

西藏尼雄矿田滚纠铁矿花岗闪长岩成因的 矿物化学证据

于玉帅^{1,2,3}, 杨竹森⁴, 高原⁵, 刘英超⁶, 田世洪⁴, 纪现华⁷

- (1. 武汉地质矿产研究所, 湖北武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北武汉 430205;
3. 东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室, 江西南昌 330013; 4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
5. 江西省地质调查院, 江西南昌 330201; 6. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
7. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

[摘要] 西藏尼雄矿田是冈底斯措勤—申扎铁铜多金属成矿带的重要组成部分。滚纠铁矿是尼雄矿田铁成矿作用的典型代表, 其中花岗闪长岩和二长花岗岩与成矿作用关系密切。本文从矿物学角度出发, 在详细薄片鉴定基础上, 对花岗闪长岩中角闪石和黑云母进行电子探针化学成分分析, 进而恢复岩浆源区性质、揭示岩浆侵位结晶的物理化学条件, 探索岩浆热液体系与成矿作用之间的内在联系。电子探针成分分析显示角闪石贫 Ti, 富 Mg, 属镁角闪石; 黑云母富 Mg, 为镁质黑云母, 是典型的岩浆黑云母; 角闪石和黑云母中 F 含量较高, 分别为 0.33 和 0.53。分析结果指示花岗闪长岩为钙碱性 I 型花岗岩, 岩浆源区具有壳幔混源的特点, 形成于高温 630~680℃、高氧逸度 $\log f_{O_2} = -14 \sim -16$ 和 $1.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8$ Pa 的压力条件下。

[关键词] 成因矿物学 花岗闪长岩 滚纠铁矿 尼雄矿田 西藏

[中图分类号] P575.1; P581

[文献标识码] A **[文章编号]** 0495-5331(2013)05-0897-10

Yu Yu-shuai, Yang Zhu-sen, Gao Yuan, Liu Ying-chao, Tian Shi-hong, Ji Xian-hua. Genesis of granodiorite in the Gunjiu iron deposit of the Nixiong ore field, Tibet: Evidence from mineral chemistry[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(5): 0897-0906.

“成因矿物学”是以矿物晶体化学分类为基础, 探索矿物属性与成因之间变化规律的一门地球科学分支学科, 是揭示岩石和矿床成因的指示剂(陈光远等, 1987)。角闪石和黑云母作为花岗岩类最主要的造岩矿物之一, 其化学成分的变化不仅记录了岩浆的起源、演化、侵位结晶时的物理化学变化, 有时还蕴藏着成矿作用的相关信息(Wones *et al.*, 1965; Kesler *et al.*, 1975; Schmidt, 1992; Abdel-Rahman, 1994; Finch *et al.*, 1995; Ma *et al.*, 2000; 陈光远等, 1987; 杨文金等, 1986, 1988; 李鸿莉等, 2007)。

近年实施的国土资源大调查显示冈底斯铁铜多金属成矿带成矿远景巨大, 其中尼雄铁铜矿田、落布勒、隆格尔、敌布错、大架夏玛、俄阿次尔等矿床均已达到大—中型规模。尼雄矿田是中生代 Fe—Cu 成

矿事件的典型代表, 相对于著名的冈底斯斑岩铜矿带, 该成矿带尚处于研究的起始阶段, 其中争论的焦点是成矿的地球动力学背景(Zhu *et al.*, 2009 和 2011; 曲晓明等, 2006; 辛洪波等, 2007; 曹圣华等, 2007; 于玉帅等 2011; 张晓倩等, 2010)。本文从成因矿物学角度出发, 在解剖尼雄矿田滚纠铁矿主要成矿岩体花岗闪长岩的基础上, 恢复岩浆源区性质、揭示岩浆侵位结晶的物理化学条件, 探索岩浆热液体系与成矿作用之间的内在联系, 为研究成岩、成矿地球动力学机制提供详实的矿物学资料。

1 区域地质特征

尼雄矿田位于冈底斯中北部隆格尔—工布江达断隆带西段, 是措勤—申扎铁铜多金属成矿带的重

[收稿日期] 2013-01-29; **[修订日期]** 2013-05-21; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB01A04)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2011CB403100 和 2009CB421007)、地质调查计划项目(1212010918014)、国际地质对比计划(IGCP-600)、东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室开放基金项目(NRE1206)联合资助。

[第一作者] 于玉帅(1985 年—), 男, 2011 年毕业于中国地质科学院, 获硕士学位, 研究实习员, 从事地质找矿与矿床学研究。E-mail: shuaiyuyu1103@163.com。

要组成部分。受古特提斯、特提斯洋演化作用控制,形成了区域北西西向展布的中生代革吉-措勤复合弧后盆地、隆格尔-工布江达断隆带。研究区处于隆格尔-南木林地层分区,出露古生代石炭纪到新生代第四纪地层,由老到新依次为古生代早石炭世永珠组(C_1y)、晚石炭世拉嘎组(C_2-P_1l)、早二叠世昂杰组(P_1a)、中二叠世下拉组(P_2x)、晚二叠世敌布错组(P_3d)、早白垩世则弄群(K_1Z)以及古近纪林子宗群和第四纪等,缺失三叠纪、侏罗纪地层。区内构造变形由南至北显示出由强变弱的趋势,并且北西西向构造多为挤压变形,北西、北东向构造多呈走滑特征,由于不同时代的地层经历的构造运动差异,区内古生代地层褶皱变形强烈,白垩纪以来的地层变形逐渐变弱。燕山晚期中酸性岩浆活动强烈,

岩浆沿区域北西向断裂构造侵位形成花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长斑岩等。燕山晚期强烈的中酸性岩浆活动、丰富的构造系统以及有利的地层条件为区内矽卡岩型、斑岩型等矿床的发育提供了良好的地质条件。

2 矿床地质特征

尼雄矿田位于措勤县城西南约 60km,尼雄铁矿田长约 40km,宽约 10km,北西-南东向依次展布有滚纠铁矿区、尼雄铁矿区、沙松南铁矿区、毛加咪铁矿区及日阿铜矿区等,外围尚有窝藏、雨拉、祝弄拉、拉不拉、阿若和俄加等 6 处磁铁矿点和敌布错、格尔耿、德能等 6 处铜铅锌银多金属矿化点。

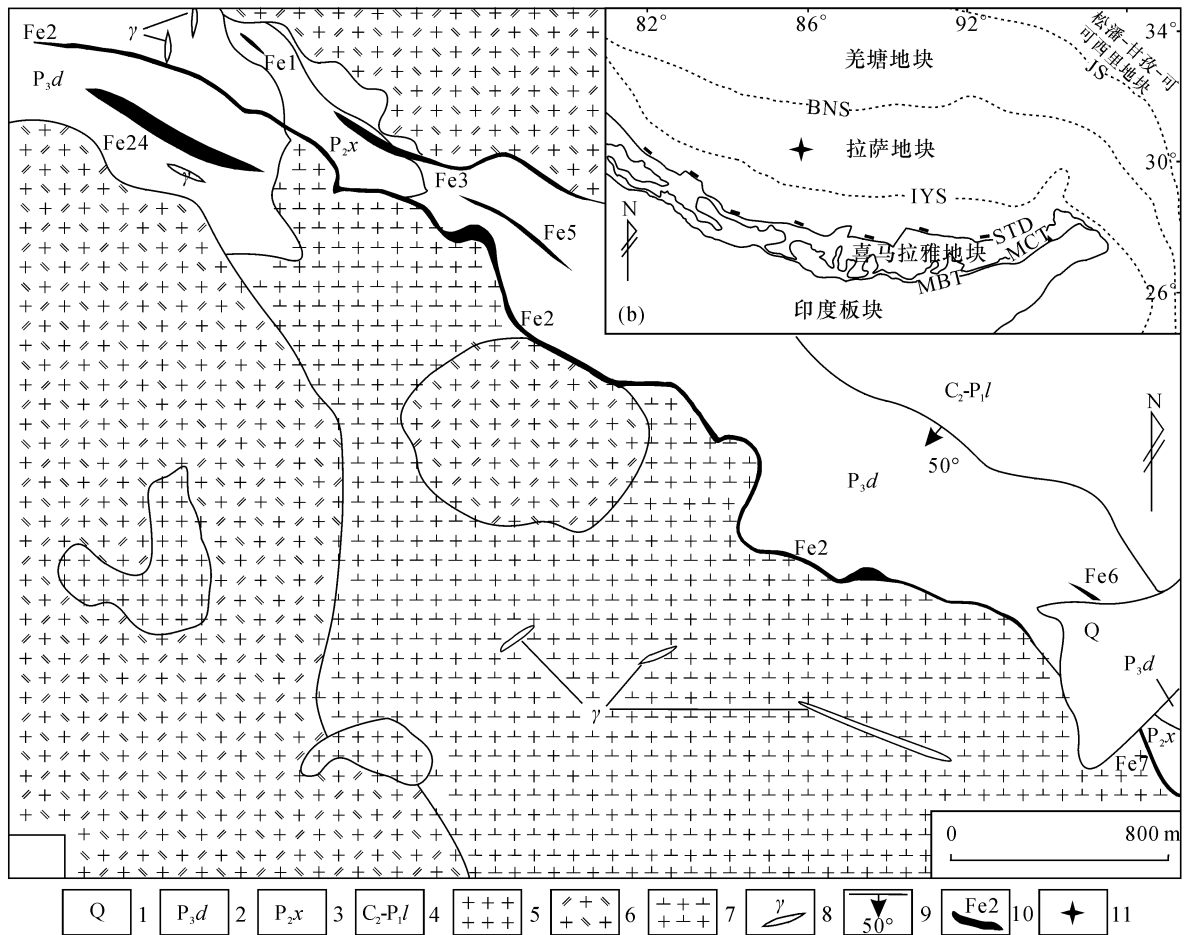


图 1 滚纠铁矿区地质简图(据于玉帅等,2011)

Fig. 1 Geological sketch of the Gunjiu iron ore district (after Yu *et al.*, 2011)

1 - 第四系; 2 - 敌布错组; 3 - 下拉组; 4 - 拉嘎组; 5 - 花岗岩; 6 - 二长花岗岩; 7 - 花岗闪长岩; 8 - 酸性岩脉;
9 - 断层及产状; 10 - 矿体及编号; 11 - 矿区位置

JS - 金沙江缝合线; BNS - 班公湖-怒江缝合线; IYS - 印度河-雅鲁藏布江缝合线; STD - 藏南拆离系;
MCT - 主中央逆冲断裂; MBT - 主边界逆冲断裂

1 - Quaternary; 2 - Dibuco Formation; 3 - Xiala Formation; 4 - Laga Formation; 5 - granite; 6 - monzonitic granite;

7 - granodiorite; 8 - acid vein; 9 - fault and its occurrence; 10 - ore body and its number; 11 - ore district location

JS - Jinsha River suture; BNS - Bangong - Nujiang suture; IYS - Indus River - Yarlungzangbo suture; STD - South Tibetan detachment system;

MCT - Main Central thrust; MBT - Main Boundary thrust

滚纠铁矿是尼雄矿田铁成矿作用的典型代表,矿区主要出露下石炭统-上二叠统海相沉积地层和第四系堆积物,自下而上依次为:拉嘎组(C_2-P_1l)、下拉组(P_2x)、敌布错组(P_3d),其中下拉组和敌布错组与成矿关系密切。矿区岩浆侵入活动强烈,沿矿区 NWW 向断裂呈串珠状侵位,形成中细粒黑云花岗岩闪长岩、中细粒黑云二长花岗岩、细粒斑状花岗岩及少量酸性岩脉。岩体与围岩接触带及其附近围岩蚀变强烈,发育明显的角岩化、大理岩化、矽卡岩化。其中,矽卡岩及退化蚀变矿物主要有石榴子石、透辉石-次透辉石-铁次透辉石,金云母、绢云母、绿帘石、硅灰石、蛇纹石、阳起石、透闪石、绿泥石等。

铁矿体主要产于花岗岩闪长岩、二长花岗岩与二叠纪下拉组、敌布错组的接触带及下拉组和敌布错组的层间破碎带中。矿体长度一般为 500~2300m,最长可达 6400m;厚度一般为 1.30~13.74m,最厚可达 66.54m。总体产状走向 NWW-NW,倾向 NNE-NE,倾角 $45^\circ\sim70^\circ$ 。空间形态呈层状、似层状、宽脉状、条带脉状、透镜状。滚纠铁矿区矿石主要类型有致密的块状、角砾状、细脉状、条带状等,矿石矿物以磁铁矿为主,少量赤铁矿、穆磁铁矿等。其他详细矿床地质特征见于玉帅等(2011,2012a,b)。

滚纠铁矿中细粒角闪黑云花岗岩闪长岩分布较广,主要有斜长石(约 50%)、钾长石(约 15%)、石英(约 20%)、黑云母(约 10%)、角闪石(约 5%)以及少量的副矿物磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石等($<1\%$)组成,花岗结构,块状构造。研究表明,矿区花岗岩闪长岩富硅(SiO_2 平均为 66.76%)、富碱(ALK 平均为 7.7%),属高 K 钙碱性花岗岩系列,

具有 I 型花岗岩特征;轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,弱 Eu 负异常;微量元素方面,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,显示弧岩浆作用特点,岩浆源区具壳幔混源的特征。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $113.6\pm1.2\text{Ma}$ ($MSWD=0.42, n=18$),形成于中生代早白垩世晚期弧后伸展条件下(于玉帅等,2011)。

3 矿物学特征

野外采集新鲜的远离矿化的细粒角闪黑云花岗岩闪长岩进行室内研究,样品送至河北省地质矿产局廊坊实验室进行探针片磨制。在显微镜下进行详细的岩矿鉴定,选择典型角闪石、黑云母及长石类矿物进行电子探针成分分析,分析测试在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室进行,电子探针型号是 JXA-8100、能谱仪 Inca Energy,加速电压 15.0KV,电子束斑 $2\mu\text{m}$,探针束流 20nA。

3.1 角闪石

角闪石自形-半自形,单偏光镜下呈深绿色-绿色-浅黄绿色,多色性明显,正交偏光镜下干涉色可达二级蓝绿,正中-高突起,闪石式解理(夹角 56°)发育,见有角闪石简单双晶,内部见有它形-半自形的磁铁矿等颗粒,多数角闪石晶体周围发育有细粒绢云母、碳酸盐、磁铁矿等组成的暗化边(图 2)。

花岗岩闪长岩中角闪石电子探针成分分析结果列于表 1,其中 $w(SiO_2)$ 为 47.19%~48.46%,平均 47.98%; $w(TiO_2)$ 为 0.71%~1.57%,平均 1.30%; $w(Al_2O_3)$ 为 5.40%~7.53%,平均 6.78%; $w(FeO)$ 为 13.38%~17.60%,平均 14.95%; $w(MgO)$ 为

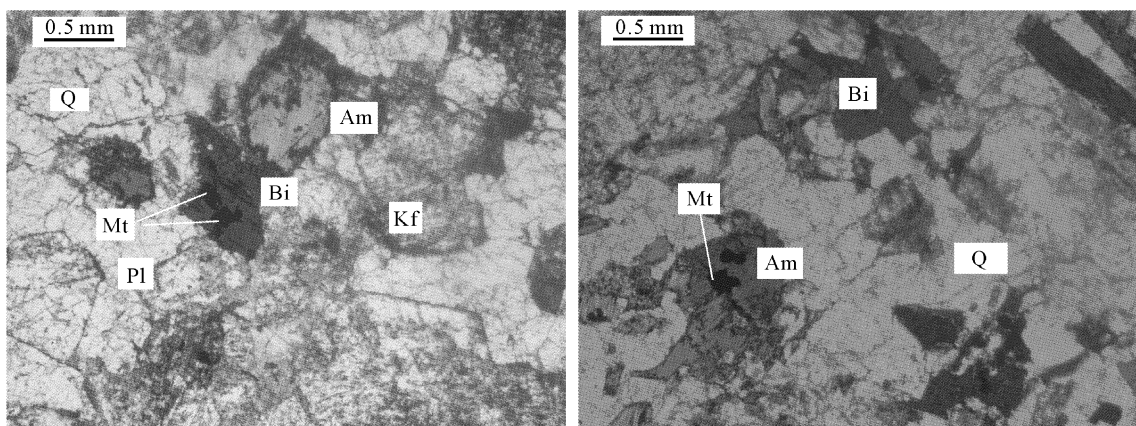


图 2 花岗岩闪长岩典型矿物显微照片

Fig. 2 Microscope photos of typical minerals from granodiorite

Am - 角闪石; Bi - 黑云母; Kf - 钾长石; Mt - 磁铁矿; Pl - 斜长石; Q - 石英

Am - amphibole; Bi - biotite; Kf - K - feldspar; Mt - magnetite; Pl - plagioclase; Q - quartz

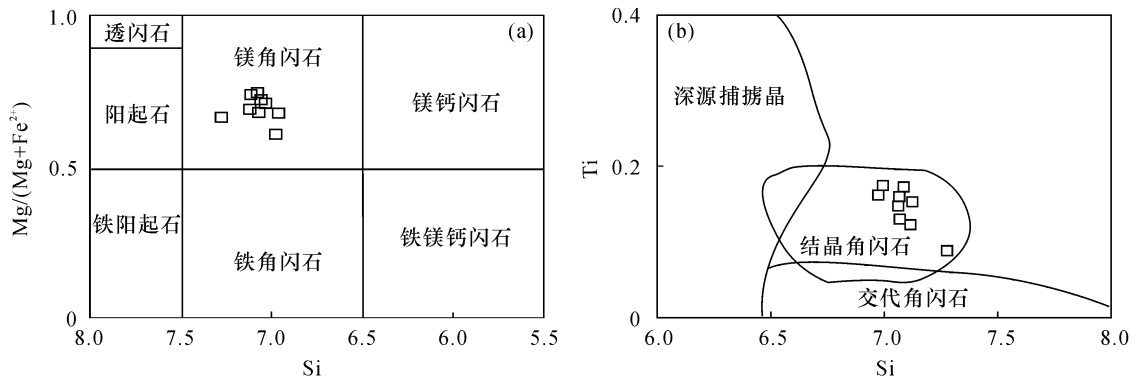


图3 花岗闪长岩角闪石分类图解(a 据 Leake *et al.*, 1997; b 据马昌前等, 1994)

Fig.3 Classification of amphibole from granodiorite (a after Leake *et al.*, 1997; b after Ma *et al.*, 1994)

11.44% ~ 13.92%, 平均 12.98%; $w(\text{CaO})$ 为 10.69% ~ 11.57%, 平均 11.05%; 除一个测点不含 F 外, 其他测点 F 含量变化范围是 0.02% ~ 0.51%, 平均高达 0.29%。角闪石中 $\text{Na} < 0.5$, Ca 在 1.69 ~ 1.83 之间, 为钙角闪石系列, 富 Mg (2.52 ~ 3.06), 在钙角闪石分类中属镁角闪石 (Leake *et al.*, 1997)

(图 3a); Ti 含量为 0.08 ~ 0.17, 马昌前等 (1994) 角闪石成因分类 Ti-Si 图解显示花岗闪长岩中角闪石均为结晶角闪石 (图 3b), 表明矿区成矿相关花岗闪长岩中角闪石成因简单, 均为岩浆侵位过程中结晶形成, 即角闪石结晶后未遭受后期流体蚀变。

表 1 花岗闪长岩中角闪石电子探针分析结果 (%)

Table 1 Electron microprobe analyses (%) of amphibole from granodiorite

样品编号	CQ09-13-1-1.1	CQ09-13-1-3.2	CQ09-13-1-4.2	CQ09-13-2-1.2	CQ09-13-2-1.3	CQ09-13-5-1.2	CQ09-13-5-2.2	CQ09-13-7-1.2	CQ09-13-7-2.2
SiO ₂	48.43	48.42	47.70	47.19	48.46	47.69	48.34	47.99	47.62
TiO ₂	1.57	1.38	1.33	1.46	0.71	1.18	1.12	1.43	1.57
Al ₂ O ₃	6.85	6.70	6.69	7.40	5.40	6.90	6.59	7.00	7.53
FeO	13.38	13.84	13.87	17.60	16.28	15.12	15.13	14.32	15.00
MnO	0.61	0.59	0.65	0.73	0.69	0.63	0.55	0.73	0.75
MgO	13.92	13.60	13.86	11.44	12.22	12.76	12.88	13.35	12.83
CaO	11.01	11.01	10.92	11.15	11.37	10.93	11.57	10.69	10.77
Na ₂ O	1.58	1.46	1.62	1.50	1.13	1.71	1.49	1.69	1.76
K ₂ O	0.16	0.17	0.20	0.20	0.16	0.19	0.20	0.22	0.21
F	0.32	0.30	0.24	0.25	0.36	0.02	-	0.32	0.51
Total	97.83	97.46	97.07	98.90	96.77	97.11	97.86	97.73	98.54
以 23 个 O 原子计算阳离子数									
Si	7.0851	7.1198	7.0580	6.9769	7.2700	7.0758	7.1137	7.0654	6.9939
Al ^{IV}	0.9149	0.8802	0.9420	1.0231	0.7300	0.9242	0.8863	0.9346	1.0061
Al ^{VI}	0.2668	0.2803	0.2249	0.2657	0.2239	0.2816	0.2567	0.2792	0.2973
Ti	0.1727	0.1521	0.1476	0.1622	0.0798	0.1317	0.1241	0.1585	0.1736
Fe ³⁺	0.6095	0.6286	0.5381	0.5504	0.6476	0.5476	0.5780	0.5697	0.5492
Fe ²⁺	1.0274	1.0736	1.1787	1.6260	1.3952	1.3278	1.2838	1.1937	1.2929
Mn	0.0761	0.0735	0.0811	0.0916	0.0874	0.0789	0.0686	0.0909	0.0934
Mg	3.0346	2.9819	3.0583	2.5206	2.7326	2.8224	2.8246	2.9294	2.8101
Ca	1.7251	1.7343	1.7312	1.7670	1.8277	1.7368	1.8236	1.6868	1.6942
Na	0.4493	0.4157	0.4636	0.4289	0.3275	0.4904	0.4249	0.4816	0.5001
K	0.0289	0.0315	0.0383	0.0373	0.0308	0.0352	0.0377	0.0406	0.0399
Total	15.3905	15.3714	15.4619	15.4496	15.3524	15.4524	15.4220	15.4303	15.4508
Mg/(Mg + Fe)	0.6496	0.6366	0.6405	0.5366	0.5722	0.6008	0.6027	0.6056	0.5993

表 2 花岗闪长岩中黑云母电子探针分析结果(%)
Table 2 Electron microprobe analyses (%) of biotite from granodiorite

样品号	CQ09-13 -1-1.3	CQ09-13 -1-2.1	CQ09-13 -1-2.3	CQ09-13 -1-3.1	CQ09-13 -1-4.1	CQ09-13 -2-1.1	CQ09-13 -2-2.1	CQ09-13 -5-1.1	CQ09-13 -5-2.1	CQ09-13 -7-2.1	CQ09-13 -7-1.1
SiO ₂	37.92	37.65	37.72	37.74	36.76	37.06	37.43	37.58	36.97	38.01	37.39
TiO ₂	4.95	4.94	4.57	4.76	4.12	4.86	4.34	4.60	4.36	5.06	5.09
Al ₂ O ₃	13.34	13.28	13.10	13.16	13.07	13.15	13.49	13.24	12.95	13.05	13.31
FeO	18.91	17.90	18.68	17.76	18.44	18.78	18.73	18.35	18.25	18.48	17.87
MnO	0.25	0.28	0.29	0.25	0.27	0.21	0.44	0.25	0.23	0.24	0.32
MgO	12.05	12.47	11.78	12.54	12.62	11.71	12.22	12.23	12.12	12.27	12.41
Na ₂ O	0.19	0.25	0.07	0.22	0.32	0.28	0.20	0.18	0.23	0.15	0.18
K ₂ O	10.43	10.30	10.35	9.65	9.06	9.81	10.44	10.35	9.59	10.81	10.71
F	0.53	0.45	0.39	0.27	0.77	0.24	0.49	1.11	0.49	0.00	0.00
Total	98.57	97.52	96.95	96.35	95.43	96.10	97.78	97.89	95.19	97.28	98.07
以 11 个 O 原子计算阳离子数											
Si	2.8238	2.8207	2.8499	2.8426	2.8205	2.8204	2.8132	2.8302	2.8385	2.8308	2.8041
Al ^{IV}	1.1711	1.1728	1.1501	1.1574	1.1795	1.1796	1.1868	1.1698	1.1615	1.1458	1.1759
Al ^{VI}	0.0000	0.0000	0.0169	0.0110	0.0023	0.0001	0.0084	0.0051	0.0107	0.0000	0.0000
Ti	0.2775	0.2785	0.2598	0.2697	0.2376	0.2780	0.2456	0.2608	0.2516	0.2832	0.2873
Fe ³⁺	0.1774	0.1754	0.1889	0.2170	0.1819	0.1912	0.1412	0.1678	0.1892	0.1625	0.1540
Fe ²⁺	1.0004	0.9460	0.9916	0.9018	1.0010	1.0041	1.0362	0.9878	0.9830	0.9888	0.9669
Mn	0.0158	0.0176	0.0184	0.0159	0.0174	0.0135	0.0279	0.0161	0.0152	0.0151	0.0203
Mg	1.3377	1.3929	1.3271	1.4086	1.4437	1.3279	1.3691	1.3732	1.3873	1.3624	1.3868
Ca	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Na	0.0280	0.0362	0.0108	0.0321	0.0473	0.0412	0.0289	0.0269	0.0345	0.0222	0.0257
K	0.9909	0.9843	0.9977	0.9269	0.8869	0.9528	1.0015	0.9944	0.9395	1.0266	1.0250
Total	7.8226	7.8246	7.8111	7.7830	7.8181	7.8088	7.8588	7.8322	7.8108	7.8375	7.8460
MF	1.1366	1.1822	1.1357	1.211	1.1727	1.1323	1.1254	1.1554	1.1632	1.1515	1.1683
Mg [#]	0.5683	0.5911	0.5678	0.6055	0.5864	0.5662	0.5627	0.5777	0.5816	0.5758	0.5842
Mg/(Mg + Fe)	0.5318	0.554	0.5292	0.5573	0.5497	0.5263	0.5376	0.543	0.542	0.5420	0.5530
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ + Mg)	0.4279	0.4044	0.4277	0.3903	0.4095	0.4306	0.4308	0.4184	0.4147	0.4206	0.4108

注:MF = 2 × Mg/(Mg + Fe²⁺ + Mn); Mg[#] = Mg/(Mg + Fe²⁺ + Mn)。

3.2 黑云母

黑云母它形-半自形叶片状,单偏光多色性显著, N_g -红棕色、红褐色, N_p -浅黄色,正交偏光镜下一组极完全解理,中正突起,近平行消光。黑云母内部见有针状、长条状磁铁矿,部分发生轻微的绿泥石化,晶体周围亦发育有暗化边(图 2)。

电子探针成分分析列于表 2。花岗闪长岩中黑云母 $w(\text{SiO}_2)$ 为 36.76% ~ 38.01%, 平均 37.48%; $w(\text{TiO}_2)$ 为 4.12% ~ 5.09%, 平均 4.70%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 12.95% ~ 13.49%, 平均 13.20%; $w(\text{FeO})$ 为 17.76% ~ 18.91%, 平均 18.38%;

$w(\text{MgO})$ 为 11.71% ~ 12.62%, 平均 12.22%; $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 9.06% ~ 10.81%, 平均 10.14%; F 含量较高, 变化范围是 0.00% ~ 1.11%, 平均高达 0.43%。在 Foster(1960)云母矿物分类图解上都落在镁质黑云母区域范围内(图 4a)。岩浆成因黑云母与进变质和退变质成因黑云母相比,具有 Ti 含量中等($0.20 < \text{Ti} < 0.55$)、 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值在 0.30 ~ 0.55 之间的特点(马昌前等,1994),滚纠铁矿花岗闪长岩中黑云母 Ti 含量在 0.24 ~ 0.29 之间,平均为 0.27, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值范围是 0.53 ~ 0.56(众值 < 0.55),证明所研究的黑云母均为岩浆

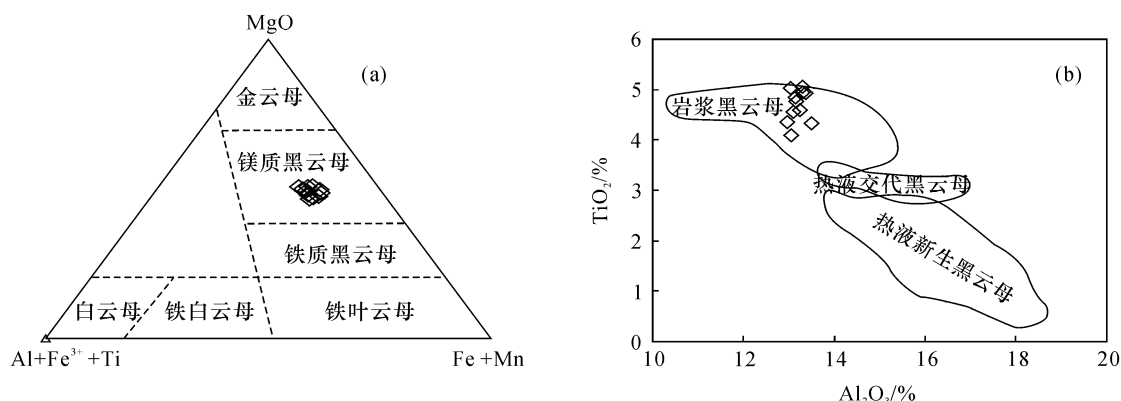


图 4 花岗闪长岩云母分类图解 (a 据 Foster, 1960; b 据傅金宝, 1981)

Fig. 4 Classification of mica from granodiorite (a-after Foster, 1960; b-after Fu, 1981)

成因。在傅金宝(1981)统计的黑云母成因图解上,投影点同样均落入岩浆黑云母区域范围内(图 4b)。此外,黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 比值较均一,变化于 0.39 ~ 0.43 之间,指示矿区花岗闪长岩中黑云母形成以后未遭受后期流体改造(Stone, 2000)。

4 讨论

角闪石和黑云母成作为成岩、成矿作用的标型矿物,不仅可以指示岩石的成因类型、揭示源区性质、恢复岩体结晶的物理化学条件,还可以用来指示成矿作用过程(陈光远等,1987)。

4.1 岩石类型、岩浆源区

矿区花岗闪长岩与曲水碰撞花岗岩中角闪石相似(贫钛、富镁),同为镁角闪岩,表明寄主岩为 I 型花岗岩(李胜荣等,2006); Abdel-Rahman (1994) 统计大量花岗岩中黑云母化学组成显示, I 型花岗岩中黑云母富 Mg, S 型花岗岩黑云母富 Al, A 型花岗岩黑云母富 Fe, 并建立了判别其构造环境的 $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解, 矿区花岗闪长岩黑云母相对富 Mg, 落在造山带钙碱性岩系, 指示为 I 型花岗岩(图 5); 黑云母中 $\text{Mg}^\#$ 是划分长江深源系列 ($\text{Mg}^\# > 0.45$) 和南岭浅源系列 ($\text{Mg}^\# < 0.45$) 花岗岩的主要标志(杨文金等, 1986, 1988), 矿区花岗闪长岩黑云母 $\text{Mg}^\#$ 与长江深源系列花岗岩一样, 均大于 0.45, 具 I 型花岗岩特征; $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ 和 Mg 负相关, 样品 $\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$ 在 1.12 ~ 1.19 之间 (< 1.3), Mg 为 1.33 ~ 1.44, 这也为矿区成矿花岗闪长岩属 I 型花岗岩提供了有利证据(谢应雯等, 1988)。上述矿物化学研究结果与岩石地球化学资料互为佐证(于玉帅等, 2011)。

前人通过岩石地球化学、全岩 Sr、Nd 同位素以及锆石 Lu - Hf 同位素研究表明, 尼雄矿田成矿花岗

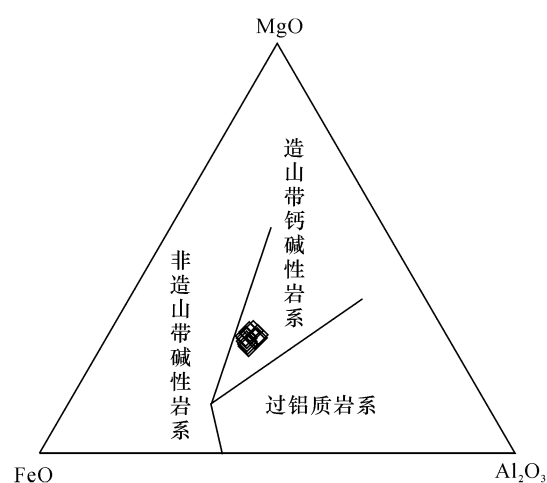


图 5 花岗闪长岩黑云母 $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解

(据 Abdel - Rahman, 1994)

Fig. 5 $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of biotite from granodiorite (after Abdel - Rahman, 1994)

闪长岩是壳 - 幔源物质发生混合的产物 (Zhu *et al.*, 2009, 2011; 于玉帅等, 2011; 张晓倩等, 2010)。从花岗闪长岩中角闪石和黑云母化学组成也可以得出相同的结论。首先, 黑云母 MF 分别为 1.13 ~ 1.21, 大于典型的壳源花岗岩 MF 值 (< 0.5), 较钙碱性斑岩中黑云母 MF (1.27 ~ 1.36) 值小(谢应雯等, 1995), 指示岩浆中有幔源组分的加入; 其次, 在角闪石 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ (图 6a) 和黑云母 $w\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ (图 6b) 关系图中, 结果显示样品点都落在壳 - 幔混源区; 最后, 李胜荣等 (2006) 研究西藏曲水岩体结果表明, 典型的幔源黑云母 $\text{MgO} > 15\%$, 壳源黑云母中的 $\text{MgO} < 6\%$, 本次研究的滚纠矿区黑云母 MgO 含量介于 11.71% ~ 12.62%, 既不同于典型的幔源黑云母, 又和壳源黑云母区别明显, 应为壳幔混源。

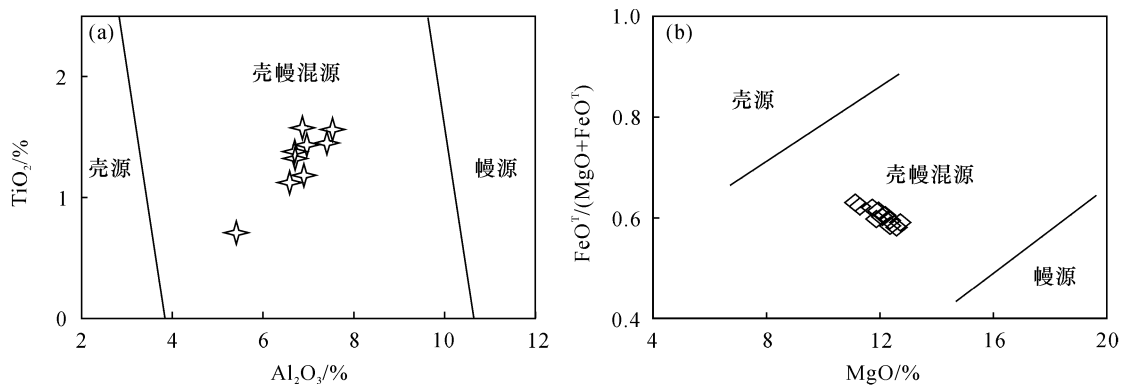


图6 花岗闪长岩角闪石 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ (a-据陈光远等,1993) 和

黑云母 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{MgO}$ 图解 (b-据周作侠,1986)

Fig. 6 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ diagram of amphibole (a-after chen *et al.*, 1993) and $\text{FeO}^T/(\text{MgO} + \text{FeO}^T) - \text{MgO}$ of biotite (b-after zhou, 1986) from granodiorite

4.2 成岩物理化学条件

岩浆成因黑云母化学成分在成岩氧逸度、温度和压力等物理化学性质等方面具有一定的指示意义。资料显示,黑云母中六次配位的 Al 离子具有指示成岩氧逸度的作用,低的 Al^{VI} 可以反映相对较高的氧逸度环境 (Buddington *et al.*, 1964), 计算滚纠铁矿花岗闪长岩中黑云母发现 Al^{VI} 极低,表明成岩处于较高的氧逸度条件下。将矿区花岗闪长岩中黑云母在 Wones *et al.* (1965) $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 进行投图,发现它们都位于 $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$ 和 $\text{Ni} - \text{NiO}$ 之间且靠近 $\text{Ni} - \text{NiO}$ 缓冲线 (图 7a), 指示 $\log f_{\text{O}_2} > \text{NiNiO} + 1$, 由此可知黑云母结晶时岩浆系统处于较高氧逸度条件下。角闪石中 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 为 0.54 ~ 0.65, 平均 0.61, 相对均一, 同样也反映了母岩浆氧逸度应为中等 - 高 (Ma *et al.*, 2000)。根据计算得到黑云母形成温度 (630 ~ 680℃, 下文)、 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+})$ 比值以及氧逸度之间关系, 估算得到花岗闪长岩成岩氧逸度 $\log f_{\text{O}_2}$ 约为 -14 ~ -16 (陈光远等, 1987)。

成岩温度方面, 利用角闪石 - 黑云母矿物对温度图解和黑云母 $\text{Ti} - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 图解进行投图计算, 李胜荣等 (2006) 研究认为后者计算结果更接近实际成岩温度。一般认为, 黑云母 Ti 含量可以作为其结晶温度的相对地质温度计, 即黑云母含 Ti 量与形成温度成正比 (Buddington *et al.*, 1964; 陈光远等, 1987), 分析得到黑云母 Ti 含量为 0.24 ~ 0.28, 指示较高的结晶温度; 采用黑云母 $\text{Ti} - \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 图解得到花岗闪长岩成岩温度约 630 ~ 680℃ (图 7b)。利用角闪石 - 黑云母矿物对成岩压力投

图计算 (图 7c), 估算得到花岗闪长岩形成压力在 $1.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ Pa}$ 之间。康志强等 (2010) 通过对比花岗岩中角闪石和黑云母全铝压力计, 认为花岗岩中存在角闪石和黑云母矿物组合, 结晶好的那种矿物可以使用全铝压力计。镜下观察显示花岗闪长岩中角闪石的晶体形态较黑云母好, 故利用角闪石全铝计算成岩压力, $P(\times 10^8 \text{ Pa}) = 4.76 \times \text{Al}^{\text{T}} - 3.01$ (Schmidt, 1992), 计算得到结果为 $1.53 \times 10^8 \sim 3.12 \times 10^8 \text{ Pa}$, 平均 $2.50 \times 10^8 \text{ Pa}$, 与角闪石 - 黑云母矿物进行投图计算结果一致, 估算成岩深度平均约为 7.5 km。

程启芬等 (1987) 研究长江中下游主要酸性侵入岩认为, 黑云母的 $\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 与其结晶时的温度压力密切相关, 并总结了如下规律: $\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值与结晶温度、氧逸度成负相关, 与压力成正相关。上述成岩温度、压力、氧逸度研究表明, 滚纠铁矿花岗闪长岩形成于较高温的 630 ~ 680℃, 约 $2.50 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的压力和 $\log f_{\text{O}_2} = -14 \sim -16$ 高氧逸度条件下, 这与较低的 $\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值相吻合。

4.3 成矿意义

滚纠铁矿花岗闪长岩黑云母 $w(\text{TiO}_2)$ 平均 4.70%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均 13.20%, 与长江中下游铁铜矿床成矿岩体黑云母 TiO_2 含量较高, Al_2O_3 相对较低 (程启芬等, 1987) 的特点一致。在黑云母 $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 图解上, 样品点位于铁铜矿床相关的成矿岩体内 (图 7a, 洪大卫, 1982)。研究资料显示, 温度、氧逸度、压力条件对成矿元素萃取、沉淀影响巨大, 高氧逸度为成矿金属元素 (Fe, Cu) 进入岩浆并最后富集成矿提供了必备的条件 (Silltoe *et al.*, 1993)。

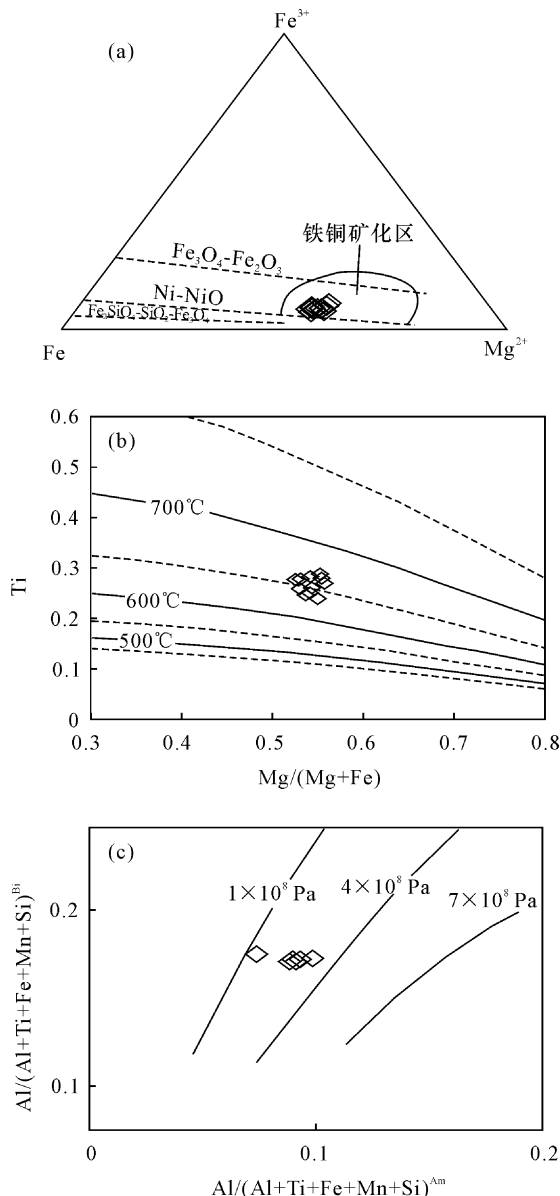


图7 花岗闪长岩黑云母氧逸度(a-据 Wones *et al.*, 1965; 洪大卫, 1982)、温度(b-据 Henry *et al.*, 2005)和角闪石压力(c-据陈光远等, 1987)判别图
Fig.7 Oxygen fugacity(a after Wones *et al.*, 1965; Hong, 1982), temperature(b after Henry *et al.*, 2005) diagram of biotite and pressure diagram of amphibole (c-after Chen *et al.*, 1987) from granodiorite

1997);且Fe的萃取量跟温度(在450~650℃范围内)成正比(梁祥济, 2000)。本次研究表明花岗闪长岩630~680℃和 $\log f_{O_2} = -14 \sim -16$ 条件下结晶,同时矿区发育氧化型矽卡岩矿物,石榴子石包裹体温度大于600℃(未刊资料),都证明了不论是岩浆热液还是其所分异出的成矿流体都具有高温高氧逸度的特征,这种高温、高氧逸度的环境为Fe进入

岩浆并成功萃取提供了必要的物理化学条件。矽卡岩型铁矿中铁主要以卤化物和/或络合物形式进行搬运迁移, Cl^- 对铁的搬运能力最强,其次是 F^- (赵一鸣等, 1992)。本次分析得到角闪石和黑云母中F的含量平均高达0.29和0.52,流体包裹研究资料显示滚纠铁矿成矿流体属NaCl-H₂O体系(未刊资料),表明岩浆热液体系中卤素离子(F^- 和 Cl^-)含量较高,丰富的卤离子为成矿物质的迁移、运输提供了必不可少的条件;成矿流体经历了矽卡岩阶段高温、高压、高氧逸度环境-氧化物阶段温压力的降低、高氧逸度环境(未刊资料),卤化物和/或络合物运移的Fe于氧化物阶段合适的成矿条件下沉淀、富集成矿。

5 结论

(1) 滚纠铁矿花岗闪长岩中角闪石属镁角闪石,黑云母为镁质黑云母;两者均为岩浆成因,且形成后均为遭受后期流体的蚀变。

(2) 角闪石和黑云母化学成分指示滚纠铁矿花岗闪长岩为典型的I型花岗岩,为壳幔混合来源,计算得到岩浆约在氧逸度 $\log f_{O_2} = -14 \sim -16$,温度630~680℃以及压力 $1.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8$ Pa条件下侵位结晶。

(3) 岩浆热液系统的高温、高氧逸度条件保证了Fe元素的成功、大量萃取,而富含卤离子(F^- 和 Cl^-)的岩浆热液为成矿元素以卤化物和/或络合物形式迁移提供了载体,成矿作用过程温度压力的降低以及高氧逸度为铁质沉淀提供了条件。

[References]

- Abdel Rahman F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc alkaline and peraluminous magmas [J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525 - 541
- Buddington A F, Lindsley D H. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents [J]. *Petrol*, 5: 310 - 357
- Cao Sheng-hua, Li De-wei, Yu Zhong-zhen, Yuan Jian-ya, Wu Xu-ling, Hu Wei-zheng. 2007. Metallogenic and geological characteristics of the Nixiong superlarge magnetite deposit in Gangdese, Tibet [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(3): 328 - 335 (in Chinese with English abstract)
- Chen Guang-yuan, Sun Dai-sheng, Yin Hui-an. 1987. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Press: 1 - 818 (in Chinese)
- Chen Guang-yuan, Sun Dai-sheng, Zhou Xun-ruo, Shao Wei, Gong Run-tan, Shao Yue. 1993. Genetic mineralogy and gold mineralization of Guojialing granodiorite from eastern Shandong, China [M]. Beijing: China University of Geosciences Press: 1 - 131 (in Chinese)
- Cheng Qi-fen, Mao Jian-ren, Su You-xiang, Chen San-yan, Zhao Shu-liang. 1987. The feature and significance of biotite from the intermediate-acidic intrusive bodies in middle-lower Yangtze valley [J]. *Bul-*

- letin Nanjing Institute of Geology and Minerals Resources, CAGS, 8 (3): 56–70 (in Chinese with English abstract)
- Finch A A, Parsons I, Mingard S C. 1995. Biotites as indicators of fluorine fugacities in late-stage magmatic fluids: the Gardar province of south Greenland[J]. *Petrol*, 36: 1701–1728
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *U. S. Geol. Survey, Prof. Paper*, 354: 11–49
- Fu Jin-bao. 1981. The chemical composition and characteristics of biotite in porphyry copper deposits[J]. *Geology and Exploration*, 9: 16–19 (in Chinese)
- 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 [J]. *Am. Mineral*, 90: 316–328
- Hong Da-wei. 1982. Biotites and mineralogical facies from granitic rocks of south China and their relation to the series of mineralization[J]. *Acta Geological Sinica*, 2: 149–164
- Kang Zhi-qiang, Feng Zuo-hai, Wang Rui. 2010. Reliability comparison of Al-in-hornblende and biotite barometer—A case study of Guposhan-Huashan granite in north Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(4): 474–479 (in Chinese with English abstract)
- Kesler S E, Issgonis M J, Brownlow A H, Damon P E, Moore W J, Northcole K E, Preto V A. 1975. Geochemistry of biotites from mineralized and barren intrusive systems[J]. *Economic Geology*, 70: 559–567
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on New Mineral and Mineral Names[J]. *American Mineralogical*, 82: 1019–1037
- Li Hong-li, Bi Xian-wu, Hu Rui-zhong, Peng Jian-tang, Shuang Yan, Li Zhao-li, Li Xiao-min, Yuan Shun-da. 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qirianling granite associated with the Furong tin deposit: Tracing tin mineralization signatures[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2605–2614 (in Chinese with English abstract)
- Li Sheng-rong, Sun Li, Zhang Hua-feng. 2006. Magma mixing genesis of the Qushui collisional granitoids, Tibet, China: Evidences from genetic mineralogy[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 884–894 (in Chinese with English abstract)
- Liang Xiang-ji. 2000. Experimental studies on the mechanism of the formation of skarns and skarn ore deposits in China[M]. Beijing: Academic Press: 152–192 (in Chinese with English abstract)
- Ma Chang-qian, Ehlers C, Xu Chang-hai, Li Zhi-chang, Yang Kun-guang. 2000. The root of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics [J]. *Precambrian Research*, 102(3–4): 279–301
- Ma Chang-qian, Yang Kun-guang, Tang Zhong-hua, Li Zeng-tian. 1994. Magma-dynamic of granitoids-theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 210–212 (in Chinese with English abstract)
- Qu Xiao-ming, Xin Hong-bo, Xu Wen-yi, Yang Zhu-sen, Li Zhen-qing. 2006. Discovery and significance of copper-bearing bimodal rock series in Coqin area of Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 707–716 (in Chinese with English abstract)
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304–310
- Silltoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44: 373–388
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in studies of Archean felsic plutonic rocks, Berens river area, northwest superior province, Ontario, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455–470
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application[J]. *American Mineralogist*, 50: 1228–1272
- Xie Ying-wen, Zhang Yu-quan. 1981. Research of biotites from granitoids, Tibet [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Z1): 93–101 (in Chinese)
- Xie Ying-wen, Zhang Yu-quan. 1995. Compositional characteristics and petrological significance of Mg-Fe micas alkaline rocks of the Ailaoshan-Jinshajiang rift system[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(1): 82–87 (in Chinese with English abstract)
- Xin Hong-bo, Qu Xiao-ming, Ren Li-kui, Zhang Lan-ying. 2007. The material source and genesis of copper-bearing bimodal rock series in Coqin County, western Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 939–945 (in Chinese with English abstract)
- Yang Wen-jin, Wang Lian-kui, Zhang Shao-li, Xu Wen-xin. 1986. Micas of the two series of granites in South China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 6(4): 298–307 (in Chinese with English abstract)
- Yang Wen-jin, Wang Lian-kui, Zhang Shao-li, Xu Wen-xin. 1988. On the origin and evolution of granites in South China in terms of trace elements in micas [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 8(2): 127–135 (in Chinese with English abstract)
- Yu Yu-shuai, Gao Yuan, Yang Zhu-sen, Tian Shi-hong, Liu Ying-chao, Cao Sheng-hua, Hu Wei-zheng, Qie Hai-man. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and geochemistry of intrusive rocks from Gunjiu iron deposit in the Nixiong ore field, Coqin, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1949–1960 (in Chinese with English abstract)
- Yu Yu-shuai, Yang Zhu-sen, Liu Ying-chao, Tian Shi-hong, Gao Yuan, Zhao Can, Zhao Wu-qiang, Liu A-sui. 2012a. Mineralogical characteristics and ^{40}Ar – ^{39}Ar dating of phlogopite from the Gunjiu iron deposit in the Nixiong Ore Field, Coqin, Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 681–690 (in Chinese with English abstract)
- Yu Yushuai, Yang Zhu-sen, Liu Ying-chao, Tian Shi-hong, Zhao Can, Gao Yuan, Ji Xian-hua, Hu Wei-zheng, Cao Sheng-hua. 2012b. Mineralogical characteristics of skarn in the Ri'a copper deposit of Nixiong ore field, Tibet, and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 775–790 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Xiao-qian, Zhu Di-cheng, Zhao Zhi-dan, Wang Li-quan, Huang Jian-cun, Mo Xuan-xue. 2010. Petrogenesis of the Nixiong pluton in Coqin, Tibet and its potential significance for the Nixiong Fe-rich mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1793–1804 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Yi-ming, Lin Wen-wei, Zhang De-quan, Li Da-xin, Zhao Guo-hong, Chen Ren-yi. 1992. Metasomatic mineralization—study of some ore-bearing metasomatic formations[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing: 1–156 (in Chinese)
- Zhou Zuo-xia. 1986. The origin of intrusive mass in Fengdongshan, Hubei province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59–70 (in Chinese with English abstract)
- Zhu Di-cheng, Mo Xuan-xue, Niu Yao-ling, Zhao Zhi-dan, Wang Li-quan, Liu Yong-sheng, Wu Fu-yuan. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse through-

- out the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 268: 298–312
- Zhu Di-cheng, Zhao Zhi-dan, Niu Yao-ling, Mo Xuan-xue, Chung Sun-lin, Hou Zeng-qian, Wang Li-quan, Wu Fu-yuan. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241–255
- [附中文参考文献]
- 曹圣华,李德威,余忠珍,袁建芽,吴旭铃,胡为正. 2007. 西藏冈底斯尼雄超大型富铁矿的成矿地质特征[J]. *大地构造与成矿学*, 31(3): 328–335
- 陈光远,孙岱生,殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社:1–818
- 陈光远,孙岱生,周■若,邵伟,官润潭,邵岳. 1993. 胶东郭家岭花岗岩类成因矿物学与金矿化[M]. 北京:中国地质大学出版社:1–131
- 程启芬,毛建仁,苏郁香,陈三元,赵曙良. 1987. 长江中下游中酸性侵入岩中的黑云母及其地质意义[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 8(3): 56–70
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, 9:16–19
- 洪大卫. 1982. 华南花岗岩的黑云母和矿物相及其与矿化系列的关系[J]. *地质学报*, 2: 149–164
- 康志强,冯佐海,王睿. 2010. 角闪石黑云母全铝压力计的可靠性对比——以广西姑婆山-花山花岗岩为例[J]. *桂林理工大学学报*, 30(4): 474–479
- 李鸿莉,毕献武,胡瑞忠,彭建堂,双燕,李兆丽,李晓敏,袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成以及对锡成矿的指示意义[J]. *岩石学报*, 23(10): 2605–2614
- 李胜荣,孙丽,张华锋. 2006. 西藏曲水碰撞花岗岩的混合成因:来自成因矿物学证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 884–894
- 梁祥济. 2000. 中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究[M]. 北京:学苑出版社:152–192
- 马昌前,杨坤光,唐仲华,李增田. 1994. 花岗岩类与岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉:中国地质大学出版社:210–212
- 曲晓明,辛洪波,徐文艺,杨竹森,李振清. 2006. 藏西措勤含铜双峰岩系的发现及其意义[J]. *岩石学报*, 22(3): 707–716
- 谢应雯,张玉泉. 1988. 西藏花岗岩类中黑云母的研究[J]. *矿物岩石*, 21: 93–101
- 谢应雯,张玉泉. 1995. 哀牢山-金沙江裂谷系岩石中镁铁云母成分特征及其意义[J]. *矿物学报*, 15(1): 82–87
- 辛洪波,曲晓明,任立奎,张兰英. 2007. 藏西措勤含铜岩系的物质来源与成因[J]. *地质学报*, 81(7): 939–945
- 杨文金,王联魁,张绍立,徐文新. 1986. 华南两个不同成因系列花岗岩的云母标型特征[J]. *矿物学报*, 6(4): 298–307
- 杨文金,王联魁,张绍立,徐文新. 1988. 从云母微量元素特征探讨华南花岗岩的成因演化[J]. *矿物学报*, 8(2): 127–135
- 于玉帅,高原,杨竹森,田世洪,刘英超,曹圣华,胡为正,鄧海满. 2011. 西藏措勤尼雄矿田滚铁岭侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *岩石学报*, 27(7): 1949–1960
- 于玉帅,杨竹森,刘英超,田世洪,纪现华,高原,赵灿,赵武强,刘阿雅. 2012a. 西藏措勤尼雄矿田滚铁岭金云母矿物学特征及⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(5): 681–690
- 于玉帅,杨竹森,刘英超,田世洪,赵灿,高原,纪现华,胡为正,曹圣华. 2012b. 西藏尼雄矿田日阿铜矿夕卡岩矿物学特征及地质意义[J]. *矿床地质*, 31(4): 775–790
- 张晓倩,朱弟成,赵志丹,王立全,黄建村,莫宣学. 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义[J]. *岩石学报*, 26(6): 1793–1804
- 赵一鸣,林文蔚,张德全,李大新,赵国红,陈仁义. 1992. 交代成矿作用及其找矿意义——几个重要含矿交代建造的研究[M]. 北京:北京科学技术出版社:1–156
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. *岩石学报*, 2(1): 59–70

Genesis of Granodiorite in the Gunjiu Iron Deposit of the Nixiong Ore-field, Tibet: Evidence from Mineral Chemistry

YU Yu-shuai^{1,2,3}, YANG Zhu-sen⁴, GAO Yuan⁵, LIU Ying-chao⁶, TIAN Shi-hong⁴, JI Xian-hua⁷

(1. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan, Hubei 430205;

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, CGS, Wuhan, Hubei 430205;

3. Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (ECIT), Ministry of Education, Nanchang, Jiangxi 330013;

4. China Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037;

5. Jiangxi Institute of Geology Survey, Nanchang, Jiangxi 330201; 6. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037;

7. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: The Nixiong ore-field is an important part of Coqin-Shenzha iron and copper metallogenic belt. The Gunjiu iron deposit is a typical representative of the Nixiong ore-field. The granodiorite and monzogranite in this deposit are associated with iron mineralization. In order to discuss the source, characteristics of the magma and to reveal the physical, chemical conditions in the process of magma emplacement and crystallization, this work has made detailed mineralogical identification and electron microprobe analyses of minerals from granodiorite. The results show that the granodiorite is mainly composed of plagioclase, potassium feldspar, quartz, amphibole, biotite and few accessory minerals. Electron microprobe analyses indicate that the amphibole which is poor in titanium but rich in magnesium is attributed to magnesiohornblende. The biotite belonging to magnesian biotite is of magmatic genesis. The analysis shows that the granodiorite belongs to calc-alkaline I-type granite, and granodiorite was formed from a mixed magma between the partial melting materials of the crust and asthenospheric mantle in late Early Cretaceous. According to the chemical composition amphibole and biotite, the granodiorite crystallization occurred under the conditions of high oxygen fugacity about $\log f_{O_2} = -14 \sim -16$, high temperature of $630 \sim 680^\circ\text{C}$ and press of $1.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ Pa}$.

Key words: genetic mineralogical, granodiorite, Gunjiu iron deposit, Nixiong Ore-field, Tibet