多金属矿床成矿作用密切相关的锡田燕山早期花岗岩黑云母和长石成分进行了系统的电子探针分析。分析结果表明, 黑云母具有富铁贫镁、高铝低钠的特征, 其 MgO 和 FeO<sup>T</sup> 含量分别为 0.12%~1.35% 和 15.47%~23.24%, 类似于高铁黑云母; 其含铁指数 Fe/(Fe+Mg) 较高, 集中在 0.87~0.99, 属于铁叶云母; 其长石主要以正长石和钠长石为主。这些特征暗示了寄主岩源区以壳源为主。结合相关区域地质资料, 表明锡田燕山早期花岗质岩浆具有较高的温度和较低的氧逸度。黑云母具有高的含铁指数、较高的结晶温度和低的氧逸度等特征均有利于锡成矿, 可以作为勘探锡矿的标志之一。综合分析认为, 在锡田花岗质岩浆演化过程中, 岩浆结晶期后分异出的流体趋向于向富锡的方向演化, 是锡田多金属矿床成矿流体的重要来源。

**关键词:** 黑云母; 矿物成分; 成岩成矿; 花岗岩; 锡田钨锡多金属矿床; 地球化学。

中图分类号: P57

文章编号: 1000-2383(2017)10-1647-11

收稿日期: 2017-01-16

## Petrogenesis and Mineralization of Xitian Tin-Tungsten Polymetallic Deposit: Constraints from Mineral Chemistry of Biotite from Xitian A-Type Granite, Eastern Hunan Province

Zhou Yun<sup>1,2</sup>, Liang Xinquan<sup>3</sup>, Cai Yongfeng<sup>1,2</sup>, Fu Wei<sup>1,2</sup>

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials, Guilin 541004, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Chemical composition of biotite is always used to reveal source characteristics, tectonic environment, late hydrothermal process and enrichment of ore-forming elements. The Xitian tin-tungsten polymetallic deposit is one of the most important polygenetic compound deposits in South China. This study presents detailed mineral composition of biotites and feldspars from Xitian granite, which is closely related to the formation of the deposit. Electron microprobe analyzer (EMPA) analysis indicates that the biotites have low MgO (0.12%–1.35%) and high FeO<sup>T</sup> (15.47%–23.24%) contents with Fe/(Fe+Mg) ratios of 0.87 to 0.99, resembling to those of siderophyllite. These features indicate that their host rocks were mainly derived from partial melting of crustal materials. Estimation results of crystallization temperatures and oxygen fugacity suggest that the Xitian granite has high crystallization temperatures and low oxygen fugacities. Therefore, it is proposed that hydrothermal fluids during the late stage of magmatic evolution are favour of Sn enrichment. These hydrothermal fluids could be an important source of

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.41503021,41502180); 广西高等学校科学研究项目重点项目(No.KY2015ZD052); 广西自然科学基金项目(Nos.2015GXNSFBA139204,2014GXNSFAA118304); 国土资源部公益科研专项(No.201211024-03); 桂林理工大学科研启动费资助项目(No. 002401003472)。

**作者简介:** 周云(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事构造地质学及地球化学研究工作。ORCID: 0000-0001-9688-6659。

E-mail: zhouyun@glut.edu.cn

**引用格式:** 周云, 梁新权, 蔡永丰, 等, 2017. 湘东锡田燕山期 A 型花岗岩黑云母矿物化学特征及其成岩成矿意义. 地球科学, 42(10): 1647-1657.

ore-forming fluids. High iron indexes and crystallization temperatures and low oxygen fugacities in the ore-forming system are favorable for mineralization of Xitian tin-tungsten deposit.

**Key words:** biotite; mineral composition; petrogenesis and mineralization; granite; Xitian tin-tungsten polymetallic deposit; geochemistry.

华南地区分布有大量矿床(胡开明等, 2016; Cai *et al.*, 2017), 其中众多矿床具有多成因矿床的特征. 位于湘东的锡田钨锡多金属矿床具有多成因类型、多控矿因素、多成矿作用和多成矿物质来源等特征(付建明等, 2009, 2012; 伍式崇等, 2012). 前人对锡田燕山早期花岗岩的锆石 U-Pb、全岩 Rb-Sr、矿物 Re-Os 和  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  等定年结果表明其形成时代与钨锡矿体的形成年龄一致, 约为 150 Ma(付建明等, 2009, 2012); 锡田燕山早期花岗岩与北北东向展布的十万大山—杭州带(简称“十杭带”)内出露的大量 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征(李兆丽等, 2006; 蒋少涌等, 2008; Jiang *et al.*, 2009), 属于 A 型花岗岩(周云等, 2013); 锡田燕山期花岗岩具有较高的 Sn 含量, 显示出良好的 Sn 成矿性, 属于典型的含锡花岗岩; 该岩体是本区穹窿构造的重要组成部分, 控制了燕山期花岗岩与围岩接触带矽卡岩型矿体的分布形式(伍式崇等, 2004, 2012). 尽管前人对锡田燕山早期花岗岩的地球化学和年代学特征、岩石成因、形成环境、构造形式及其与成矿作用关系等方面展开了研究工作, 但目前仍缺乏有关锡田燕山早期花岗岩的矿物学资料. 黑云母作为花岗岩中含量最高的暗色矿物, 其化学组成特征对揭示花岗岩的源区特征、形成环境、后期热液作用以及成矿元素富集特征具有重要的指示意义, 是研究岩石成岩过程、成岩温压条件的理想对象(Wones and Eugster, 1965; Abdel-Rahman, 1994; Shabani *et al.*, 2003; René *et al.*, 2008). 本文借助电子探针对锡田燕山早期花岗岩黑云母矿物化学成分进行了系统的研究, 试图从矿物学的角度揭示出在构造—岩浆作用与成岩成矿过程中黑云母成分的演化特征.

## 1 地质背景

锡田岩体位于湖南省株洲市茶陵县, 构造位置上处于郴州—临武断裂东南侧. 锡田所在地区的褶皱基底形成于加里东晚期, 是华南复式岩石圈中克拉通化年代最新、变质程度最低、刚性较弱的地区, 因而本区广泛发生构造—岩浆活动; 同时本区还发

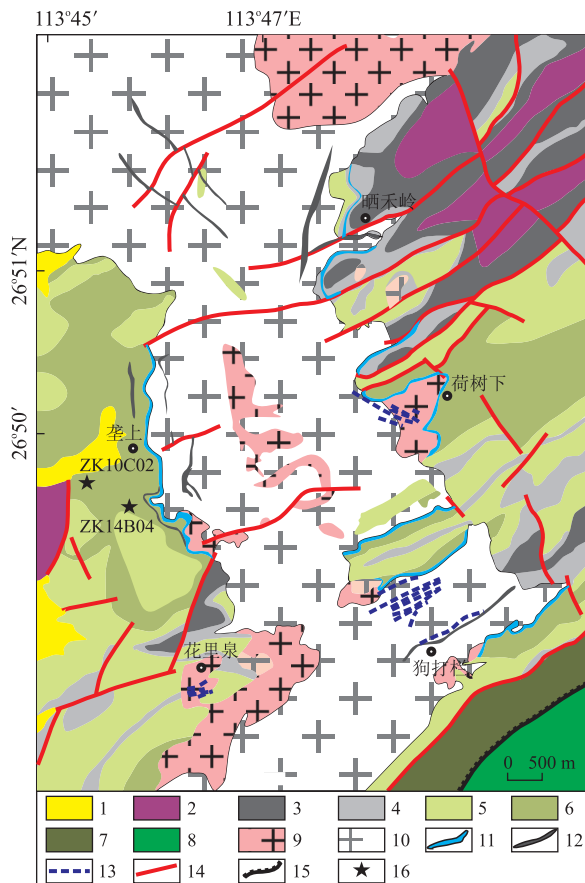


图 1 锡田钨锡多金属矿床地质简图

Fig. 1 Geological schematic map of Xitian tin-tungsten polymetallic deposit

图 1 据伍式崇等(2009). 1. 第四系; 2. 岩关阶( $C_{1y}$ ); 3. 锡矿山组下段( $D_3x^2$ ); 4. 锡矿山组上段( $D_3x^1$ ); 5. 余田桥组( $D_3s$ ); 6. 棋梓桥组( $D_2q$ ); 7. 跳马涧组( $D_2t$ ); 8. 奥陶系上统( $O_3$ ); 9. 燕山早期细粒黑(二)云母花岗岩( $\gamma_5^2$ ); 10. 印支期中粒斑状黑云母花岗岩( $\gamma_5^1$ ); 11. 矽卡岩型钨锡多金属矿体; 12. 破碎带蚀变岩型钨锡多金属矿脉; 13. 石英脉—云英岩型钨锡矿脉; 14. 断层; 15. 不整合地质界线; 16. 采样位置

育有巨厚层的浅变质褶皱基底岩系和以碳酸盐台地相为主的地台盖层, 并出现泥盆纪、石炭纪—二叠纪断裂谷(伍式崇等, 2012). 锡田岩体为印支期—燕山期岩浆侵入形成的复式花岗岩体, 长轴方向呈北北西向展布, 平面上呈中间小而两端大的“哑铃状”(图 1). 岩体出露总面积为 230 km<sup>2</sup>, 有大小侵入体共 40 余个(付建明等, 2009). 岩体侵位于北北西向基底构造与后期北东向构造交汇部位, 受两组构造体系联

合控制,岩体总体走向  $330^{\circ}$ ,与奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系呈侵入接触,接触界线弯曲,接触面倾向围岩,倾角  $15^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。岩体中岩脉发育,主要受 NE 向断裂控制,少部分呈 NW 向展布,多数成群成组产出。印支期侵入体主要由中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒少斑状黑云母二(正)长花岗岩组成,呈岩基产出,其形成时代约为 230 Ma(付建明等,2009),具有弱过铝质特征(伍式崇等,2009),这一时期对应的成矿作用形成的矿石矿物组合主要为锡石—黑钨矿—白钨矿(伍式崇等,2009)。燕山早期侵入体多呈岩株、岩瘤、岩枝产出,以细粒含斑黑云母花岗岩为主,岩石为斑状结构,块状构造;斑晶为钾长石,含量约为 5%;基质主要由石英(28%~30%)、钾长石(28%~38%)、斜长石(25%~30%)、黑云母(5%~12%)、白云母( $\leq 1\%$ )、锆石(0.1%~0.2%)、萤石( $\leq 0.1\%$ )组成(周云等,2013),其形时代主要约为 150 Ma(周云等,2013);岩石呈强过铝质,属于铝质 A 型花岗岩,这一阶段相应的成矿作用形成的主要矿石矿物组合为锡石—黄铁矿—黄铜矿—闪锌矿—磁黄铁矿—方铅矿(伍式崇等,2009)。少量燕山晚期侵入体呈小岩株产出,岩性为细粒斑状二云母花岗岩,其形成时代约为 114 Ma(全岩 Rb-Sr 等时线年龄),与这一时期相关的成矿作用形成的矿石矿物组合为钛铁矿—赤铁矿—褐铁矿(伍式崇等,2009)。

由于多期次的岩浆热液活动,本区围岩蚀变和矿化也表现出多阶段性,岩体外接触带广泛发育围岩蚀变,主要表现为矽卡岩化、角岩化、硅化、大理岩化和绿泥石化等,其中矽卡岩化与成矿关系最为密切。在岩体接触带及其构造—层间破碎带中形成不同种类的矽卡岩,并伴有钨锡铅锌矿化,在有利部位形成钨锡铅锌矿体(付建明等,2009;伍式崇等,2009)。区内断裂构造亦具有多期次活动特点,构造以 NE-NEE 向压扭性断裂为主,控制着钨锡矿带的产出,其次为 NNW 向张扭性断裂。褶皱构造有严塘复式向斜和小田复式向斜,均由一系列相间排列的次级背向斜组成。其中严塘复式向斜位于锡田岩体西侧,北东扬起、南西倾伏,小田复式向斜位于锡田岩体东侧,南西扬起、北东倾伏。次级向斜对应岩体的凹陷部位,其中心部位形成较厚大的钨锡矿体;次级背斜对应岩体的凸起部位。

本区主要成矿作用为花岗岩浆接触交代作用和气成—热液作用,接触交代作用印支期表现为花岗岩与碳酸盐岩接触部位形成了厚大的钨锡矿化矽卡

岩,燕山早期表现为花岗岩的侵入,使成矿物质进一步富集,在接触带矽卡岩及层间破碎带等成矿有利部位形成了矽卡岩型钨锡矿体(伍式崇等,2009)。付建明等(2012)认为这类矿体并不是与印支期花岗岩有关的矽卡岩期形成的,矽卡岩可能是赋矿围岩或仅仅形成钨锡矿化,不构成工业矿体,主要矿体可能是燕山早期岩浆活动形成的含矿热液叠加改造的结果。

## 2 样品的采集与分析

挑选出来的黑云母矿物来源于燕山期花岗岩,分别来自钻孔 ZK10C02 细粒斑状花岗岩和 ZK14B04 粗粒斑状花岗岩中,其显微镜下特征如图 2 所示,为自形—半自形、片状黑云母,镜下呈褐色—褐黄色的多色性。岩石为似斑状结构,块状构造,斑晶为钾长石(粒径可达 4.5 mm),含量为 5%左右;基质由石英(20%~30%)、钾长石(25%~35%)、斜长石(20%~35%)、黑云母(5%~10%)、白云母( $\leq 1\%$ )等组成,副矿物主要有磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石等,其中可见磁铁矿与黑云母—钾长石—石英共生。

岩石光学薄片制定在中国科学院广州地球化学研究所磨片室完成,挑选新鲜的、具有代表性的薄片进行重新抛光,将其制成电子探针片,用于矿物化学组成分析。岩石薄片在中国科学院广州地球化学研究所显微镜室使用 Nikon 和 Leica 透射光显微镜进行镜下观察。黑云母主量元素测定在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,所用仪器为 JEOL JXA8100 型电子探针仪(Electron Probe Micro-Analyzer, EPMA)。测试条件为加速电压 15 kV,探针电流 20 nA,计数时间为 20 s,束斑直径  $1\ \mu\text{m}$ ;标样采用美国 SPI(Sales Performance International Greater China)公司的硅酸盐矿物及氧化物标样,校正方法为 ZAF(Atomic Number, Absorption and Fluorescence)修正法。长石主量元素测定在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成,所用仪器为 JEOL JXA8230 型电子探针仪(EPMA)。测试条件为加速电压 15 kV,探针电流  $2.0\times 10^{-8}$  nA,束斑直径  $5\ \mu\text{m}$ ;标样采用钠长石(Na, Si, Al)、磷灰石(Ca, P)、橄榄石(Mg)、镁橄榄石(Fe)、硅灰石(Mn)、金云母(K)和金红石(Ti),校正方法为 ZAF 修正法。

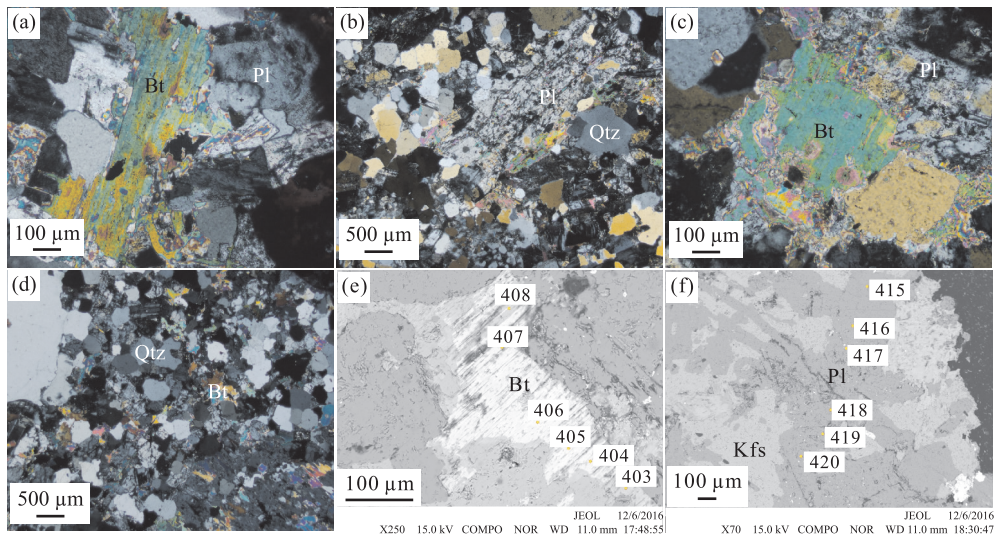
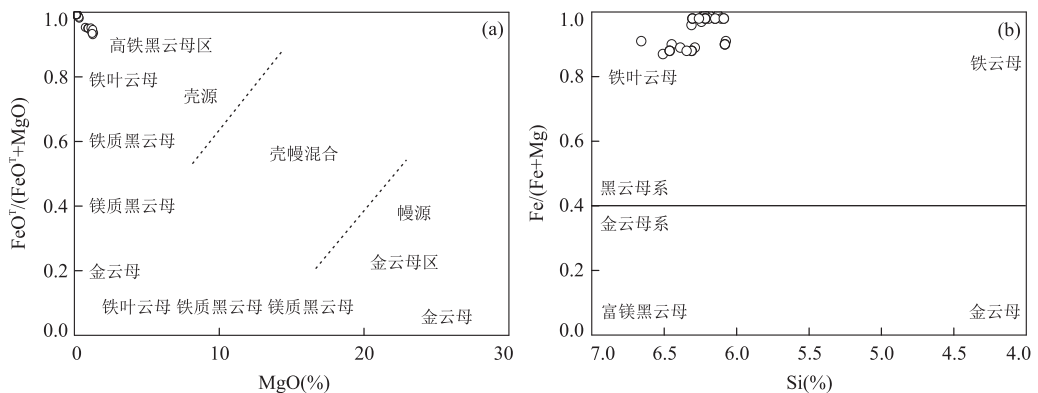


图 2 锡田燕山早期花岗岩显微照片(a~d)及背散射图像(e~f)

Fig.2 Microscope (a-d) and BSE (e-f) photographs of Xitian granite

Bt.黑云母;Pl.斜长石;Kfs.钾长石;Qtz.石英

图 3 锡田燕山早期花岗岩黑云母(a)  $MgO-FeO^T/(FeO^T+MgO)$  和(b)  $Si-Fe/(Fe+Mg)$  图解Fig.3 Plots of (a)  $MgO-FeO^T/(FeO^T+MgO)$  and (b)  $Si-Fe/(Fe+Mg)$  of biotite from Xitian granite图 a 据周作侠(1988);图 b 据 Rieder *et al.*(1998)

### 3 黑云母、长石矿物化学特征

黑云母的  $Fe^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  值采用林文蔚和彭丽君(1994)的计算方法获得,黑云母的结构式以(O, OH, F/2, Cl/2)为 24 计算的阳离子数,其化学成分分析见表 1。

由表 1 可以看出,锡田燕山早期花岗岩中的黑云母富硅、铝、铁、钾,相对贫锰、镁、钙、钠等,其  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $FeO^T$ 、 $K_2O$  含量分别为 37.34%~42.05%、19.53%~23.53%、15.47%~23.24% 和 9.61%~10.87%,平均含量分别为 39.00%、21.88%、20.17% 和 10.20%,  $MnO$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  及  $Na_2O$  含量分别为 0.26%~1.14%、0.12%~1.35%、0.01%~0.23% 和 0.07%~0.45%,平均含

量分别为 0.47%、0.58%、0.09% 和 0.16%。本区黑云母的  $Fe/(Fe+Mg)$  比值变化范围小,为 0.87~0.99。依据 Rieder *et al.*(1998)提出的黑云母命名方法,并结合相关图解对黑云母进行分类,结果表明本区黑云母属于富铁黑云母(图 3a),富铁黑云母可进一步分为铁黑云母和铁叶云母两种类型,在  $Si-Fe/(Fe+Mg)$  图解中可以看出本区黑云母属于铁叶云母(图 3b)。

长石以 32 个氧原子为基础的阴离子数计算的阳离子数,其化学成分分析见表 2。由表 2 看出锡田燕山早期花岗岩中的碱性长石  $K_2O$  含量为 15.90%~17.38%,  $Na_2O$  含量为 0.29%~1.18%,  $CaO$  含量为 0.04%~0.17%,其端员组分 Or 为 89.4%~97.2%, Ab 为 2.4%~10.1%, An 为



表 2 锡田燕山早期花岗岩长石成分 (%)

Table 2 Composition of feldspar from Xitian granite (%)

样品	ZK10C02-20			ZK10C02-30						ZK14B04-12						
SiO <sub>2</sub>	68.10	67.20	62.67	63.18	64.16	61.43	64.16	62.40	64.08	63.40	67.88	67.82	67.60	66.35	67.46	66.73
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.00	0.01	0.26	0.01	0.01	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.43	18.66	17.24	17.06	17.99	17.12	17.89	17.12	17.87	17.91	18.92	19.11	19.11	18.37	18.48	18.70
FeO	0.08	0.00	0.06	0.01	0.02	0.11	0.05	0.05	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01
MnO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.03	0.05	0.00	0.03	0.02
MgO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03
CaO	0.27	0.06	0.11	0.07	0.04	0.17	0.12	0.11	0.06	0.06	0.06	0.80	0.37	0.18	0.14	0.52
Na <sub>2</sub> O	10.71	10.61	1.18	0.29	0.84	0.44	0.38	0.87	0.33	0.83	11.07	11.23	10.47	10.38	10.71	10.52
K <sub>2</sub> O	0.14	0.21	15.90	17.38	16.78	14.98	17.36	16.42	17.34	16.58	0.15	0.25	0.14	0.20	0.17	0.21
Total	98.74	96.75	97.16	98.02	99.85	94.31	100.00	97.04	99.74	98.80	98.12	99.55	97.77	95.57	97.03	96.75
Si	12.01	12.09	11.99	12.03	11.96	12.03	11.96	11.98	11.97	11.94	12.06	11.94	12.04	12.09	12.11	12.03
Al	4.04	3.95	3.88	3.83	3.95	3.95	3.93	3.87	3.93	3.97	3.96	3.96	4.01	3.94	3.91	3.97
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.15	0.07	0.04	0.03	0.10
Na	3.66	3.70	0.44	0.11	0.30	0.17	0.14	0.32	0.12	0.30	3.81	3.83	3.61	3.67	3.73	3.68
K	0.03	0.05	3.88	4.22	3.99	3.74	4.13	4.02	4.13	3.98	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05
Ab	97.8	98.4	10.1	2.4	7.1	4.2	3.2	7.4	2.8	7.1	98.8	94.9	97.3	97.8	98.3	96.2
An	1.4	0.3	0.5	0.3	0.2	0.9	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3	3.7	1.9	0.9	0.7	2.6
Or	0.8	1.3	89.4	97.2	92.7	94.9	96.2	92.1	96.9	92.7	0.9	1.4	0.9	1.2	1.0	1.2

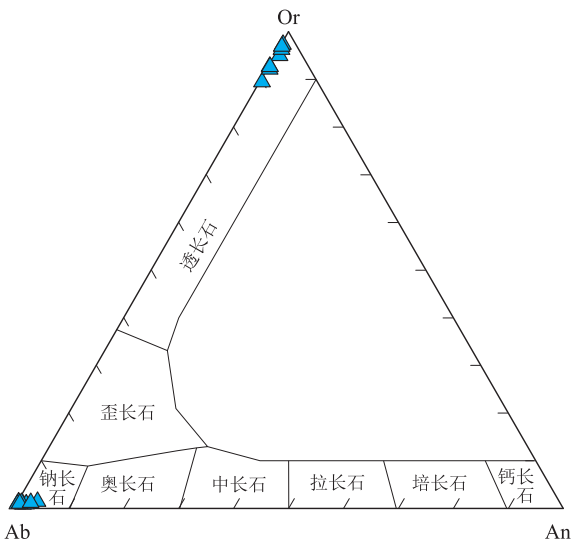


图 4 锡田燕山早期花岗岩长石 Or-Ab-An 图解

Fig.4 Plot of Or-Ab-An of feldspar from Xitian granite

0.2%~0.9%，端员组分主要为 Or, Ab 和 An 组分含量低。斜长石 K<sub>2</sub>O 的含量为 0.14%~0.25%，Na<sub>2</sub>O 含量为 10.38%~11.23%，CaO 含量为 0.06%~0.52%，其端员组分 Or 为 0.8%~1.4%，Ab 为 94.9%~98.8%，An 为 0.3%~3.7%，端员组分主要为 Ab, Or 和 An 组分含量低。在长石分类图 (图 4) 中，可以看出碱性长石主要为正长石，斜长石主要为钠长石。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因及源区特征

研究表明, S 型花岗岩中的黑云母具有富铝的特征, I 型花岗岩中的黑云母相对富镁, A 型花岗岩中的黑云母则明显富铁 (Abdel-Rahman, 1994)。A 型花岗岩一般被认为形成于拉张环境 (Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992), 并且通常是同一地区岩浆演化到较晚阶段的产物 (顾连兴, 1990), 由于其岩浆具有贫水特征, 故黑云母、钠闪石-钠铁闪石、霓石等镁铁矿物常呈他形产出, 且结晶晚于长石和石英。锡田燕山早期花岗岩黑云母具有富铁贫镁的特征, 不同于 I 型花岗岩中黑云母; 在镜下可观察到黑云母包含长石, 为岩浆结晶晚期的产物, 这些特征与 A 型花岗岩黑云母特征相似。此外, 锡田燕山早期花岗岩黑云母还具有高的  $FeO^T/(FeO^T + MgO)$  值 ( $>0.87$ )、较低氧逸度 (见下文) 等特征, 与“还原型” A 型花岗岩黑云母特征一致 (Dall' Agnol *et al.*, 1999; Frost *et al.*, 1999)。因此, 锡田燕山早期花岗岩黑云母成分反映出其寄主岩石类型应该是 A 型花岗岩, 这也与近年对锡田燕山早期花岗岩地球化学的研究认为其属于 A 型花岗岩的结论一致 (周云等, 2013)。

黑云母的化学组分主要受其物质来源的制约 (du Bray, 1994; Shabani *et al.*, 2003), 因此, 其化

学组分分析往往能指示寄主岩石的源区性质、成因特征以及成岩环境等 (Abdel-Rahman, 1994). 对于高分异岩浆或演化程度较高的地壳物质中的黑云母, 通常具有较低 MgO 含量 (<6%) 和较高的  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  比值, 而地幔来源的黑云母则具有较高的 MgO 含量 (>15%) 和较低的  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  比值 (周作侠, 1988; Lalonde and Bernard, 1993). 与俯冲作用相关形成的钙碱性岩石由于受俯冲流体的影响, 有利于磁铁矿的早期结晶, 晚期结晶的黑云母则具有相对富 Mg、Al 和贫 Ti 的特征. 非造山碱性花岗岩类由于产于高温、缺水环境, 不利于早期磁铁矿和钛铁氧化物的结晶, 而晚期结晶形成的黑云母具有富铁的特征 (Abdel-Rahman, 1994). 本文所研究的锡田燕山早期花岗岩中黑云母具有较低的 MgO 含量 (0.12%~1.22%) 和较高的  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  比值 (0.84~0.99), 暗示其源区应以壳源为主, 为晚期结晶的产物. 在相关图解中, 样品点也都落在了壳源区域范围内 (图 3a).

## 4.2 岩浆结晶物理化学条件

### 4.2.1 温度

黑云母的成分特征可以反映岩浆结晶时的温度、压力、氧逸度等物理化学条件. 高温高压实验表明, 黑云母中 Ti 元素的含量明显受岩浆结晶温度的影响 (de Albuquerque, 1973; Patio Dounce, 1993; René *et al.*, 2008), 因而黑云母中 Ti 元素的含量可以用来作为估计岩浆结晶温度的地质温度计 (King *et al.*, 1997; Henry and Guidotti, 2002). Henry *et al.* (2005) 对过铝质变质泥岩中的黑云母进行研究后提出了黑云母 Ti 饱和温度的计算公式. 由于过铝质岩浆与变质泥岩的平衡压力相当, 锡田燕山早期花岗岩表现出过铝质特征 (图 5), 因此, 理论上可以使用上述计算公式进行温度估算. 我们对本文研究的黑云母进行计算得到其温度均小于 600 °C (表 1). 由于锡田燕山早期花岗岩源区以壳源为主, 因而大部分样品具有很低的 MgO 含量和  $X_{\text{Mg}}$  值, 表明岩浆结晶晚期或后期交代作用使部分黑云母中的 Ti 发生了丢失或再平衡 (du Bray, 1994; Batchelor, 2003; Henry *et al.*, 2005), 因此, 上述计算出来的较低温度应该代表了后期热液交代的温度, 而不是岩浆结晶温度. 由此可以看出, 传统的根据黑云母成分来估算岩浆结晶温度的方法并不适用于本文, 周云等 (2013) 利用锆石饱和温度计对锡田燕山早期花岗岩的结晶温度进行了估算, 认为其成岩温度较高, 主要在 760~800 °C, 较高的成岩温度与前文讨论的锡田燕山早期花岗岩具有 A 型

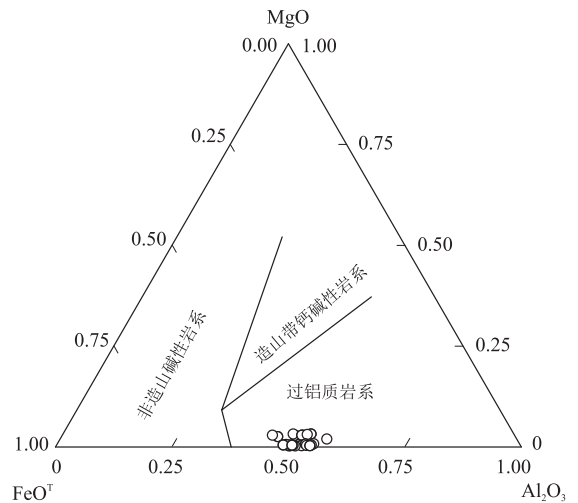


图 5 锡田燕山早期花岗岩黑云母  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$  图解  
Fig.5 Plot of  $\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}-\text{Al}_2\text{O}_3$  of biotite from Xitian granite  
据 Abdel-Rahman (1994)

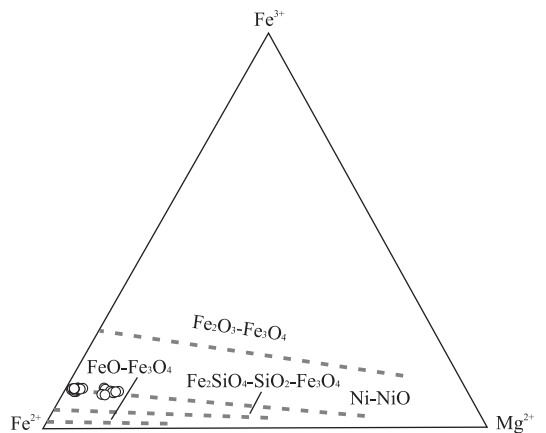


图 6 锡田燕山早期花岗岩黑云母  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  图解  
Fig.6 Plot of  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  of biotite from Xitian granite  
据 Wones and Eugster (1965)

花岗岩的特征一致.

### 4.2.2 氧逸度

Wones and Eugster (1965) 研究认为与钾长石和磁铁矿共生的黑云母中的  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  原子百分数可以用来定性评价黑云母结晶时的氧逸度, 并提出了黑云母的  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$  三角图解. 显微镜下观察显示锡田燕山早期花岗岩中的黑云母与钾长石、磁铁矿共生, 符合上述氧逸度评价的要求. 从图 6 中可以看出, 本文研究的黑云母样品主要落在了 Ni-NiO 缓冲线上, 表明本区黑云母是在较低氧逸度条件下结晶而成的.

## 4.3 成矿作用指示意义

锡田多金属矿床是近十多年来新发现的一个重要的大型成矿远景区, 是一个比较典型的多因复成矿床, 主要表现在以下几方面: 一是具有多个成矿大

地构造演化阶段.前人将其成矿作用分为 3 期,即早期(印支期)、中期(燕山早期)和晚期(表生期),多期次的成矿作用产生了矽卡岩型、蚀变破碎带型和云英岩型等不同类型的矿体.从早期到晚期,本区构造—动力环境从压性向张性转变,导致深部热—构造动力机制由热剧烈期转化为热衰减期(陈国达, 1996; 陈国达等, 2001, 2002; 甘成势等, 2016; 侯红星等, 2016; 冷秋锋等, 2016).本区经历的上述不同的大地构造演化阶段是其具有多因复成矿床特征的最关键因素.二是具有多成矿物质来源的特征.其成矿物质主要源于锡田复式岩体,其次来源于地层,多期次的岩浆活动使棋梓桥组和锡矿山组下段中的成矿元素活化而形成含矿热液(伍式崇等, 2004).三是其成因类型具有多样性.其主要有 4 种,即矽卡岩型、蚀变破碎带型、云英岩型和构造—矽卡岩复合型(罗洪文等, 2005),其中,矽卡岩型矿体呈层状和似层状产于花岗岩岩体与碳酸盐岩的接触带中;蚀变破碎带型矿体主要呈脉状或透镜状分布在岩体内部;云英岩型矿体则主要呈脉状产于岩体顶部的裂隙带;构造—矽卡岩复合型矿体主要呈透镜状、似层状或囊状产于受断裂控制的碳酸盐岩岩块内.四是具有多类控矿因素.NE 向褶皱隆起、NNW 向张扭性断裂以及岩体接触带、次级断裂、次级背斜轴部的虚脱部位等均控制着矿体的形态和产状(伍式崇等, 2004).五是具有多种成矿作用.其主要为岩浆接触交代作用和气成—热液作用,岩体与碳酸盐岩的接触交代作用产生了矽卡岩型锡钨矿体;热液成矿作用则以充填为主、交代为辅的热液矿化作用(罗洪文等, 2005).

黑云母由于具有特殊的层状结构,因此可以作为很多成矿元素(如 Sn、W、Cu 等)的载体并成为这些矿床的重要找矿标志,不同的矿化类型往往具有不同的黑云母化学组分特征(Kesler *et al.*, 1975; Feiss, 1978).锡田多金属矿床属于多因复成矿床,具有多期次(从印支期到燕山晚期)成矿等特征,尽管目前区域内尚缺少锡田印支期和燕山晚期花岗岩黑云母化学成分的资料,但本文对锡田主成矿期燕山早期花岗岩中的黑云母成分进行了系统的研究,可以为锡田钨锡多金属矿床的勘探提供以下线索:

(1) 锡田燕山早期黑云母具有高铁指数  $X_{Fe}$  ( $X_{Fe} = Fe / (Fe + Mg)$ ),特别是粗粒花岗岩中的黑云母  $X_{Fe}$  高达 0.99(表 1);此外,在不同矿化岩浆岩的云母成分图解中,本文样品落入或靠近锡钨稀土等含矿花岗岩铁质黑云母区域范围内(图 7),这些

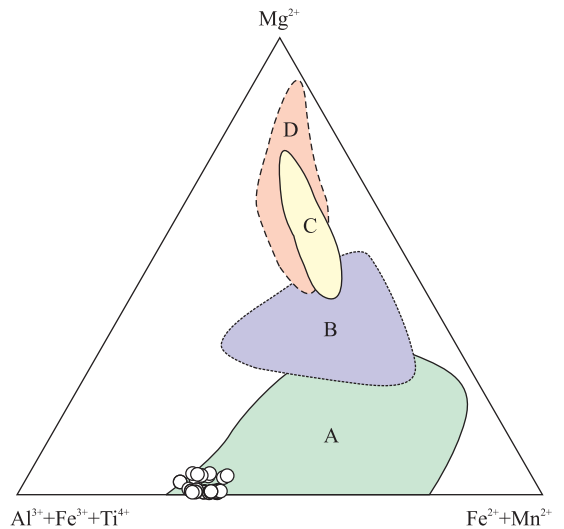


图 7 锡田燕山早期花岗岩黑云母  $Mg^{2+} - (Fe^{2+} + Mn^{2+}) - (Al^{3+} + Fe^{3+} + Ti^{3+})$  图解

Fig.7 Plot of  $Mg^{2+} - (Fe^{2+} + Mn^{2+}) - (Al^{3+} + Fe^{3+} + Ti^{3+})$  of biotite from Xitian granite

A. 锡钨稀土等含矿花岗岩中的铁质黑云母; B. 未发现矿化花岗岩中的黑云母; C. 与斑岩铜钨矿化有关的镁质黑云母; D. 与钼钛磁铁矿及矽卡岩铁矿有关的镁质黑云母

特征反映了其与钨锡矿化岩体有密切联系,这是因为各类岩体中镁铁云母类的含铁指数  $X_{Fe}$  与矿化具有密切联系,一般具有高铁指数 ( $X_{Fe} = 0.52 \sim 0.92$ ) 的镁铁云母斑岩体主要与钨锡矿化有关,少量与钼矿化有关;具有较高含铁指数 ( $X_{Fe} = 0.28 \sim 0.52$ ) 的镁铁云母主要赋存于铁矿化的岩体中;具有中等含铁指数 ( $X_{Fe} = 0.22 \sim 0.42$ ) 的镁铁云母主要与钼、铜、金矿化相关;而具有低含铁指数 ( $X_{Fe} = 0.05 \sim 0.15$ ) 的金云母则通常与含金刚石的金伯利岩相伴生;碳酸盐中的金云母含铁指数相对偏高,其  $X_{Fe}$  可达到 0.25,但不含矿(周作侠, 1988).因此,锡田燕山早期花岗岩中具有高铁指数的黑云母可以作为勘探钨锡矿床的标志之一.

(2) 温度和氧逸度是制约锡在流体/熔体间分配及锡成矿的重要因素(Stemprok, 1990; Linnen *et al.*, 1996).在高温还原环境中,锡具有强的亲铁性,且温度越高,还原作用越强,锡在金属相中的富集程度也越高(Wasson and Kallemeyn, 1988; Sylvester *et al.*, 1990).Stemprok(1990)在研究与花岗质岩浆活动相关的锡矿床时总结了温度与熔体中  $SnO_2$  浓度的函数关系,并认为熔体中的  $SnO_2$  浓度随温度的增加而升高.锡田燕山早期花岗岩具有较高的成岩温度(约  $760 \sim 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;周云等, 2013),反映前期熔体中的  $SnO_2$  浓度相对较高,随着后期成岩温度的降



低,锡易于分配进入流体相,有利于锡矿床的形成。

(3)相对于其他矿化金属元素(如 Cu),与 W、Sn 矿化相关的岩体通常具有较低的氧逸度,低氧逸度有利于锡等成矿物质的聚集并形成矿床,因而部分侵入岩在低氧逸度的条件下具备较大的成矿潜力(Wones, 1989)。Linnen *et al.*(1996)在研究人造花岗岩中氧逸度与 Sn 的关系时认为,在较高氧逸度条件下 Sn 以  $\text{Sn}^{4+}$  形式存在, $\text{Sn}^{4+}$  具有相对小的离子半径,故在岩浆结晶作用过程中易置换  $\text{Ti}^{4+}$  而富集在早期结晶的角闪石、黑云母、磁铁矿等镁铁质矿物中;在较低氧逸度环境中,Sn 则以  $\text{Sn}^{2+}$  形式存在, $\text{Sn}^{2+}$  离子半径相对较大,因而易于进入岩浆结晶分异晚期的流体和熔体中。由前文的讨论可知,锡田燕山早期花岗岩具有较低的氧逸度,因此 Sn 易于趋向分配进入流体相而有利于形成锡矿床。

## 5 结论

(1)锡田燕山早期花岗岩中的黑云母具有富铁贫镁的特征,其含铁指数高,属于铁叶云母;同时黑云母具有高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量,反映其寄主岩石类型为 A 型花岗岩,且寄主岩石的源区以壳源物质为主。

(2)黑云母化学组分特征表明其具有低的氧逸度。

(3)黑云母具有高含铁指数、较高的结晶温度以及低的氧逸度等特征有利于锡成矿,花岗质岩浆结晶期后分异出的岩浆热液是锡田多金属矿床成矿流体的重要来源。

致谢: 特别感谢 3 位匿名审稿人的宝贵意见和建议以及编辑的热情帮助,感谢“广西矿冶与环境科学实验中心”对本论文的资助,电子探针分析得到了中国科学院广州地球化学研究所陈林丽老师和桂林理工大学刘奕志老师的热情帮助,在此表示衷心感谢!

## References

Abdel-Rahman, A. F. M., 1994. Nature of Biotites from Alkaline, Calcalkaline and Peraluminous Magmas. *Journal of Petrology*, 35(2): 525—541.

Batchelor, R. A., 2003. Geochemistry of Biotite in Metabentonites as an Age Discriminant, Indicator of Regional Magma Sources and Potential Correlating Tool. *Mineralogical Magazine*, 67(4): 807—817.

Cai, Y. F., Feng, Z. H., Shao, T. B., et al., 2017. New Precise

Zircon U-Pb and Muscovite  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Late Cretaceous W-Sn Mineralization in the Shanhu Orefield, South China. *Ore Geology Reviews*, 84: 338—346.

Chen, G. D., 1996. DIWA THEORY—Outline on Activated Tectonics and Metallogenic Theoretic System. Central South University of Technology Press, Changsha, 193—206 (in Chinese).

Chen, G. D., Yang, X. Y., Liang, X. Q., 2001. Preliminary Studies of History-Dynamics of the South China Mobilized Region. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(3): 228—238 (in Chinese with English abstract).

Chen, G. D., Yang, X. Y., Liang, X. Q., 2002. Some Cruxes of Dynamics Study on Activated Region. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 320—331 (in Chinese with English abstract).

Dall'Agnol, R., Scaillet, B., Pichavant, M., 1999. An Experimental Study of a Lower Proterozoic A-Type Granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 40(11): 1673—1698.

de Albuquerque, C. A. R., 1973. Geochemistry of Biotites from Granitic Rocks, Northern Portugal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(7): 1779—1802.

du Bray, E. A., 1994. Compositions of Micas in Peraluminous Granitoids of the Eastern Arabian Shield: Implications for Petrogenesis and Tectonic Settings of Highly Evolved, Rare-Metal Enriched Granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 381—397.

Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20: 641—644.

Feiss, P. G., 1978. Magmatic Sources of Copper in Copper Deposits. *Economic Geology*, 73(3): 397—404.

Frost, C. D., Frost, B. R., Chamberlain, K. R., et al., 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman Batholith, SE Wyoming, USA: A Reduced, Rapakiv I-Type Anorogenic Granite. *Journal of Petrology*, 40(12): 1771—1802.

Fu, J. M., Cheng, S. B., Lu, Y. Y., et al., 2012. Geochronology of the Greisen-Quartz-Vein Type Tungsten-Tin Deposit and Its Host Granite in Xitian, Hunan Province. *Geology and Exploration*, 48(2): 313—320 (in Chinese with English abstract).

Fu, J. M., Wu, S. C., Xu, D. M., et al., 2009. Reconstraint from Zircon SHRIMP U-Pb Dating on the Age of Magma Intrusion and Mineralization in Xitian Tungsten-Tin Polymetallic Orefield, Eastern Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 1—7 (in Chinese with English abstract).

- Gan, C.S., Wang, Y.J., Cai, Y.F., et al., 2016. The Petrogenesis and Tectonic Implication of Wengong Intrusion in the Nanling Range. *Earth Science*, 41(1): 17–34 (in Chinese with English abstract).
- Gu, L.X., 1990. Geological Features, Petrogenesis and Metallogeny of A-Type Granites. *Geological Science and Technology Information*, 9(1): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Henry, D. J., Guidotti, C. V., 2002. Ti in Biotite from Metapelitic Rocks: Temperature Effects, Crystallochemical Controls and Petrologic Applications. *American Mineralogist*, 87(4): 375–382.
- Henry, D. J., Guidotti, C. V., Thomson, J. A., 2005. The Ti Saturation Surface for Low-to-Medium Pressure Metapelitic Biotites: Implications for Geothermometry and Ti-Substitution Mechanisms. *American Mineralogist*, 90: 316–328.
- Hou, H. X., Zhang, D. H., Zhang, R. Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at the East Qinling. *Earth Science*, 41(10): 1665–1682 (in Chinese with English abstract).
- Hu, K.M., Tang, Z.C., Meng, X.S., et al., 2016. Chronology of Petrogenesis and Mineralization of Datongkeng Porphyry W-Mo Deposit in West Zhejiang. *Earth Science*, 41(9): 1435–1450 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.Y., Zhao, K.D., Jiang, Y.H., et al., 2008. Characteristics and Genesis of Mesozoic A-Type Granites and Associated Mineral Deposits in the Southern Hunan and Northern Guangxi Provinces along the Shi-Hang Belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496–509 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Dai, B.Z., et al., 2009. Middle to Late Jurassic Felsic and Mafic Magmatism in Southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a Continental Arc to Rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204.
- Kesler, S.E., Issgonis, M.J., Brownlow, A.H., et al., 1975. Geochemistry of Biotites from Mineralized and Barren Intrusive Systems. *Economic Geology*, 70(3): 559–567.
- King, P.L., White, A.J.R., Chappell, B.W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391.
- Lalonde, A. E., Bernard, P., 1993. Composition and Color of Biotite from Granites: Two Useful Properties in Characterization of Plutonic Suites from the Hepburn Internal Zone of Wopmay Orogen, Northwest-Territories. *Canadian Mineralogist*, 31(1): 203–217.
- Leng, Q.F., Tang, J.X., Zheng, W.B., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotopic Compositions of the Ore-Bearing Porphyry in the Lakang'e Porphyry Cu-Mo Deposit, Tibet. *Earth Science*, 41(6): 999–1015 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.L., Hu, R.Z., Peng, J.T., et al., 2006. Helium Isotope Composition of Fluid Inclusions and the Origin of Ore-Forming Fluids of Furong Tin Orefield in Hunan Province, China. *Earth Science*, 31(1): 129–135 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W.W., Peng, L.J., 1994. The Estimation of Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> Contents in Amphibole and Biotite from EMPA Data. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 155–162 (in Chinese with English abstract).
- Linnen, R. L., Pichavant, M., Holtz, F., 1996. The Combined Effect of  $f_{O_2}$  and Melt Composition on SnO<sub>2</sub> Solubility and Tin Diffusivity in Haplogranitic Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(24): 4965–4976.
- Luo, H.W., Zeng, Q.W., Zeng, G.H., et al., 2005. Geological Characteristics and Origin of the Xitian Tin Orefield in Eastern Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 61–67 (in Chinese with English abstract).
- Patio Dounce, A. E., 1993. Titanium Substitution in Biotite: An Empirical Model with Applications to Thermometry, O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Barometries, and Consequences for Biotite Stability. *Chemical Geology*, 108(1–4): 133–162.
- René, M., Holtz, F., Luo, C.H., et al., 2008. Biotite Stability in Peraluminous Granitic Melts: Compositional Dependence and Application to the Generation of Two-Mica Granites in the South Bohemian Batholith (Bohemian Massif, Czech Republic). *Lithos*, 102(3–4): 538–553.
- Rieder, M., Cavazzini, G., D'Yakonov, Y. S., et al., 1998. Nomenclature of the Micas. *The Canadian Mineralogist*, 36: 905–912.
- Shabani, A. A. T., Lalonde, A. E., Whalen, J. B., 2003. Composition of Biotite from Granitic Rocks of the Canadian Appalachian Orogen: A Potential Tectonomagmatic Indicator? *Canadian Mineralogist*, 41(6): 1381–1396.
- Stemprok, M., 1990. Solubility of Tin, Tungsten and Molybdenum Oxides in Felsic Magmas. *Mineralium Deposita*, 25(3): 205–212.
- Sylvester, P.J., Ward, B.J., Grossman, L., et al., 1990. Chemical Compositions of Siderophile Element-Rich Opaque Assemblages in an Allende Inclusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3491–3508.
- Wasson, J.T., Kallemeyn, G.W., 1988. Compositions of Chon-

- drites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 325(1587): 535—544.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419.
- Wones, D.R., 1989. Significance of the Assemblage Titanite + Magnetite + Quartz in Granitic Rocks. *American Mineralogist*, 74: 744—749.
- Wones, D.R., Eugster, H.P., 1965. Stability of Biotite: Experiment, Theory and Application. *The American Mineralogist*, 50: 1228—1272.
- Wu, S.C., Hong, Q. H., Long, W. P., et al., 2009. Geological Features and Metallogenic Model of Xitian W-Sn Polymetallic Deposit, Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.C., Long, Z.Q., Xu, H.H., et al., 2012. Structural Characteristics and Prospecting Significance of the Xitian Tin-Tungsten Polymetallic Deposit, Hunan Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2): 217—226 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S.C., Luo, H. W., Huang, T., 2004. Metallogenetic Geological Characteristics and Prospecting of Tin-Polymetallic Deposits in Central Xitian Area, Eastern Hunan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 21—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Liang, X.Q., Liang, X.R., et al., 2013. Geochronology and Geochemical Characteristics of the Xitian Tungsten-Tin-Bearing A-Type Granites, Hunan Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(3): 511—529 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.X., 1988. Chemical Characteristics of Mafic Mica in Intrusive Rocks and Its Geological Meaning. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 63—73 (in Chinese with English abstract).
- 题. *地质科学*, 37(3): 320—331.
- 付建明, 程顺波, 卢友月, 等, 2012. 湖南锡田云英岩—石英脉型钨锡矿的形成时代及其赋矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质与勘探*, 48(2): 313—320.
- 付建明, 伍式崇, 徐德明, 等, 2009. 湘东锡田钨锡多金属矿床成岩成矿时代的再厘定. *华南地质与矿产*, (3): 1—7.
- 甘成势, 王岳军, 蔡永丰, 等, 2016. 南岭地区温公岩体的岩石成因及其构造指示. *地球科学*, 41(1): 17—34.
- 顾连兴, 1990. A 型花岗岩的特征、成因及成矿. *地质科技情报*, 9(1): 25—31.
- 侯红星, 张德会, 张荣臻, 2016. 东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. *地球科学*, 41(10): 1665—1682.
- 胡开明, 唐增才, 孟祥随, 等, 2016. 浙西大铜坑斑岩型钨钼矿床成岩成矿年代学. *地球科学*, 41(9): 1435—1450.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等, 2008. 十杭带湘南—桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4): 496—509.
- 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2016. 西藏拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床含矿斑岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. *地球科学*, 41(6): 999—1015.
- 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 等, 2006. 湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的 He 同位素组成及成矿流体来源示踪. *地球科学*, 31(1): 129—135.
- 林文蔚, 彭丽君, 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ . *长春地质学院学报*, 24(2): 155—162.
- 罗洪文, 曾钦旺, 曾桂华, 等, 2005. 湘东锡田锡矿田矿床地质特征及矿床成因. *华南地质与矿产*, (2): 61—67.
- 伍式崇, 洪庆辉, 龙伟平, 等, 2009. 湖南锡田钨锡多金属矿床成矿地质特征及成矿模式. *华南地质与矿产*, (2): 1—6.
- 伍式崇, 龙自强, 徐辉煌, 等, 2012. 湖南锡田钨锡多金属矿床成矿构造特征及其找矿意义. *大地构造与成矿学*, 36(2): 217—226.
- 伍式崇, 罗洪文, 黄韬, 2004. 锡田中部地区锡多金属矿成矿地质特征及找矿潜力. *华南地质与矿产*, (2): 21—26.
- 周云, 梁新权, 梁细荣, 等, 2013. 湖南锡田含 W-Sn A 型花岗岩年代学与地球化学特征. *大地构造与成矿学*, 37(3): 511—529.
- 周作侠, 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义. *岩石学报*, 4(3): 63—73.

## 附中文参考文献

- 陈国达, 1996. 地洼学说——活化构造及成矿理论体系概论. 长沙: 中南工业大学出版社, 193—206.
- 陈国达, 杨心宜, 梁新权, 2001. 中国华南活化区历史—动力学的初步研究. *大地构造与成矿学*, 25(3): 228—238.
- 陈国达, 杨心宜, 梁新权, 2002. 关于活化区动力学的几个问