

西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿金云母矿物学特征及 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学

于玉帅¹ 杨竹森² 刘英超³ 田世洪² 纪现华^{2,4} 高原⁵,
赵 灿¹ 赵武强¹ 刘阿睢¹

(1. 武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
5. 江西省地质调查院, 江西 南昌 330201)

摘要: 尼雄矿田位于隆格尔-工布江达断隆带, 是措勤-申扎铁铜多金属成矿带的重要组成部分。滚纠铁矿位于矿田西北端, 矿体主要产于花岗闪长岩和二长花岗岩与二叠系敌布错组的接触带及敌布错组层间破碎带中。矿区主要金属矿物有磁铁矿、穆磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿及少量的褐铁矿、针铁矿等, 夕卡岩矿物有石榴石、透辉石、金云母、蛇纹石、绿帘石、阳起石等, 其中金云母与磁铁矿密切共生, 本文对其进行电子探针成分分析和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测年。电子探针成分分析表明金云母富镁贫铁, $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ti})$ 介于0.90~0.94之间; 金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素测年获得总气体年龄(Total age)为112.3 Ma, 与成矿相关的花岗闪长岩(113.6 ± 1.6 Ma)和二长花岗岩(112.6 ± 1.6 Ma)年龄在误差范围内一致, 指示矿床形成于早白垩世晚期(113 Ma)。与铁矿化时代不同, 矿田内铜矿化主要发生在晚白垩世早期(87 Ma)。结合区域地质资料, 认为滚纠铁矿的形成与班公湖-怒江洋壳的向南俯冲关系密切, 冈底斯陆壳和羌塘陆壳在约113 Ma对接碰撞, 已俯冲的班公湖-怒江洋壳在俯冲惯性和/或重力拖拽作用下发生板片回转, 导致软流圈地幔流体上涌, 热的软流圈地幔流体携带的巨大热能引发岩石圈地幔和上覆地壳发生部分熔融, 形成以壳源为主的壳幔混源岩浆, 在弧后拉张区上侵形成花岗闪长岩和二长花岗岩。同时, 遭遇下拉组和敌布错组地层, 与之发生接触交代作用并形成磁铁矿床。

关键词: $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年 矿物学 金云母 滚纠铁矿 尼雄矿田 措勤 西藏

中图分类号: P578.959; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)05-0681-10

Mineralogical characteristics and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of phlogopite from the Gunjiu iron deposit in the Nixiong Ore Field, Coqen, Tibet

YU Yu-shuai¹, YANG Zhu-sen², LIU Ying-chao³, TIAN Shi-hong², JI Xian-hua^{2,4}, GAO Yuan⁵,
ZHAO Can¹, ZHAO Wu-qiang¹ and LIU A-sui¹

(1. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang 330201, China)

Abstract: The Nixiong ore field, located in the Longgeer-Gongbujiangda fault uplift zone, is an important part of Coqen-Shenzha iron and copper metallogenic belt. The Gunjiu iron deposit lies in the northwest of the Nixiong ore field. The ore bodies mainly occur in the contact zone, which lie between the intrusive granodiorite and mon-

收稿日期: 2012-04-02; 修订日期: 2012-07-04

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, 2009CB421007) 地质调查计划项目(1212010918014)

作者简介: 于玉帅(1985-) 男, 汉族, 实习研究员, 从事地质找矿与矿床学研究, E-mail: shuaiyuyu1103@163.com

zogranite and the Permian Dibucuo Formation, with some also located in the interlayer fracture zone of Dibucuo Formation. The main metallic minerals include magnetite, hematite and maghemite, with small amounts of limonite and goethite, whereas the skarn minerals such as grossular, andradite, diopside, sahlite, ferrosalite, serpentine, phlogopite, actinolite, epidote and chlorite are developed in the Gunjiu iron deposit. Among these minerals the phlogopite is closely associated with magnetite. Electron microprobe analysis and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of phlogopite were conducted in this paper. Electron microprobe analyses show that the phlogopite from the Gunjiu iron deposit is rich in magnesium but low in iron, with $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ti})$ value being 0.90 ~ 0.94. The ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of phlogopite does not yield a plateau age or isochron age but a total age of 112.3 Ma. The value represents the time that magnetite started to precipitate and is well consistent with the published LA-ICP-MS zircon U-Pb age of 113.6 ± 1.6 Ma and 112.6 ± 1.6 Ma from granodiorite and monzogranite. The result suggests that the iron mineralization took place in late Early Cretaceous at about 113 Ma. Different from iron mineralization, the copper mineralization mainly occurred in early Late Cretaceous at about 87 Ma. Combined with regional geology and the published data, the authors hold that the Gunjiu iron deposit is related to the southward subduction of Bangong Co-Nujiang Ocean crust. In late Early Cretaceous (113 Ma), the Gangdise and the Qiangtang continental crust started to collide. The subducted oceanic crust of Bangong Co-Nujiang began to rotate under the diving inertia and/or gravity drag. Because of the rotation of the oceanic crust, the asthenospheric fluids were upwelling and caused partial melting of the lithospheric mantle and the overlying crust due to the tremendous heat. At last there formed the mixed magma, which intruded upward under the back-arc extensional condition, forming intrusive rocks and fractionated a large number of ore-forming fluids. Meanwhile, the ore-forming fluids met the stratigraphic formation. There occurred contact metasomatism and eventual formation of the magnetite deposit.

Key words: ^{40}Ar - ^{39}Ar dating; mineralogy; Gunjiu iron deposit; Nixiong ore field; Coqen; Tibet

冈底斯地块夹持于北侧的班公湖-怒江碰撞结合带和南侧的雅鲁藏布江碰撞结合带之间,是一条近东西向长达2 000 km、南北宽 100 ~ 300 km 的巨型构造-火山岩浆岩带(潘桂棠等,2006),大地构造位置上处于冈瓦纳大陆北部边缘,晚古生代以来强烈的火山-岩浆活动和复杂的地质构造演化使其成为研究青藏高原特提斯开启-闭合、构造隆升以及大陆聚合与成矿等方面的金钥匙(Yin and Harrison, 2000; 尹安,2001; 杨志明等,2005; 潘桂棠等,2006; 侯增谦等,2006a,2006b,2006c,2006d; Hou and Cook, 2009; Hou *et al.*, 2009; 张洪瑞等,2010)。

尼雄矿田地处冈底斯中北部,距北部班公湖-怒江缝合带约 150 km,距南部雅鲁藏布江缝合带 100 km,是措勤-申扎铁铜多金属成矿带的重要组成部分。尼雄矿田位于隆格尔-工布江达断隆带,北接措勤-多瓦后陆拗陷带,南为南冈底斯带,以规模大、品位高而著称(吴旭铃等,2005; 胡为正等,2006; 曹圣华等,2007; 袁健芽等,2008)。区内主要出露的地层为上石炭统永珠组和中上二叠统海相地层(拉嘎组、

昂杰组、下拉组、敌布错组)。区内燕山期岩浆活动强烈,受区域 NW-NWW 构造影响,呈串珠状侵入于中上二叠统海相地层中,接触带是成矿的有利部位。

尼雄矿田长约 40 km,宽约 10 km,包括滚纠、阿木弄、沙松南和毛加峡磁铁矿床及日阿铜矿床,整体研究程度相对较低。它的形成是与班公湖-怒江洋向南俯冲有关,还是受雅鲁藏布江洋的控制,抑或是两者联合控制,还存在较大争议(吴旭铃等,2005; 曲晓明等,2006; 辛洪波等,2006,2007; 曹圣华等,2007; 张晓倩等,2010; 于玉帅等,2011,2012)。精确厘定矿床的成矿年龄不仅是矿床学的研究基础,也是构建合理矿床模型的关键。本文对尼雄矿田滚纠铁矿与磁铁矿紧密伴生的金云母进行了精细的矿物学研究和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化法测年,厘定矿床形成时限,为矿床研究提供精细的年代学资料。

1 矿床地质概况

1.1 矿区地质

滚纠铁矿出露地层主要有下石炭统一上二叠统

(拉嘎组 C_2-P_{1l}) 中二叠统碳酸盐岩(下拉组 P_{2x})、晚二叠统碎屑岩(敌布错组 P_{3d})和第四系(Q)松散堆积物(图 1),其中下拉组和敌布错组地层与成矿关系密切。拉嘎组集中分布在矿区东北部,呈 NW 向展布,与敌布错组呈断层接触,与二长花岗岩成侵入接触,岩性以灰、青灰色砂岩、杂砂岩为主。矿区下拉组呈 NW 向展布,主要分布在西北部,与敌布错组呈断层接触,与二长花岗岩呈侵入接触,可分为上下

两部分,下部为含生物碎屑微晶灰岩、生物碎屑(微晶)灰岩夹瘤状(内碎屑)灰岩,上部浅灰色含灰质粉晶白云岩夹生物碎屑灰岩、菱铁矿灰岩和含鲕状赤铁矿灰岩。敌布错组呈 NE 向展布,与下拉组、拉嘎组呈断层接触,与岩体呈侵入接触,岩性为含砾长石砂岩、含鲕状赤铁矿长石石英砂岩、含炭岩屑砂岩与黑色含炭泥质粉砂岩、含炭粉砂质泥岩互层,上部夹深灰色微晶灰岩。

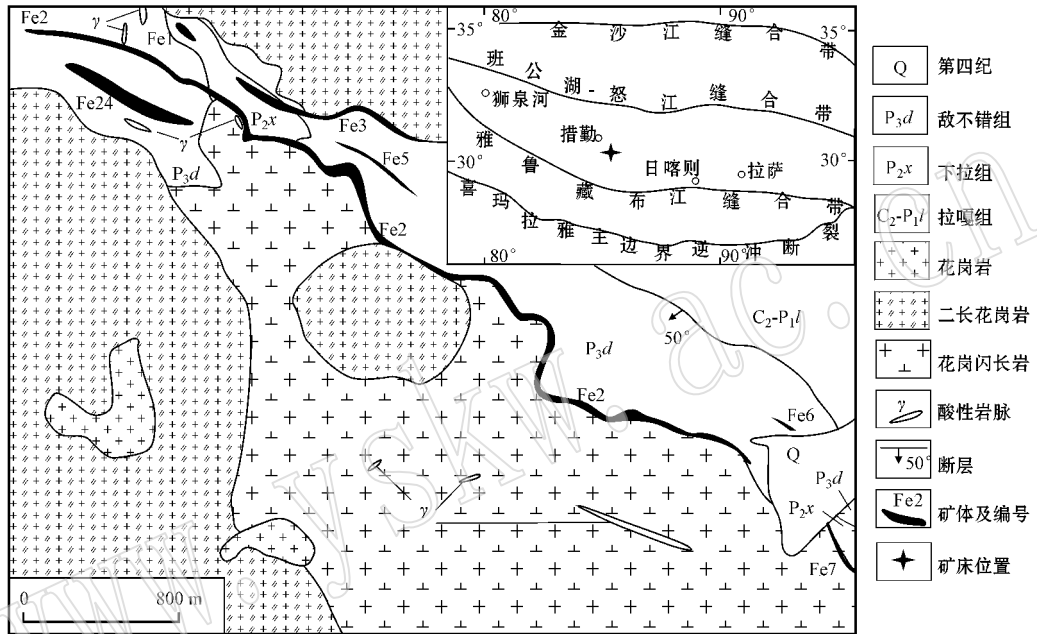


图 1 滚纠铁矿地质简图(据于玉帅等,2011)

Fig. 1 Sketch geological map of the Gunjiu iron deposit (after Yu Yushuai *et al.*, 2011)

矿区主要发育断裂构造、接触带构造以及层间滑动面构造,断裂以 NWW、NW 向为主。接触带附近蚀变强烈,具有明显的角岩化、大理岩化和夕卡岩化,是透镜状、脉状矿体赋存的主要部位,层间破碎带则是似层状矿体及矿体群产出的主要部位。矿区岩浆活动强烈,侵入岩体呈 NWW 向串珠状分布,主要岩性有中细粒黑云花岗闪长岩、中细粒黑云二长花岗岩、细粒斑状花岗岩及少量酸性岩脉。其中,中细粒黑云花岗闪长岩和中细粒黑云二长花岗岩分布范围广,侵入于下拉组、敌布错组地层中,发生广泛的接触交代作用,形成宽窄不等的夕卡岩带,铁矿体呈 NWW 向产于夕卡岩带内及敌布错和下拉组地层中。

1.2 矿体特征

在已圈定矿体中,滚纠铁矿有 Fe1、Fe2、Fe3、

Fe5、Fe24 等主要矿体,主要赋存在中酸性侵入岩与围岩地层的接触带,少量产于围岩层间破碎带,矿体规模大,且向深部延伸较大。其中,Fe2 号矿体长约 6 400 m,主体赋存于花岗闪长岩、二长花岗岩与敌布错组的接触界带(图 2),仅西北端铁矿体产于敌布错组层间破碎带中。矿体呈似层状,宽脉状,走向 NWW-NW,倾向 NNE-NE,倾角 50°~70°,矿体厚度 2.7~66.5 m,平均 17.4 m。Fe24 号矿体长约 1 km,矿体赋存于花岗闪长岩、二长花岗岩与敌布错组接触带及敌布错组层间破碎带中。矿体走向 NWW,倾向 NEE,倾角 30°~50°,似层状,宽脉状。钻孔 ZK10702 揭示矿体为多层复式矿体,累计厚度 50.7~56.1 m,单层厚一般 2.1~20.2 m,最大厚度 42.1 m。夹石厚 2~12 m,控制延深大于 290 m。

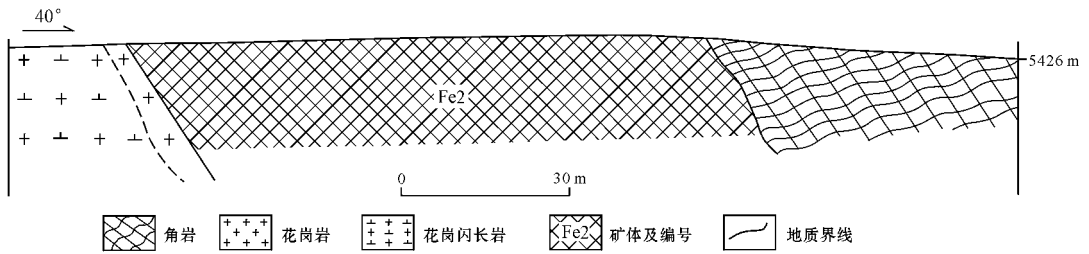


图 2 滚绞铁矿 Fe2 号矿体地质剖面图(据江西省地质调查院, 2007^①修改)

Fig. 2 Geological section of Fe2 ore body in the Gunjiu iron deposit (after Jiangxi Institute of Geological Survey, 2007)

1.3 矿物特征

滚绞铁矿矿石矿物组合较为复杂,主要矿石矿物有磁铁矿、穆磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿及少量褐铁矿、针铁矿等,脉石矿物主要有石榴石、透辉石、金云母、蛇纹石、绿帘石、阳起石、绿泥石、石英、方解石等,此外还见有少量的硫化物黄铁矿和黄铜矿等。矿石构造以致密块状构造、角砾状构造、浸染状构造为主,少量条带状构造、细脉状构造、稠密浸染状构造、皮壳状构造等。矿石结构主要有它形-半自形-自形粒状结构、残余鲕状结构,粒状变晶结构、交代残余结构、变余结构、片状结构等。

2 分析测试方法

金云母电子探针成分分析在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室进行,分析仪器型号是电子探针 JXA-8100、能谱仪 Inca Energy,加速电压 15.0 kV,电子束斑 $2\ \mu\text{m}$,探针束流 20 nA。

金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化法测年在中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 年代学实验室完成,其具体实验流程如下:

选纯度 $>99\%$ 金云母用超声波清洗,洗过程中要注意清洗液的选择和严格控制时间。一般先用经过两次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗 3 次,每次 3 min,在此过程中金云母表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质被清除。然后在丙酮中清洗两次,每次 3 min,以清除金云母表面吸附的油污等有机物质。

清洗后的金云母样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学

研究院的“游泳池堆”中进行的,使用 B4 孔道,中子流密度约为 $6.3 \times 10^{12}\ \text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。照射总时间为 3 000 min,积分中子通量为 $1.13 \times 10^{18}\ \text{n}/\text{cm}^2$;同期接受中子照射的还有用作监控样的标准样 ZBH-25 黑云母标样,其标准年龄为 $132.7 \pm 1.2\ \text{Ma}$,K 含量为 7.6%。

金云母样品阶段升温加热使用电子轰击炉,每个阶段加热 30 min,净化 30 min。质谱分析在 MM-1200B 质谱计上进行,每个峰值均采集 8 组数据。所有数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平: $\text{m}/\text{e} = 40, 39, 37, 36$ 时分别小于 $6 \times 10^{-15}\ \text{mol}$, $4 \times 10^{-16}\ \text{mol}$, $8 \times 10^{-17}\ \text{mol}$ 和 $2 \times 10^{-17}\ \text{mol}$ 。中子照射过程中产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 238\ 9$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004\ 782$ ($^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0.000\ 806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正, ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}/\text{a}$ 。详细实验流程见陈文等(2006)和张彦等(2006)。

3 测试结果

3.1 金云母矿物学特征

滚绞铁矿金云母手标本呈浅黄绿色,自形程度较高,多呈假六方板状(图 3a),在夕卡岩化角岩中分布广泛(图 3b),磁铁矿中可见团块状、鳞片状集合体(图 3a)。单片光镜下金云母呈无色、灰白色、浅黄色,弱多色性,正低突起(图 3c);正交镜下干涉色较高,可达鲜艳的三级蓝(图 3d),矿物形成顺序上,金云母较磁铁矿早,见有早期形成的金云母被磁铁矿穿切(图 3c、3d、3e)。电子探针成分分析显示(表 1),

① 江西省地质调查院, 2007. 西藏措勤县尼雄铁矿勘查地质报告.

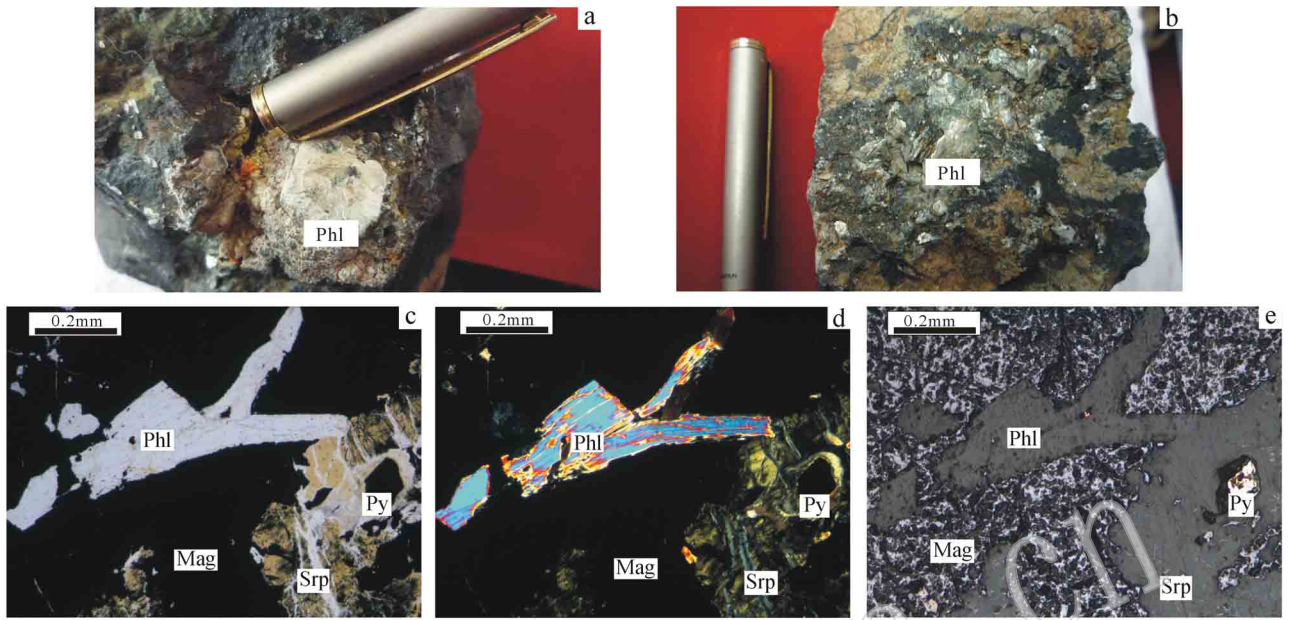


图 3 滚纠铁矿金云母手标本(a,b)及显微(c,d,e)照片

Fig. 3 Hand specimen photographs (a, b) and microphotographs (c, d, e) of phlogopite from the Gunjiu iron deposit
 a—自形假六方板状金云母集合体；b—自形-半自形板片状金云母集合体；c(单偏光)、d(正交偏光)、
 e(反射光)—晚期磁铁矿切穿金云母；Mag—磁铁矿；Phl—金云母；Py—黄铁矿；Srp—蛇纹石
 a—euhedral pseudo-hexagonal tabular aggregate of phlogopite in magnetite; b—euhedral-subhedral tabular aggregate of phlogopite in skarn hornfels;
 c(plainlight), d(crossed nicols), e(reflected polarized light)—late magnetite cutting across phlogopite; Mag—magnetite; Phl—phlogopites;
 Py—pyrite; Srp—serpentine

表 1 滚纠铁矿金云母电子探针分析结果

$\omega_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of phlogopite from the Gunjiu iron deposit

样品编号	CQ09-15			CQ09-15			
	7-2.1	7-2.3	7-3.1	10-1.1	10-1.3	10-2.1	10-2.2
SiO ₂	41.258	40.832	41.489	40.013	39.873	37.033	39.82
TiO ₂	0.119	0.206	0.115	0.010	0.010	0.096	0.140
Al ₂ O ₃	14.279	17.594	15.75	16.224	17.546	16.316	16.177
FeO	3.243	4.016	4.397	3.077	3.197	3.963	3.058
MnO	0.096	0.109	0.048	—	—	0.446	0.080
MgO	27.818	25.743	24.205	23.863	24.563	25.726	24.629
CaO	—	—	—	0.004	0.004	0.003	0.007
Na ₂ O	0.121	0.15	0.314	0.228	0.128	0.148	0.191
K ₂ O	8.269	10.080	10.894	12.986	11.386	8.828	12.209
F	0.381	0.675	0.613	—	—	0.756	0.725
Total	95.584	99.405	97.825	96.405	96.707	93.315	97.036
Si	2.869	2.763	2.870	2.833	2.785	2.679	2.791
Al ^{IV}	1.131	1.237	1.130	1.167	1.215	1.321	1.209
Al ^{VI}	0.039	0.166	0.154	0.186	0.230	0.070	0.128
Ti	0.006	0.010	0.006	0.001	0.001	0.005	0.007
Fe ³⁺	0.127	0.103	0.083	0.000	0.000	0.048	0.000
Fe ²⁺	0.061	0.125	0.171	0.182	0.187	0.191	0.179
Mn	0.006	0.006	0.003	0.000	0.000	0.027	0.005
Mg	2.884	2.597	2.496	2.518	2.558	2.774	2.574
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Na	0.016	0.020	0.042	0.031	0.017	0.021	0.026
K	0.734	0.870	0.961	1.173	1.015	0.815	1.092
Total	7.873	7.897	7.917	8.092	8.008	7.952	8.011

注：“—”表示未检出。

矿区金云母 SiO_2 含量变化范围是 37.03%~41.49% , 平均 40.05% ; Al_2O_3 含量变化范围是 14.28%~17.59% , 平均 16.27% ; FeO 含量变化范围是 3.06%~4.40% , 平均 3.56% ; MgO 含量变化范围是 23.86%~27.82% , 平均 25.22% ; K_2O 含量变化范围是 8.27%~12.99% , 平均 10.66% ; 多数样品含 F , F 含量 0.000%~0.756% 。 镁度 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ti})$ 在 0.90~0.94 之间 , 平均 0.92 。 在云母矿物分类图(图 4)所有样品都落在金云母区域内。

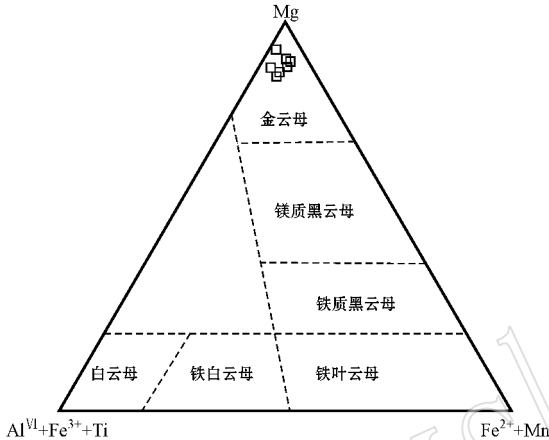


图 4 滚玢铁矿云母分类图解(据 Foster, 1960)

Fig. 4 Classification of mica from the Gunjiu iron deposit(after Foster, 1960)

3.2 金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学

对滚玢铁矿与磁铁矿伴生的金云母在 700~1400℃ 温度区间内进行了 12 个阶段逐步加热 , 其具体分析结果列于表 2 。 在最初 700~900℃ 的 4 个加热阶段获得的表面年龄值较小且变化范围较大(24.9~112.1 Ma) , ^{39}Ar 累积析出量低(仅为 7.60%) , 这可能是受核反冲和/或测量误差等因素所致(王松山, 1986) , 也可能反映矿物边缘 Ar 丢失或晶格缺陷造成的(邱华宁等, 1997) 。 900~1040℃ 范围内 , ^{39}Ar 析出量为 29.84% , 表面年龄为 119.4~120.7 Ma ; 1040~1080℃ 温度段得到 ^{39}Ar 析出量为 22.19% , 表面年龄 116.2 Ma ; 1080~1240℃ 温度区间内 , ^{39}Ar 的析出量为 39.74% , 获得的表面年龄为 109.2~114.2 Ma ; 1240~1400℃ 范围内 ^{39}Ar 析出量为 0.63% , 表面年龄 56.4 Ma 。 在计算 Ar 坪年龄时 , 一般要求至少有 3 个连续的加热阶段表面年龄相差较小且 ^{39}Ar 析出量超过 50% , 本次分析得到数据多数温度段表面年龄较为分散 , 表面年龄相差小的连续 3 个加热阶段 ^{39}Ar 析出量小于 50% , 未

能计算得到坪年龄(图 5) 。 陈文等(2011)指出在没有坪年龄的情况下 , 可以结合总气体年龄(Total age)与实际地质资料来讨论地质问题 , 此时的总气体年龄相当于一次全熔 Ar-Ar 或 K-Ar 年龄。本次分析获得的 12 个加热阶段总气体年龄为 112.3 Ma。

4 讨论

4.1 矿床形成时代

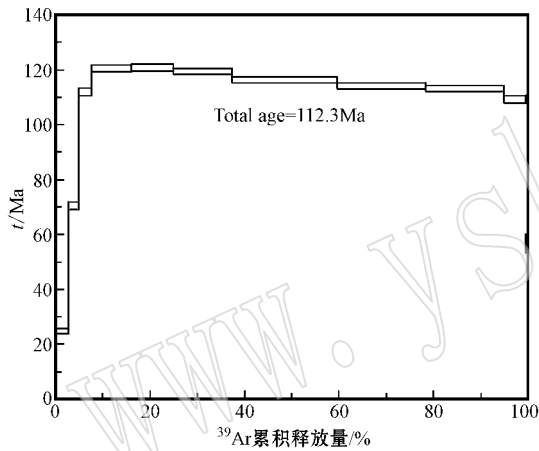
云母类矿物是 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年的最理想矿物之一(陈文等 2011) 。 一般来说 , 云母类矿物的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄记录的是其冷却年龄 , 即矿物形成最小年龄(Owen, 1988 ; Selby *et al.* , 2002) , 也可能是后期热事件影响时间(陈文等, 2011) 。 本次测试所用金云母是矿床最发育的夕卡岩矿物之一 , 与磁铁矿密切共生 , 结晶沉淀时间稍早于磁铁矿(图 3c, d, e) 。 金云母样品 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素测年未得到坪年龄值 , 只得到了 112.3 Ma 的总气体年龄(Total age) 。 金云母的 Ar 同位素体系的封闭温度约为 400~480℃(Giletti and Tullis, 1977) , 矿区磁铁矿的沉淀也主要发生在约 350℃ 氧化物阶段(未刊资料) , 因此分析得到的金云母总气体年龄 112.3 Ma , 应该是金云母形成的最小年龄 , 即磁铁矿开始沉淀的时间。于玉帅等(2011)获得滚玢矿区与成矿相关的二长花岗岩和花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 112.6 ± 1.6 Ma 和 113.6 ± 1.6 Ma , 与本次金云母测年结果吻合程度极高 , 证明本次分析数据是可靠的 , 且金云母形成后未受后期热事件影响 , 112.3 Ma 大致代表了矿床的形成时间。

尼雄矿田以夕卡岩型铁-铜矿化为主。其中 , 铁矿化以滚玢磁铁矿床为代表 , 矿体主要产于早白垩世晚期中酸性侵入体(二长花岗岩和花岗闪长岩, 约 113 Ma, 于玉帅等, 2011)与二叠系地层(下拉组和敌布错组)接触带的夕卡岩或夕卡岩化大理岩中及围岩地层(敌布错组)的层间破碎带中。与磁铁矿密切伴生的金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 总气体年龄为 112.3 Ma , 与岩体侵入年龄基本相同 , 指示尼雄矿田铁矿化发生于早白垩世晚期。以日阿铜矿为代表的铜矿化同样产于中酸性侵入体(斑状花岗岩)和二叠纪地层(下拉组)接触带的夕卡岩或夕卡岩化大理岩中 , 部分产于下拉组层间破碎带中 , 少量矿化与基性辉绿玢岩脉有关(曲晓明等, 2006 ; 辛洪波等, 2006, 2007) , 矿区斑状花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 89.9

表 2 滚玢铁矿金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年结果Table 2 ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic age analyses of phlogopite from the Gunjiu iron deposit

$t/^\circ\text{C}$	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}\text{mol}$	^{39}Ar 析出/ $\%$	t/Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
700	323.614 0	1.071 4	1.747 4	0.252 5	2.20	7.137 6	0.05	0.18	67.0	22
800	82.728 5	0.271 0	0.043 0	0.076 2	3.18	2.632 9	0.65	2.74	24.9	0.97
850	55.420 3	0.161 9	0.000 0	0.056 0	13.65	7.563 7	0.55	4.92	70.6	1.4
900	22.818 2	0.036 1	0.000 0	0.033 6	53.27	12.155 1	0.68	7.60	112.1	1.4
960	15.945 9	0.009 7	0.005 2	0.027 3	82.02	13.079	2.17	16.13	120.4	1.2
1 000	14.179 8	0.003 6	0.000 0	0.025 6	92.54	13.122 3	2.23	24.88	120.7	1.2
1 040	13.599 2	0.002 1	0.008 8	0.025 0	95.36	12.968 5	3.2	37.44	119.4	1.2
1 080	13.053 1	0.001 5	0.018 8	0.024 5	96.67	12.618 2	5.64	59.63	116.2	1.1
1 120	12.862 1	0.001 6	0.033 4	0.024 5	96.29	12.385 4	4.76	78.36	114.2	1.1
1 180	12.811 7	0.001 8	0.027 3	0.024 4	95.76	12.268 8	4.21	94.92	113.1	1.1
1 240	12.893 8	0.003 7	0.299 2	0.025 2	91.71	11.827 5	1.13	99.37	109.2	1.3
1 400	16.352 4	0.037 0	8.538 0	0.030 9	36.80	6.059 1	0.16	100	56.8	3.4

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值, $F = ^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$, 是放射成因 $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ 比值。

图 5 滚玢铁矿金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱图Fig. 5 ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum for phlogopite from the Gunjiu iron deposit

$\pm 1.6 \text{ Ma}$ (未刊资料)辉绿玢岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $87.2 \pm 1.6 \text{ Ma}$ (曲晓明等, 2006), 辛洪波等(2006)测得矿区的金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 $87.69 \pm 0.64 \text{ Ma}$, 等时线年龄为 $87.1 \pm 1.3 \text{ Ma}$, 与矿区斑状花岗岩和基性岩脉形成时代在误差范围内一致, 表明铜矿化与岩体侵入时代基本相同, 指示晚白垩世早期岩浆侵入是导致铜矿化的必要条件。由此可见, 尼雄矿田铁、铜矿化作用并非同时发生, 而是存在早白垩世晚期(113 Ma)的铁矿化和晚白垩世早期(87 Ma)铜矿化两个独立的矿化阶段。

4.2 矿床成因

滚玢铁矿二长花岗岩和花岗闪长岩与矿区北部达雄含闪长质包体的花岗闪长岩同是冈底斯则弄火

山岩浆弧晚期阶段岩浆侵入的产物, 形成于弧后伸展的大地构造背景下, 具有岛弧岩浆和壳幔混源的特点(周长勇等, 2008; 张晓倩等, 2010; Zhu *et al.*, 2011; 于玉帅等, 2011)。它记录了冈底斯中北部白垩纪火山活动的重要信息, 其成因对揭示冈底斯构造-岩浆演化具有重要意义。研究表明, 雅鲁藏布江洋壳约在白垩纪开始向冈底斯地块陡深俯冲(Ding *et al.*, 2003), 65 Ma 左右才发生陆陆碰撞(莫宣学等, 2003; 侯增谦等, 2006a; Hou and Cook, 2009), 因此, 早白垩世晚期不可能提供冈底斯中北部白垩纪火山活动所需的碰撞后伸展的构造条件。此外, 早白垩世晚期日喀则弧前盆地的发育表明雅鲁藏布江洋壳由陡深俯冲转向平缓俯冲, 而俯冲板片前缘是否能够到达措勤也是一个很大的疑问(于玉帅等, 2011)。多数研究者认为早白垩世晚期的羌塘陆壳已与冈底斯陆壳开始对接碰撞(Kapp *et al.*, 2003; 潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2009; Zhu *et al.*, 2009, 2011; 曲晓明等, 2012), 受冈底斯陆壳阻力的影响, 班公湖-怒江洋壳的俯冲速度必然会大幅降低, 在俯冲惯性和/或重力拖拽作用下, 已俯冲的洋壳发生回转, 软流圈物质上涌, 热的软流圈物质在上涌过程中引发岩石圈地幔和上覆地壳部分熔融, 形成壳幔混源岩浆, 于则弄火山岩浆弧南侧的弧后拉伸区上侵, 侵位结晶过程中遭遇富含 Ca、Mg 的二叠纪海相地层(下拉组 and 敌布错组灰岩、白云质灰岩等), 与之进行成分交换, 发生广泛的接触交代作用, 形成丰富的夕卡岩矿物和磁铁矿的大规模沉淀。

5 结论

(1) 滚纠铁矿与磁铁矿伴生的金云母总气体年龄为 112.3 Ma, 与成岩体年龄 112.6 ± 1.6 Ma 和 113.6 ± 1.6 Ma 几乎一致, 代表了矿床的形成时间。

(2) 尼雄矿田存在铁、铜两个矿化阶段, 即早白垩世晚期(约 113 Ma)以滚纠磁铁矿床为代表的铁矿化阶段和晚白垩世早期(约 87 Ma)以日阿铜矿为代表的铜矿化阶段。

(3) 滚纠铁矿的形成可能与雅鲁藏布江洋壳向北俯冲无关, 而是班公湖-怒江洋壳向南俯冲的结果。

致谢 野外工作得到江西省地质调查院胡为正、曹圣华、黄建村、黄俊平等高级工程师, 王卓、钱正江、杜昌法等助理工程师的支持和帮助, 电子探针分析在东华理工大学郭国林老师的指导下完成, ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年由地质研究所 Ar-Ar 年代学实验室陈文研究员和张彦研究员完成, 审稿专家细致地审阅并提出了中肯的修改意见, 为文本的定稿做出巨大贡献, 在此一并表示衷心的感谢!

References

- Cao Shenghua, Li Dewei, Yu Zhongzhen, *et al.* 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 Wen, Wan Yusheng, Li Huaqin, *et al.* 2011. Isotope geochronology: Technique and application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917~1947(in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, *et al.* 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau: Evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867~872(in Chinese with English abstract).
- Ding Lin, Kapp P, Zhong Dalai, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 44: 1835~1865.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *U. S. Geol. Surv., Prof. Paper*, 354: 11~49.
- Giletti B J and Tullis J. 1977. Studies in diffusion: Pressure dependence of Ar diffusion in phlogopite mica[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 35: 180~183.
- Hou Zengqian and Cook Nigel. 2009. Metallogensis of the Tibetan Collisional Orogen: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 1~28.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, *et al.* 2006a. Metallogensis in the Tibetan collision orogenic belt: Tectonic setting, metallogenic epoch and deposit type[J]. *Geol. in China*, 33(2): 348~359(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006c. The Tibetan collisional orogenic belt: II. Metallogensis in late-collisional epoch[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 337~358(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006d. Metallogensis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629~651(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Zhiming, Qu Xiaoming, *et al.* 2009. The Gangdese Miocene porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 25~51.
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, *et al.* 2006b. The Tibetan collisional orogenic belt: I. Metallogensis in main-collisional epoch[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 521~543(in Chinese with English abstract).
- Hu Weizheng, Huang Xiaowen and Jiang Jinming. 2006. Geological features and genesis of the Muzhiding magnetite deposit in Cuoqin County, Tibet[J]. *Resources Survey and Environment*, 27(3): 200~208(in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 22(4): 3-1~3-23.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Owen J W. 1988. Metamorphic conditions and geochronological constraints across the Grenville front zone, Coastal Labrador[J]. *Lithos*, 21: 13.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Qiu Huaning and Peng Liang. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology and Its Applications in Dating Fluid Inclusion[M]. Hefei: Publishing House of the University of Science and Technology of China, 54~65(in Chinese).
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Du Dedao, *et al.* 2012. Ages of post-collisional A-type granite and constraints on the closure of the oceanic

- basin in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, the Tibetan plateau [J]. *Geochimica*, 41(1): 1 ~ 14(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Xu Wenyi, *et al.* 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).
- Selby D, Creaser R A, Hart C J, *et al.* 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina Gold Belt, Alaska [J]. *Geology*, 30: 791 ~ 794.
- Wang Songshan. 1986. ⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectrum of tonalite from Shujingou in Qingyuan area [J]. *Geoscience*, 1: 97(in Chinese with English abstract).
- Wu Xuling and Chen Zhenghua. 2005. Geochemistry and genesis of the Nyixung rock body in northern Tibet [J]. *Geology in China*, 32(1): 122 ~ 127(in Chinese with English abstract).
- Xin Hongbo and Qu Xiaoming. 2006. Geological characteristics and ore-forming epoch of Ri 'a copper deposit related to bimodal rock series in Coqin County, western Tibet [J]. *Mineral Deposits* 25(4): 477 ~ 482(in Chinese with English abstract).
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Ren Likui, *et al.* 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 Zhiming, Xie Yuling, Li Guangming, *et al.* 2005. Characteristics and forming process of ore-forming fluids at Qulong copper deposit in Gangdise porphyry copper belt, Tibet [J]. *Geology and Exploration*, 41(2): 21 ~ 26(in Chinese with English abstract).
- Yin An. 2001. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen in the context of Phanerozoic continental growth of Asia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(3): 193 ~ 230(in Chinese with English abstract).
- Yin An and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 28: 211 ~ 280.
- Yu Yushuai, Gao Yuan, Yang Zhusen, *et al.* 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): 1 949 ~ 1 960(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Liu Yingchao, *et al.* 2012. 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).
- Yuan Jianya, Cao Shenghua, Luo Xiaochuan, *et al.* 2008. Discovery, Characteristics and significance of the Nixiong skarn iron-copper field in Coqin County, Tibet [J]. *Geology in China*, 35(1): 88 ~ 94(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian and Yang Zhiming. 2010. Metallogensis and geodynamics of Tethyan metallogenic domain: A review [J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 113 ~ 133(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 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): 1 793 ~ 1 804(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Chen Wen, Chen Kelong, *et al.* 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ³⁹Ar recoil loss-Example from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province [J]. *Geological Review*, 52(4): 556 ~ 561(in Chinese with English abstract).
- Zhou Changyong, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2008. Petrogenesis of Daxiong pluton in western Gangdise, Tibet: Zircon U-Pb dating and Hf isotopic constraints [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 348 ~ 358(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, *et al.* 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet [J]. *Chemical Geology*, 268: 298 ~ 312.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2009. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1 ~ 20(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 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, 等. 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.
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 等. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用 [J]. *地质学报*, 85(11): 1 917 ~ 1 947.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据 [J]. *岩石学报*, 22(4): 867 ~ 872.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用构造背景、时空分布和主要类型 [J]. *中国地质*, 33(2): 348 ~ 359.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚

- 碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 2006d. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 629~651.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337~358.
- 胡为正, 黄孝文, 蒋金明. 2006. 西藏措勤县木质顶磁铁矿床地质特征及成因分析[J]. 资源调查与环境, 27(3): 200~208.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程与火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 邱华宁, 彭良. 1997. ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 54~65.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. 地球化学, 41(1): 1~14.
- 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺, 等. 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.
- 王松山. 1986. 清源树基沟英云闪长岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱[J]. 地质科学, 1: 97.
- 吴旭铃, 陈振华. 2005. 西藏尼雄岩体岩石地球化学特征及其成因探讨[J]. 中国地质, 32(1): 122~127.
- 辛洪波, 曲晓明. 2006. 藏西措勤县日阿与斑(玢)岩有关的铜矿床的矿床地质特征与成矿时代[J]. 矿床地质, 25(4): 477~482.
- 辛洪波, 曲晓明, 任立奎, 等. 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.
- 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 等. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带驱龙铜矿成矿流体特征及其演化[J]. 地质与勘探, 41(2): 21~26.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅-青藏高原造山带地质演化-显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 22(3): 193~230.
- 于玉帅, 高原, 杨竹森, 等. 2011. 西藏措勤尼雄矿田滚斜铁矿侵入岩 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, 等. 2012. 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.
- 袁健芽, 曹圣华, 罗小川, 等. 2008. 西藏措勤县尼雄夕卡岩铁铜矿田的发现及地质特征与找矿意义[J]. 中国地质, 35(1): 88~94.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 2006. 成岩混层(1/S)Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556~561.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明. 2010. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. 矿床地质, 29(1): 113~133.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 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.
- 周长勇, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2008. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 24(2): 348~358.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地学前缘, 16(2): 1~20.