

文章编号: 0258-7106(2008)04-0502-18

山西代县碾子沟金红石矿床地球化学特征*

徐少康, 邓小林, 刘力生, 云连涛

(中化地质矿山总局地质研究院, 河北涿州 072754)

摘要 文章对矿区内基性岩、基性变质岩、酸性变质岩及蚀变岩中常量和微量元素的含量、相关性、变异系数、REE分布模式等特征进行了研究。笔者认为: 该矿床的成矿物质来源于上地幔, 成矿作用有3次, 前2次为变质成矿作用, 第3次为蚀变成矿作用, 以后者为主, 蚀变过程中, Ti、Fe、REE、B等元素发生了迁移, Ti的进一步富集、Ti与Fe的分离是重要的成矿因素, 矿床的形成与板块运动密切相关。有利于成矿的大地构造环境和部位为: 板块的缝合部位, 蚀变带与基性(变质)岩层交叉处, 蚀变带中部, B含量高处。

关键词 地球化学, 粗粒型金红石矿床, 地球化学特征, 矿床成因, 成矿规律, 找矿方向, 山西代县
中图分类号: P618.47 文献标志码: A

Geochemical characteristics of Nianzigou rutile deposit in Daixian County, Shanxi Province

XU ShaoKang, DENG XiaoLin, LIU LiSheng and YUN LianTao

(Institute of Geology, Bureau of Geology and Mining of China Chemical Industry, Zhuozhou 072754, Hebei, China)

Abstract

The authors studied contents, correlation, variation coefficients and REE distribution patterns of major and trace elements in basic rocks, basic metamorphic rocks, acid and alkaline metamorphic rocks and altered rocks within the ore district. Some conclusions have been reached: Ore-forming materials were derived from the upper mantle; there existed three times of ore-processes: the first two times were metamorphic ore-forming processes, and the third time was altered ore-forming process, with the third time being dominant; during the alteration, Ti, Fe, REE and B migrated, Ti was further concentrated, and the separation of Ti from Fe constituted an important metallogenic factor; the formation of the ore deposit was closely related to plate motion. Geotectonic environments and positions favorable for mineralization seemed to be the suture zone of the plate, the intersection between the altered belt and the basic (metamorphic) strata, the middle part of the altered zone, and the high B content position.

Key words: geochemistry, coarse-grained type rutile deposit, geochemical characteristics, genesis of ore deposit, ore-forming regularity, ore-prospecting target, Daixian County of Shanxi

金红石(TiO_2)主要用于提炼金属钛和制造高档钛白粉。其深加工产品广泛应用于航天、航空、化工、冶金、造纸等领域 (Stanley, 1983)。

近几十年来, 中国虽然在内蒙古、山西、河南、江苏等省区, 在金红石找矿方面取得了重要进展 (赵一鸣等, 2006; 黄建平等, 2002), 但其探明资源量仍严

* 本文得到中国明达化工地质总公司《山西代县碾子沟金红石矿床成矿条件研究》项目的资助

第一作者简介: 徐少康, 男, 1955年生, 高级工程师, 长期从事化工矿产地质研究。E-mail: hzxsk@sina.com

收稿日期: 2007-06-25; 改回日期: 2008-01-18。许德焕编辑。

重不足,且以细粒型为主,粗粒超大型金红石矿床仅山西代县碾子沟一处(徐少康,2001a)。

山西代县碾子沟金红石矿床是中国唯一也是世界上唯一的变质蚀变型金红石矿床(Clerici et al., 1981; Force, 1991; Mancini et al., 1979; McLimans et al., 1999; Page et al., 1990; Smirnov et al., 1983; Stanley, 1983; 黄建平等, 2002; 2003; 李博昀等, 1998; 徐少康等, 2000; 2001b; 2002; 2004; 中国地质矿产信息院, 1996), 但对其所做的研究工作相对较少。自 1997 年迄今, 笔者对该矿床的金红石粒度分析、矿体和矿石类型、变质作用特征及其与成矿的关系、蚀变作用特征与成矿的关系等问题进行了研究。在此基础上, 本文对该矿床的地球化学特征进行了探讨, 于深化对其成矿规律的认识、指导找矿具重要意义。

需要说明的是:“蚀变”实质上也是一种“变质”, 与狭义的“变质”不同的是:“蚀变”有高温热液的参与, 其作用过程和所形成的岩(矿)石的特征, 均与狭义的“变质”有明显不同。随着研究的深入及对矿床成因类型的划分越来越细, 矿床诸成因类型的命名要体现出各自的成因特征及相互间的差别。鉴此, 并考虑到碾子沟矿床的特点和中国金红石矿床成因类型的统一划分, 故将碾子沟矿床的成因类型命名为“变质蚀变型”, 此处的“变质”是指狭义的“变质”。

1 矿区地质概况及矿床主要特征

1.1 矿区地质概况

碾子沟金红石矿床位于山西省代县县城 NNE 方向约 26 km 处。其大地构造位置处于华北地台山西台背斜恒山重褶带内。

1.1.1 矿区地层

该矿区出露地层为新太古界碾子沟组(Ar_3n)和冰淋沟组(Ar_3b) (图 1)。碾子沟组主要由基性变质岩(角闪片岩和榴闪岩)及变粒岩组成, 据岩性组合, 可将其分为 3 段: 一段(Ar_3n^1), 厚约 85~260 m, 主要为基性变质岩(角闪片岩和榴闪岩); 二段(Ar_3n^2), 厚约 30~168 m, 为基性变质岩(角闪片岩和榴闪岩)与变粒岩互层; 三段(Ar_3n^3), 厚约 190~450 m, 主要为变粒岩, 局部夹角闪片岩。冰淋沟组, 矿区内出露的是该组底部的黑云斜长片麻岩, 厚约 40~500 m。

角闪片岩 为黑色, 中细粒粒状变晶结构, 片状

构造。矿物成分主要为角闪石(70%~80%), 次为斜长石(7%~15%)和石英(一般少于 5%, 局部可达 10%~15%), 含少量金红石(不超过 1%)、钛铁矿和磁铁矿(均不超过 5%)等。

榴闪岩 以黑色为主, 夹杂棕色, 不等粒粒状变晶结构, 块状构造。矿物成分主要为角闪石(一般 70%~80%), 次为石英(一般 10%~15%)、石榴子石(一般 10%左右)和磁铁矿(一般 10%左右), 含少量斜长石(一般不超过 7%)、钛铁矿(一般不超过 5%)和金红石(不超过 1%)等。其中, 石榴子石为棕色, 半自形-自形粒状, 粒度一般为 3~8 mm, 边缘常有一圈由石英和角闪石等组成的退变边, 说明岩石经历了退变质作用。其他矿物的粒度一般小于 1~3 mm。在蚀变带附近或蚀变带中残留的该种岩石也常发生轻度蚀变, 其中的金红石有 2 种: ① 与角闪石共生; ② 与蚀变矿物共生。金红石含量高者成为矿石。

变粒岩 为灰白色, 细粒柱状粒状变晶结构, 块状构造。矿物成分主要为斜长石(大于 70%), 次为石英(10%左右)和角闪石(10%~15%)等。

1.1.2 矿区构造

矿区内构造主要为单斜构造和断裂。单斜构造表现为地层总体呈 NW-SE 走向, 总体倾向 SW, 倾角 45~60°。断裂可分为 3 期(图 1): 成矿前断裂 F_1 , 为压扭性, 总体走向呈 NW-SE 向, 倾向 SW, 倾角 30~55°; 成矿期断裂 F_2 和 F_3 , 均为张性, 走向 NW, 倾向 SW, 倾角一般 >50°; 其他断裂为成矿后断裂。

1.1.3 矿区岩浆岩

矿区内出露的岩浆岩主要为五台期的正长岩(已变质为角闪钾长片麻岩)、晋宁期及喜马拉雅期的基性脉岩, 均与碾子沟组呈侵入接触关系(图 1)。此外, 局部可见规模较小的钾长石脉岩和石英脉岩。

晋宁期基性脉岩, 厚度为 10~40 m, 受 F_1 控制, 轻度变质, 表现为主体矿物巨晶直闪石和石榴子石晶体部分变质为石英和十字石等, 钛铁矿部分变质为金红石等。在蚀变带附近或蚀变带中残留的该种岩石常发生轻度蚀变, 其中的金红石有 2 种: ① 与钛铁矿连生; ② 与蚀变矿物共生。金红石含量高者成为矿石。

1.1.4 矿区蚀变岩

矿区内蚀变岩发育, 可分为 5 类: 细晶直闪(片)岩, 粗晶直闪(片)岩, 高铁低钛绿泥片岩(简称 F 型

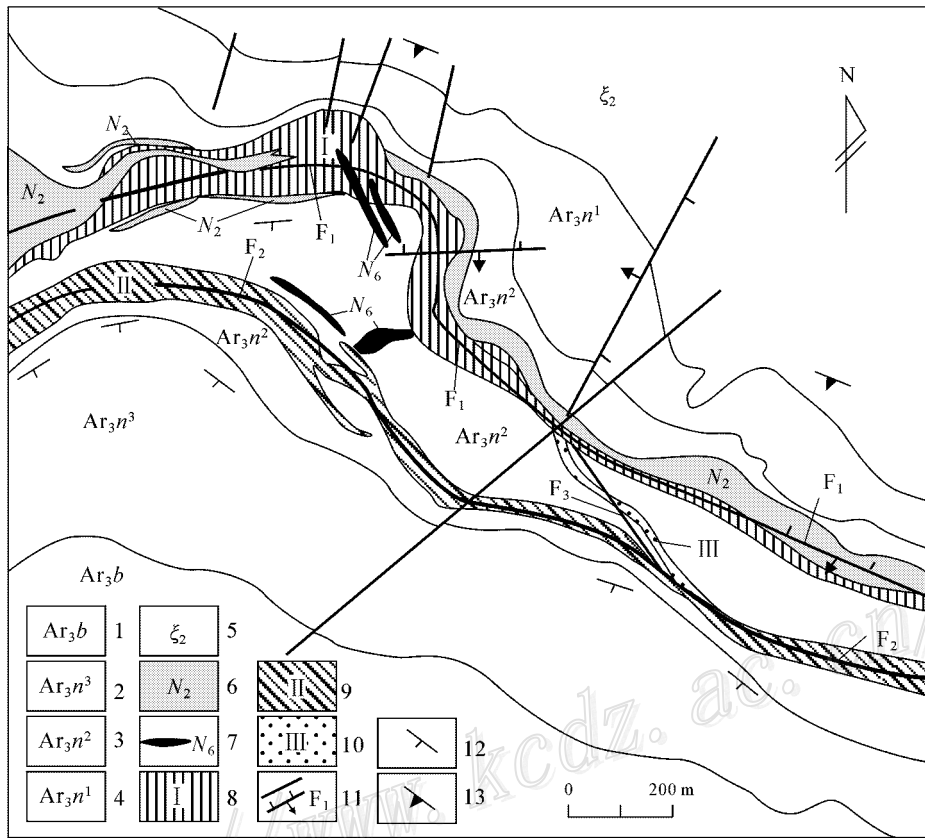


图1 碾子沟金红石矿床矿区地质简图

1—新太古界冰淋沟组片麻岩, 2—新太古界碾子沟组三段变粒岩夹斜长角闪片岩, 3—新太古界碾子沟组二段基性变质岩与变粒岩互层; 4—新太古界碾子沟组一段基性变质岩(斜长角闪片岩和榴闪岩); 5—五台期变碱性岩(原岩为正长岩, 现岩性为角闪钾长片麻岩); 6—晋宁期基性侵入岩, 7—喜马拉雅期基性侵入岩, 8—I号蚀变带, 9—II号蚀变带, 10—III号蚀变带, 11—断裂, 12—地层及蚀变带产状, 13—片麻理产状

Fig. 1 Geological sketch map of Nianzigou ore district

1—Gneiss of Neoproterozoic Binglingou Formation; 2—3rd Member of Neoproterozoic Nianzigou Formation: granulite intercalated with plagioclase-amphibole schist; 3—2nd Member of Neoproterozoic Nianzigou Formation: basic metamorphic rock interbedded with granulite; 4—1st Member of Neoproterozoic Nianzigou Formation: basic metamorphic rock (plagioclase-amphibole schist, garnet-amphibole rock); 5—Meta-alkaline rock of Wutai period (amphibole-potash feldspar gneiss from original syenite); 6—Basic intrusive rock of Jinning period; 7—Basic intrusive rock of Himalayan period; 8—No. I alteration zone; 9—No. II alteration zone; 10—No. III alteration zone; 11—Fault; 12—Attitudes of strata and alteration zone; 13—Attitude of gneissosity

绿泥片岩), 高钛低铁绿泥片岩(简称T型绿泥片岩)滑石(片)岩。蚀变岩矿物成分复杂, 残留的原岩矿物较多, 不同世代的矿物叠加, 交代结构发育。

细晶直闪(片)岩, 以细晶直闪石为主, 常见角闪石残晶(残留的原岩矿物)和呈细脉状分布并对细晶直闪石有交代现象的绿泥石、滑石、磁铁矿等, 金红石少与细晶直闪石共生, 而多与绿泥石和滑石共生。粗晶直闪(片)岩, 以粗晶直闪石为主, 常见角闪石残晶和呈细脉状分布并对粗晶直闪石有交代现象的绿泥石、滑石、磁铁矿等, 金红石少与粗晶直闪石共

生, 多与绿泥石和滑石共生, 在野外可见粗晶直闪(片)岩穿插细晶直闪(片)岩的现象。F型绿泥片岩, 以绿泥石为主, 次为磁铁矿、赤铁矿、滑石、直闪石, 有少量钛铁矿等(铁质矿物含量为6%~15%), 均呈共生关系, 此外, 可见呈细脉状分布的滑石等。T型绿泥片岩, 以绿泥石为主, 次为滑石和金红石, 有少量钛铁矿等, 其金红石含量可达8%, 均呈共生关系。滑石(片)岩, 以滑石为主, 次为绿泥石、金红石, 有少量钛铁矿、石英等, 均呈共生关系, 局部可见呈细脉状分布的斜长石、石英、金红石。金红石含量

高者成为矿石。通常，F 型绿泥片岩普遍不含或极少含金红石，不形成矿石。

据矿物的微观穿插交代关系及岩石的宏观产状等，可确认岩石形成的先后次序为：细晶直闪(片)岩→粗晶直闪(片)岩→F 型绿泥片岩→T 型绿泥片岩→滑石(片)岩。据此确定的蚀变过程为：细晶直闪石化→粗晶直闪石化→F 型绿泥石化→T 型绿泥石化→滑石化→斜长石化。前 5 种蚀变分别在不同部位形成了相应的岩石，而斜长石化仅在滑石(片)岩等岩石中形成细脉。T 型绿泥石化和滑石化，虽然形成的岩石量较少，却普遍叠加在细晶直闪(片)岩和粗晶直闪(片)岩上，这对成矿具有重要意义。金红石，开始少量形成于细晶直闪石化和粗晶直闪石化阶段，后又大量形成于 T 型绿泥石化阶段和滑石

化的早、中期，在斜长石化阶段其形成量甚微。

此 5 类蚀变岩密切共生，形成 3 条蚀变岩带，分别受断裂 F₁、F₂、F₃ 的控制(图 1)。其中，I 号蚀变带是最重要的含矿带，该带的形成过程实质就是该矿床的成矿过程，因此，本文将其作为研究重点。该带规模最大，岩性分带明显，从两侧到中部，依次为 F 型绿泥片岩或绿泥石化直闪(片)岩、细晶直闪(片)岩、粗晶直闪(片)岩、T 型绿泥片岩和滑石(片)岩，带内可见碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩的残留体(图 2)。此 5 类蚀变岩的出露面积分别为：细晶直闪(片)岩 20 637.74 m²，粗晶直闪(片)岩 32 450.44 m²，F 型绿泥片岩 26 659.00 m²，T 型绿泥片岩 1 378.91 m²，滑石(片)岩 7 354.21 m²。总面积为 88 480.30 m²(据图 2 测算)。

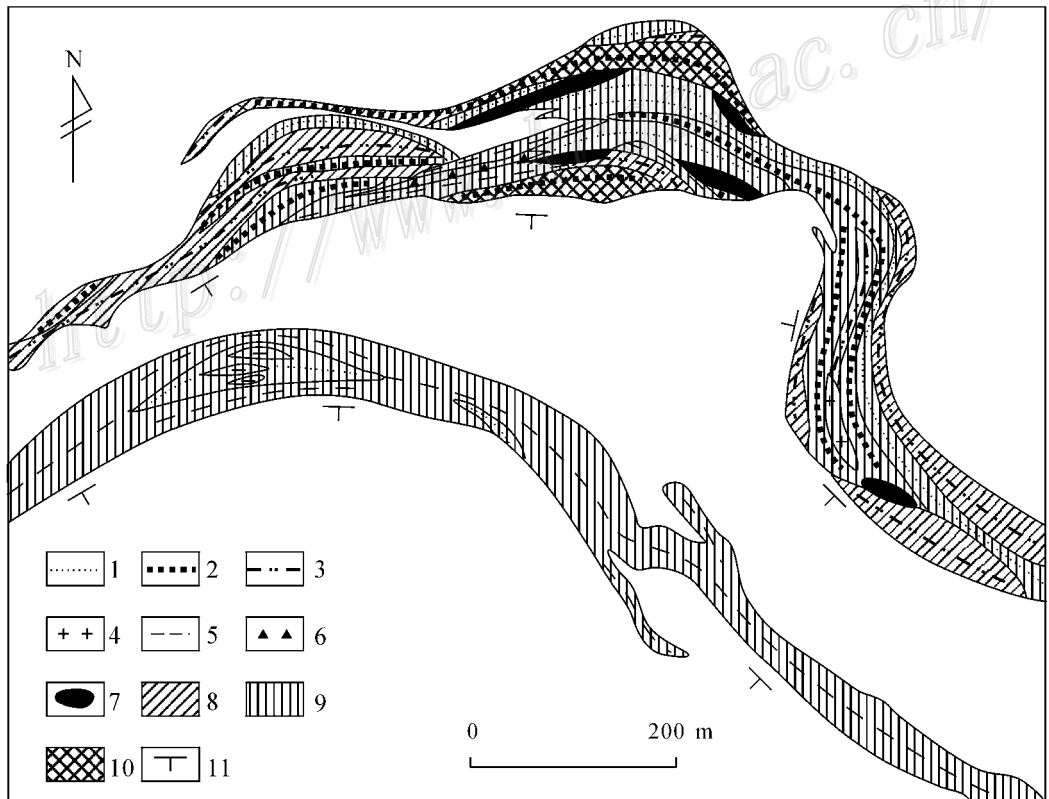


图 2 碾子沟矿区蚀变岩分布略图

1—细晶直闪(片)岩及细晶直闪石化分布区；2—粗晶直闪(片)岩及粗晶直闪石化分布区；3—F 型绿泥片岩；4—T 型绿泥片岩；5—滑石(片)岩；6—晋宁期基性岩蚀变残留体；7—碾子沟组基性变质岩蚀变残留体；8—绿泥石化分布区；9—滑石化分布区；10—滑石化与绿泥石化叠加区；11—蚀变带产状。北部蚀变带为 I 号蚀变带，南部蚀变带为 II 号蚀变带。

Fig. 2 Geological sketch map of Nianzigou ore district, showing distribution of altered rocks

1—Distribution of fine-crystalline anthophyllite schist and fine-crystalline anthophyllitization ;2—Distribution of macrocrystalline anthophyllite schist and macrocrystalline anthophyllitization ;3—F type chlorite schist ;4—T type chlorite schist ;5—Talc schist ;6—Altered basic rock relict of Jinning period ;7—Altered basic metamorphic rock relict of Nianzigou Formation ;8—Distribution of chloritization ;9—Distribution of talcization ;10—superimposition of talcization and chloritization ;11—Attitude of alteration zone. The northern part is No. I alteration zone , whereas the southern part is No. II alteration zone

研究表明,这些蚀变岩形成于中生代(徐少康等 2002, 2004)。

1.2 矿床主要特征

碾子沟矿区内的矿体呈似纺锤状、似板状、透镜状等,规模较大的有4个,其中的3个产于I号蚀变带,另1个产于II号蚀变带的西北端(图3)。

该矿床的矿石类型有6种:①浅褐灰色细晶直闪石型片状矿石;②灰白色粗晶直闪石型块状矿石;③灰绿色中细晶绿泥石型片状矿石;④灰白色中细晶滑石型块状矿石;⑤黑色中细晶角闪石型片状矿石;⑥灰绿色巨晶直闪石型块状矿石。矿石的岩性:①—④为蚀变岩,⑤为碾子沟组基性变质岩,⑥为晋宁期基性岩。其中,①和②分布最广,③和④品位最高,⑤和⑥仅局部见到。一般情况下,同一矿体中存在多种矿石类型。

诸类矿石中的金红石为棕红色,以半自形粒状为主,少数为半自形-自形短柱状,单晶粒度一般为0.1~9 mm;主要呈不规则团块状或近等轴状集合体产出,集合体大小一般为0.25~80 mm(产于河南、湖北、江苏、陕西等省的金红石矿床,其金红石主

要呈单晶产出,粒径一般为0.01~0.25 mm,少数达0.6 mm)。

据岩石的主要常量化学组分特征,可将矿区内的岩石分为3大类:基性(变质)岩类(包括碾子沟组基性变质岩、晋宁期和喜马拉雅期的基性岩)、酸性变质岩类(包括碾子沟组变粒岩、冰淋沟组片麻岩和五台期变碱性岩)、蚀变岩类(包括细、粗晶直闪(片)岩、F、T型绿泥片岩、滑石(片)岩)。各类岩石的常量及微量元素含量数据见表1和表2。

2 基性(变质)岩类和酸性变质岩类地球化学特征

2.1 基性(变质)岩类地球化学特征

碾子沟组基性变质岩 在尼格里图上,该岩石位于岩浆岩区(限于篇幅,有关图件略)。其常量化学成分总体上与世界玄武岩接近,但FeO偏高; $(Na_2O + K_2O)$ 含量为1.94%~0.82%,平均1.52%;里特曼碱度指数为0.63~0.13,平均0.39。结合其呈层状产出以及具有变余气孔构造等特征,

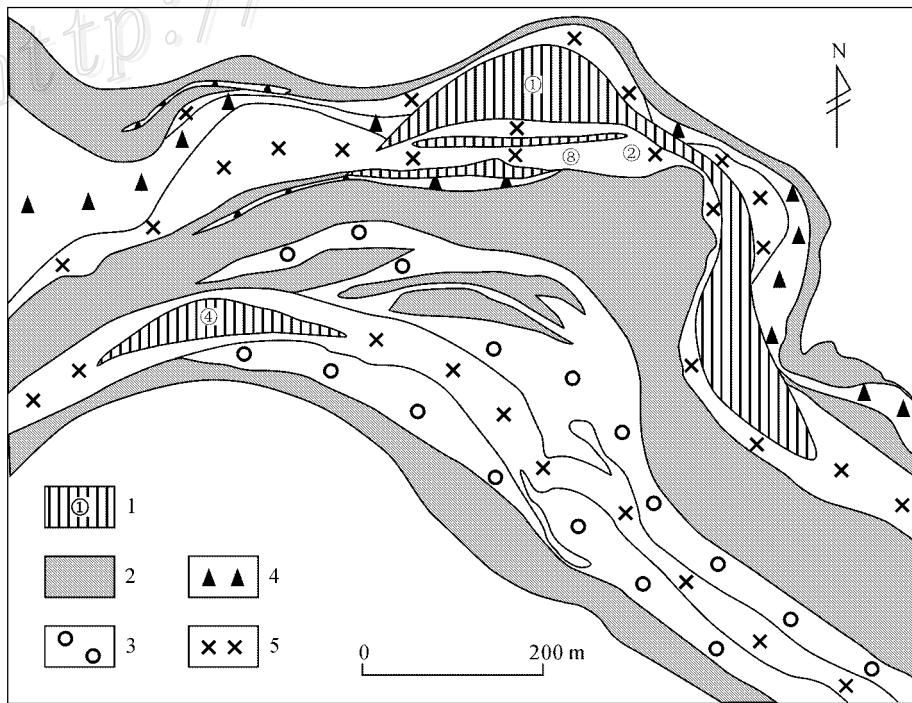


图3 碾子沟矿区主要矿体平面分布图

1—矿体及编号 2—碾子沟组基性变质岩 3—碾子沟组变粒岩 4—晋宁期基性岩 5—蚀变岩

Fig. 3 Distribution of main ore bodies in Nianzigou ore district

1—Ore body and its serial number; 2—Basic metamorphic rock of Nianzigou Formation; 3—Granulite of Nianzigou Formation;

4—Basic rock of Jinning period; 5—Altered rock

表 1 碾子沟矿区各类岩石的常量化学成分
Table 1 Major chemical composition of various kinds of rocks from Nianzigou ore district

岩石 类型	样品 序号	$w(B)/\%$															
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Ni ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	S	总和	R(TiO ₂)
I	1	50.00	1.60	12.55	4.58	11.32	0.26	5.50	9.40	0.80	0.66	0.27	0.92	1.53	0.23	99.62	0.24
	2	50.22	1.72	13.32	5.42	10.10	0.24	5.76	8.60	1.07	0.81	0.27	0.72	1.32	0.02	99.59	0.40
	3	49.00	0.98	13.06	4.32	9.54	0.20	7.54	9.80	1.08	0.86	0.16	0.59	2.16	0.02	99.31	0.34
	平均	49.74	1.43	12.98	4.77	10.32	0.23	6.27	9.27	0.98	0.78	0.23	0.74	1.67	0.09	99.50	0.33
II	4	48.28	1.14	11.8	2.78	13.46	0.05	18.56	0.97	0.86	0.06	0.20	0.58	0.82	0.03	99.59	1.06
	5	40.48	1.23	18.32	9.58	19.26	0.06	8.50	1.00	0.10	0.02	0.24	0.22	1.01	0.02	100.04	0.24
	平均	44.38	1.19	15.06	6.18	16.36	0.06	13.53	0.99	0.48	0.04	0.22	0.40	0.92	0.03	99.84	0.65
III	47.60	1.33	13.81	5.34	12.74	0.16	9.17	5.95	0.78	0.48	0.23	0.61	1.37	0.06	99.63		
IV	40.25	2.98	14.17	8.76	4.76	0.19	7.46	8.54	0.98	0.67	1.02	0.60	8.60	0.05	99.03	0.13	
V	72.15	0.68	10.72	3.59	3.82	0.10	1.13	2.06	4.60	0.30	0.12	0.22	0.22	0.51	0.01	100.01	0.005
VI	66.29	0.28	16.23	1.56	1.97	0.06	1.66	5.30	4.33	0.98	0.12	0.24	0.24	0.66	0.01	99.69	0.034
VII	57.85	0.45	19.86	2.00	2.66	0.09	1.90	5.16	6.38	2.45	0.25	0.31	0.31	0.45	0.01	99.82	0.05
VIII	65.43	0.47	15.60	2.38	2.82	0.08	1.56	4.17	5.10	1.24	0.16	0.26	0.26	0.54	0.01	99.82	
IX	10	48.19	3.78	4.97	1.74	10.46	0.12	24.48	1.22	0.22	0.01	0.07	0.35	3.22	0.00	98.83	3.5
	11	48.24	6.52	6.28	1.98	6.30	0.10	20.74	4.82	0.50	0.03	0.82	0.28	3.49	0.03	100.13	5.38
	12	51.56	1.77	8.62	1.72	8.32	0.08	20.48	4.42	0.66	0.06	0.02	0.27	1.38	0.01	99.37	1.61
	13	43.41	0.87	7.40	3.00	10.05	0.06	25.89	2.11	0.10	0.01	1.09	0.29	6.02	0.02	100.32	0.017
	14	41.49	0.84	9.53	4.11	10.15	0.05	25.34	1.41	0.19	0.02	0.26	0.33	6.78	0.01	100.51	0.05
	平均	46.58	2.76	7.36	2.51	9.06	0.08	23.39	2.80	0.33	0.03	0.45	0.45	4.18	0.01	99.84	2.11
	15	48.84	2.33	8.04	1.31	4.74	0.03	27.39	0.46	0.40	0.02	0.04	0.04	1.28	0.02	100.26	2.12
X	16	51.84	2.16	6.00	1.68	7.54	0.08	23.57	3.15	0.50	0.03	0.02	0.52	2.10	0.02	99.21	2.13
	17	48.68	3.18	8.64	2.30	6.08	0.06	22.06	4.47	0.68	0.05	0.03	0.44	2.52	0.03	99.23	3.11
	18	55.78	0.98	1.34	1.83	10.18	0.10	27.36	0.67	0.08	0.01	0.04	0.29	1.06	0.05	99.77	0.8
	19	54.89	1.86	2.00	1.80	9.66	0.10	26.49	0.92	0.08	0.01	0.04	0.76	0.92	0.06	99.59	1.8
	20	47.82	4.18	9.40	2.31	9.23	0.11	19.11	4.42	0.63	0.27	0.07	0.18	1.58	0.04	99.35	3.91
	21	49.36	2.84	8.91	1.94	8.76	0.09	20.20	3.36	0.94	0.11	0.11	0.45	2.31	0.03	99.41	2.32
	22	48.56	1.49	6.80	2.02	7.78	0.06	23.86	4.50	0.40	0.03	0.35	0.22	2.86	0.00	98.93	1.24
	23	52.13	1.92	5.11	1.84	8.27	0.10	23.99	3.56	0.29	0.02	0.15	0.13	2.06	0.03	99.60	1.86
	24	48.98	0.50	3.11	2.96	6.41	0.06	28.44	3.40	0.06	0.01	1.08	0.56	4.56	0.01	100.14	0.018
	25	47.95	2.31	5.50	1.47	10.32	0.04	26.26	1.07	0.14	0.01	0.09	0.24	4.95	0.01	100.36	0.52
平均	50.44	2.16	5.90	1.95	8.08	0.07	24.43	2.73	0.38	0.06	0.18	2.75	0.46	0.03	99.62	1.80	

续表 1-1
Continued Table 1-1

岩石 类型	样品 序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	S	总和	R(TiO ₂)
<i>w</i> (B)/%																	
	26	36.07	0.84	7.82	9.82	7.27	0.05	27.90	1.82	0.34	<0.01	0.43	0.19	7.12	0.09	99.77	0.12
XI	27	46.92	0.65	7.08	2.67	8.75	0.05	29.00	0.50	0.19	<0.01	0.23	0.17	4.60	0.05	100.87	
	平均	41.50	0.75	7.45	6.25	8.01	0.05	28.45	1.16	0.27	<0.01	0.33	0.18	5.86	0.07	100.34	0.14
	28	30.18	8.23	18.09	1.20	4.82	0.03	26.46	0.22	0.10	0.01	0.02	0.22	10.31	0.01	99.90	8.2
	29	49.48	2.77	7.19	2.03	6.53	0.07	24.62	1.46	0.48	0.01	0.36	0.60	3.39	0.02	99.01	2.73
XIII	30	49.50	3.53	6.63	2.33	6.16	0.08	24.55	0.94	0.37	0.05	0.03	1.02	3.57	0.01	98.77	3.08
	31	38.72	7.14	10.44	1.20	2.67	0.17	28.58	0.65	0.12	0.09	0.06	0.64	8.58	0.06	99.12	7.08
	平均	45.90	4.48	8.09	1.85	5.12	0.11	25.92	1.02	0.32	0.05	0.15	0.75	5.18	0.03	98.97	4.30
XIV	46.12	2.16	7.09	3.37	7.99	7.99	0.07	25.56	2.09	0.33	<0.03	0.28	0.36	4.35	0.04	99.84	1.68
XV	49.20	1.84	15.74	3.79	7.13	7.13	0.20	6.73	9.47	2.91	1.10	0.35	0.11	0.95			
XVI	50.14	1.12	15.48	3.01	7.62	7.62	0.12	7.59	9.58	2.39	0.93	0.24	0.07	0.11			
XVII	72.82	0.28	13.27	1.48	1.11	1.11	0.06	0.39	1.14	3.55	4.30	0.07	0.08	1.10			
XVIII	58.58	0.84	16.64	3.04	3.13	3.13	0.13	1.87	3.53	5.24	4.95	0.29	0.28	0.99			
XIX	66.09	0.54	15.73	1.38	2.73	2.73	0.08	1.74	3.83	3.75	2.73	0.18	0.08	0.85			
XX	57.03	1.05	15.02	2.90	4.63	4.63	0.14	5.06	6.13	3.50	2.45	0.26	0.15	1.12			

注: I—碾子沟组基性变质岩; II—晋宁期基性岩; III—新太古代时期幔源物质平均含量(碾子沟组基性变质岩及晋宁期基性岩的平均值); IV—喜马拉雅期基性岩; V—碾子沟组变质岩; VI—冰淋沟组片麻岩; VII—五台期变碱性岩; VIII—新太古代时期壳源物质平均含量(碾子沟组变质岩、冰淋沟组片麻岩及五台期碱性岩的平均值); IX—细晶直闪(片)岩; X—粗晶直闪(片)岩; XI—F型绿泥片岩; XII—T型绿泥片岩; XIII—滑石片岩; XIV—蚀变岩总平均; XV—世界玄武岩平均; XVI—世界辉长岩平均; XVII—世界流纹岩平均; XVIII—世界正长岩平均; XIX—世界花岗岩长岩平均; XX—世界岩浆岩平均。蚀变岩总平均,以各类蚀变岩的算术平均值为基数以分布面积为权值的加权平均值。R(TiO₂)为金红石的TiO。资料来源:世界岩石数据库据武汉地质学院岩石教研室(1980);其他据本项目组。测试单位:26和27号样品为国家地质实验测试中心;1~25、29~31号样品为化工地质中心实验室。

表 2 碾子沟矿区各类岩石的微量元素含量
Table 2 Trace element contents of various kinds of rocks from Nianzigou ore district

岩石类型	样品序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	总和	Y	Zr	B
		$\omega(B)/10^{-6}$																	
I	1	12.1	31.2	4.34	14.3	4.9	1.49	5.2	1	4.93	1.24	3.57	0.61	3.1	0.45	88.43	35.2	70.6	156
	2	3.2	9	1.28	5.96	2.4	0.84	2.88	0.6	3.3	0.83	2.4	0.41	2.6	0.3	36	23.3	69.1	71.6
	平均	7.65	20.1	2.81	10.13	3.65	1.165	4.04	0.8	4.115	1.035	2.985	0.51	2.85	0.375	62.22	29.25	69.85	113.8
II	3	8.04	24.5	3.1	10.2	3.89	1.4	4.31	1.19	5.32	1.43	4.55	0.8	5.83	0.67	75.23	45	122	160
	4	4.5	14.3	1.79	5.83	2.15	0.61	2.43	0.8	2.75	0.77	2.35	0.47	3.06	0.39	42.2	22.5	73.4	136
	平均	6.27	19.4	2.45	8.02	3.02	1.01	3.37	1	4.04	1.1	3.45	0.64	4.45	0.53	58.75	33.75	97.7	148
III	5	6.96	19.75	2.63	9.07	3.34	1.09	3.71	0.9	4.08	1.07	3.22	0.57	3.65	0.45	60.49	31.5	83.78	130.9
IV	5	42.7	98.5	12	39.3	10.7	3.05	7.71	1	5.16	1.08	2.48	0.35	2	0.22	226.25	2.93	42.9	428
V	6	6	47	2.87	10.7	5.04	1.62	10.7	2	12.4	3.1	9.95	1.63	12.9	1.58	127.49	159	65.8	640
VI	7	5.82	15.8	1.91	5.26	1.48	0.42	1.3	0.27	0.56	0.13	0.3	0.078	0.3	0.05	33.68	3.54	45.4	105
VII	8	27.6	74.4	8.96	26.1	5.82	1.23	3.25	0.47	2.13	0.52	1.39	0.27	1.44	0.22	153.8	14.8	44.8	299
VIII	13.14	45.73	4.58	14.02	4.11	1.09	5.08	5.08	0.91	5.03	1.25	3.88	0.66	4.88	0.62	104.98	59.11	52	348
IX	9	3.98	10.2	1.42	5.11	1.83	0.64	1.88	0.53	2.12	0.62	2.09	0.48	3.25	0.42	34.57	18.8	44	102
	10	4.6	13.4	2.33	9.38	3.84	0.93	4.02	0.91	3.73	0.96	2.74	0.46	3.53	0.5	51.33	28.9	55.4	87.4
	11	6.17	22.7	3.98	19.1	6.88	0.8	9.77	1.55	9.34	2.12	5.81	0.91	5.7	0.73	95.56	66	46.6	73.4
X	12	7.5	18.8	3.73	16.2	5.52	0.66	4.96	1.22	6.96	1.55	4.77	0.89	6.22	0.84	79.82	49	45.8	276
	平均	5.56	16.28	2.87	12.45	4.52	0.76	5.16	1.05	5.54	1.31	3.85	0.69	4.68	0.62	65.34	40.68	47.95	134.7
	13	4.21	11.3	1.62	6.01	2.15	0.45	2.55	0.79	3.85	1.14	4.17	0.81	6.15	0.82	46.02	35.8	55.9	82
XI	14	2.65	7.26	0.96	3.1	1	0.35	1.5	0.42	2.86	0.7	2.96	0.56	5.3	0.74	30.36	25.7	46	40.5
	15	7.6	30	5.96	28.5	10.3	1.52	15	2.58	15.2	3.56	9.8	1.45	9	1.15	141.62	117	41.2	39
	平均	4.82	16.19	2.85	12.54	4.48	0.77	6.35	1.26	7.3	1.8	5.64	0.94	6.82	0.9	72.66	59.5	47.7	53.83
XII	16	5.88	12.89	2.47	13.5	4.47	0.46	6.86	1.18	8.03	1.65	4.64	0.69	4.16	0.65	67.53	46.12	98.5	10.8
	17	2.49	5.75	0.9	4.65	1.36	0.15	2.98	0.23	1.98	0.44	1.28	0.22	1.72	0.27	24.42	12.69	132	11
	平均	4.19	9.32	1.69	9.08	2.92	0.31	4.92	0.71	5.01	1.05	2.96	0.46	2.94	0.46	46.02	29.41	115.25	10.9
XIII	18	1.6	5	0.56	1.14	0.4	0.12	0.55	0.6	0.7	0.24	0.8	0.25	1.34	0.22	13.52	6.66	47.2	330
	19	3.1	9	1.28	6.24	2.5	0.43	3.26	0.8	3.87	0.93	3.19	0.54	4.6	0.57	40.31	32.3	51.2	107
	平均	4.61	13.35	2.34	10.76	3.79	0.59	5.29	0.99	5.8	1.36	4.12	0.69	4.87	0.66	59.22	42.84	68.55	68.59

注：岩石类型代号同表 1。数据来自本项目组。测试单位：16 和 17 号样品为国家地质实验测试中心；1~15 以及 18 和 19 号样品为化工地质中心实验室。表 2 与表 1 样品序号的对应关系：1—1, 2—3, 3—5, 4—4, 5—6, 6—7, 7—8, 8—9, 9—12, 10—14, 11—13, 12—11, 13—15, 14—23, 15—24, 16—26, 17—27, 18—28, 19—29。

笔者认为其原岩为钙碱性玄武岩(武汉地质学院岩石教研室,1980)。其 Zr 含量为 $(70.6 \sim 44.9) \times 10^{-6}$, 平均值 61.53×10^{-6} , 是地壳丰度 165×10^{-6} 的 37%(刘英俊等,1984)。B 含量为 $(71.6 \sim 156) \times 10^{-6}$, 平均值 107.43×10^{-6} , 是地壳丰度 10×10^{-6} 的 10.74 倍(刘英俊等,1984)。其 REE 分布模式总体上呈近平坦型(图 4), 略向右倾斜 $(La/Yb)_N = 1.48$, 接近 1, 与球粒陨石型相接近(王中刚等,1989)。其 REE 总量为 $(36 \sim 88.43) \times 10^{-6}$ (为了便于与球粒陨石对比, 本文的所谓 REE 总量为 $\sum La$ 至 Lu 不包括 Y), 平均为 60.39×10^{-6} , 是陨石的 18.87 倍(据王中刚等,1989 所列数据计算, 球粒陨石的 REE 总量为 $(2.60 \sim 3.63) \times 10^{-6}$, 平均为 3.20×10^{-6})。其 Ti-Zr-Y 特征反映出其原岩形成于岛弧环境(图 5)。

晋宁期基性岩 其常量化学成分总体上与世界基性侵入岩(辉长岩)接近, 但 Fe_2O_3 、 FeO 及 MgO 偏

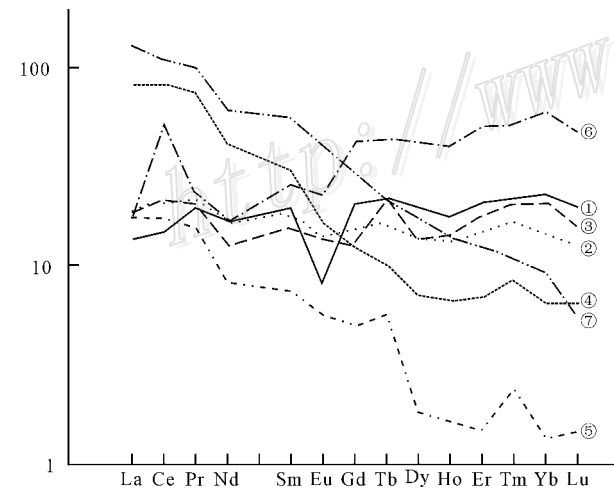


图 4 碾子沟矿区内各类岩石 REE 分布模式对比

①—蚀变岩(加权平均);②—碾子沟组基性变质岩(2 个样品平均);③—晋宁期基性岩(2 个样品平均);④—五台期变碱性岩(1 个样品);⑤—冰淋沟组片麻岩(1 个样品);⑥—碾子沟组变粒岩(1 个样品);⑦—喜马拉雅期基性岩(1 个样品)。有关数据见表 2, 陨石为 20 个球粒陨石的平均值(王中刚等,1989)

Fig. 4 REE distribution patterns of various kinds of rocks in Nianzigou ore district

①—Altered rock (weighted average); ②—Basic metamorphic rock of Nianzigou Formation (average of two samples); ③—Basic rock of Jinning period (average of two samples); ④—Meta-alkaline rock of Wutai period (one sample); ⑤—Gneiss of Binglingou Formation (one sample); ⑥—Granulite of Nianzigou Formation (one sample); ⑦—Basic rock of Himalayan period (one sample). See Tables 2 for related data; Meteorite value is the average value of 20 chondrites (Wang et al., 1989)

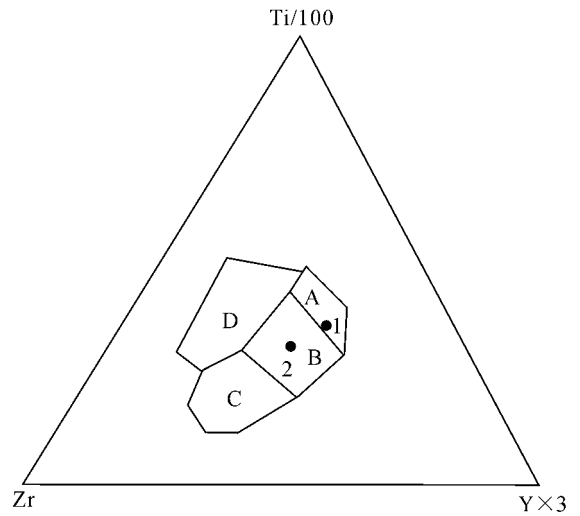


图 5 碾子沟矿区内碾子沟组基性变质岩原岩形成时的大地构造环境判别

板内玄武岩落入 D 区; 洋底/洋中脊/玄武岩落入 C 区; 岛弧低钾拉斑玄武岩落入 A 和 B 区(据王中刚等,1989)

图中点号与表 2 中样品序号相对应

Fig. 5 Discriminant map of geotectonic environment for formation of protolith of basic metamorphic rock of Nianzigou Formation in Nianzigou ore district. Intraplate basalt is plotted in D area; suboceanic (mid-oceanic ridge) basalt in C area; island arc K-low tholeiite in A and B area (after Wang et al., 1989)

高 ($Na_2O + K_2O$) 为 0.12% ~ 0.92%, 平均 0.52%, 里特曼碱度指数平均为 0.19, 属钙碱性系列的基性侵入岩(武汉地质学院岩石教研室,1980)。其 Zr 含量为 $(73.4 \sim 122) \times 10^{-6}$, 平均为 97.7×10^{-6} , 是地壳丰度的 59%。B 含量为 $(136 \sim 166) \times 10^{-6}$, 平均 148×10^{-6} , 是地壳的 14.8 倍。其 REE 总量为 $(42.2 \sim 75.23) \times 10^{-6}$, 平均 58.72×10^{-6} , 是陨石的 18.35 倍。其 REE 分布模式总体上呈近平坦型(图 4) $(La/Yb)_N = 0.91$, 总体上与球粒陨石相接近, 但 Tb 呈正异常。

喜马拉雅期基性岩 其常量化学成分总体上与世界辉长岩接近, 但 Si_2O 含量低得较多, 而 TiO_2 含量则高得较多, 全铁略高, MgO 相近。与碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩相比, Si_2O 、全铁、 MgO 、Y 和 Zr 较低, TiO_2 、B 和 REE 总量较高, LREE 高度富集型的 REE 分布模式与前两者差异也较大(图 4)。

晋宁期基性岩与碾子沟组基性变质岩的常量和微量元素及 REE 分布模式总体上接近, 显示两者物

源时空的基本一致性。REE 分布模式接近陨石型，说明两者可能代表地球物质分异过程较早的状态。两者化学成分的平均值可大致代表新太古代时期该地区上地幔的化学成分(表 1 和表 2 中的 III)。

喜马拉雅期基性岩具有 LREE 高度富集型的 REE 分布模式，其化学成分与晋宁期基性岩和碾子沟组基性变质岩的存在显著差异，同时，考虑到地壳的层圈结构及物质成分特征(武汉地质学院岩石教研室，1980)，地球物质分异作用的模式(王中刚等，1989)，笔者分析其物质来源于下地壳(详述见后)。

2.2 酸碱性变质岩类地球化学特征

碾子沟组变粒岩 在尼格里图上，该岩石位于岩浆岩区(限于篇幅，有关图件略)。其常量化学成分总体上与世界流纹岩接近： $(Na_2O + K_2O)$ 为 4.9%， $Na_2O > K_2O$ ，里特曼碱度指数为 0.82。结合其呈层状的产出特征，笔者认为其原岩应为钙碱性系列的酸性火山熔岩，具体应为流纹岩(武汉地质学院岩石教研室，1980)。其 Zr 含量为 65.8×10^{-6} ，是地壳丰度的 40%，与碾子沟组基性变质岩接近，说明两者可能有一定的亲缘关系。其 B 含量为 640×10^{-6} ，分别是现代地壳和碾子沟组基性变质岩的 64 倍和 5.96 倍。其 REE 分布模式总体上呈 HREE 轻度富集型(图 4)，与陨石和碾子沟组基性变质岩的差异较大($La/Yb)_N = 0.30$ ，Ce 呈明显正异常；REE 总量为 127.49×10^{-6} ，分别是陨石和碾子沟组基性变质岩平均含量的 39.84 倍和 2.01 倍。

冰淋沟组片麻岩 在尼格里图上，该岩石位于岩浆岩区(限于篇幅，有关图件略)。其常量化学成分总体上与世界花岗闪长岩接近： $(Na_2O + K_2O)$ 为 5.31%， $Na_2O > K_2O$ ，里特曼碱度指数为 1.21。结合其不具层状的产出特征，笔者分析其原岩应为钙碱性系列的酸性侵入岩，具体应为花岗闪长岩(武汉地质学院岩石教研室，1980)。其 Zr 含量为 45.4×10^{-6} ，分别是地壳、碾子沟组基性变质岩和变粒岩的 28%、74% 和 69%。B 含量为 105×10^{-6} ，分别是地壳、碾子沟组基性变质岩和变粒岩的 10.5 倍、98% 和 16%。其 REE 分布模式呈 LREE 高度富集型(图 4) ($La/Yb)_N = 12.55$ ，与陨石、碾子沟组基性变质岩和变粒岩的差别较大(图 4)。其 REE 总量为 33.678×10^{-6} ，分别是陨石、碾子沟组基性变质岩和变粒岩的 10.52 倍、58% 和 26%。

五台期变碱性岩 在尼格里图上，该岩石位于岩浆岩区(限于篇幅，有关图件略)。其常量化学成

分总体上与世界正长岩接近： $(Na_2O + K_2O)$ 为 8.83%，里特曼碱度指数为 5.25。结合其产状特征，笔者分析其原岩应为正长岩(武汉地质学院岩石教研室，1980)。其 Zr 含量为 44.8×10^{-6} ，与冰淋沟组片麻岩(45.4×10^{-6})最为接近，说明两者可能有一定亲缘关系。B 含量为 299×10^{-6} ，是现代地壳丰度的 29.9 倍。其 REE 分布模式呈 LREE 高度富集型(图 4) ($La/Yb)_N = 12.40$ ，与冰淋沟组片麻岩最为接近。其 REE 总量为 153.8×10^{-6} ，与碾子沟组变粒岩相接近。

这 3 种岩石的化学成分总体上与基性(变质)岩类有明显差异，其常量化学成分总体上以 Si、Al 为主。据此，并结合地球的层圈结构和物质成分特点，笔者推断，这 3 种岩石的物质应来源于新太古代时期的上地壳(武汉地质学院岩石教研室，1980)。其微量元素含量的变化特征及 REE 分布模式的复杂性说明，当时的地壳物质已经历了复杂的分异过程。这 3 种岩石的平均化学成分，可大致代表新太古代时期该地区上地幔的化学成分(表 1 和表 2 中的 VIII)。经对比可知，新太古代时期，上地幔以高 Ti、Fe、Mg、Zr，低 Si、低 REE、Y、B，REE 分布模式呈近平坦型为特征(表 1 和表 2 中的 III)；上地壳则以低 Ti、Fe、Mg、Zr，高 Si、Al、Na、K、REE、Y、B，REE 分布模式多样为特征(表 1 和表 2 中的 VIII)。

2.3 原岩岩浆成因分析

地球的 REE 含量及组成 从整体上看，与球粒陨石相当；具体而论，各层圈差异明显，地壳的 REE 含量明显高于球粒陨石，地幔的 REE 含量则明显低于球粒陨石。一般认为，各层圈的这种差异是地球形成过程中物质分异的结果(王中刚等，1989)。

关于地球物质分异作用的模式 Masuda 等(1966 转引自王中刚等，1989)提出了结晶-重力分异说，王中刚等(1989)则描述为结晶分异作用。笔者经分析、研究后，认为重力也起了作用，因此，命名为结晶-重力作用。假定地球在形成演化过程中，曾为熔融体状态，物质成分是均一的，REE 的组成与陨石一致，则其结晶作用所产生的固相下沉形成(原始)地幔，液相上浮整体固结形成原始地壳。上述作用导致：(原始)地幔的 REE 分布模式呈 LREE 亏损型(固体型)，而原始地壳的 REE 分布模式则呈 LREE 富集型(液体型)(Masuda 模型)(王中刚，1989)。

据上述分异作用的模式和碾子沟矿区岩石的地球化学特征，可得出以下几点：① 碾子沟组基性变

质岩和晋宁期基性岩的 REE 分布模式近陨石型,说明其成岩岩浆的物质成分应为分异作用发生前的状态;②冰淋沟组片麻岩和五台期变碱性岩,其 REE 分布模式均呈 LREE 高度富集型,其常量元素和 B 的含量存在明显差异,但 Zr 含量相似,说明两者的成岩岩浆可能由同一原始地壳岩浆岩选择性熔融分离所形成(武汉地质学院岩石教室,1980);③碾子沟组变粒岩的 HREE 略富集型分布模式和常量元素特征,表明其成岩岩浆可能是原始地壳岩浆岩选择性重熔分离后的残余岩浆(武汉地质学院岩石教室,1980);④喜马拉雅期基性岩的 LREE 高度富集型分布模式、常量元素特征及地壳的层圈结构和物质成分特征(地壳表层为沉积层,上部为花岗质岩石,下部为基性岩类)(武汉地质学院岩石教室,1980),表明其成岩岩浆应来源于下地壳,是上述结晶-重力分异作用的产物。

3 蚀变岩类地球化学特征

3.1 蚀变岩类总体地球化学特征

在尼格里图上,所有蚀变岩类样品均落入岩浆岩区(限于篇幅,有关图件略),显示出其原岩为岩浆岩。其 H_2O^+ 含量平均为 4.35%,最高为 10.31%(表 1),明显高于矿区内其他岩石;平均值(4.35%)分别是碾子沟组基性变质岩、晋宁期基性岩、世界玄武岩、辉长岩、岩浆岩均值的 2.60 倍、4.72 倍、4.57 倍、39.45 倍、3.88 倍。说明在其形成过程中有大量水参与,与镜下观察到的矿物成分复杂、多期次叠加、交代结构发育的蚀变特征相一致,进一步表明该类岩石的蚀变成因。

蚀变岩的常量和微量元素化学成分平均值的变异系数与矿区内其他岩石相比,最小的是晋宁期基性岩,其次为碾子沟组基性变质岩(表 3),这与下述地质事实相一致,在 I 号蚀变带,蚀变岩宏观上与这两类岩石关系密切,在微观上,蚀变岩中常见这两类岩石的矿物残晶,说明蚀变岩的原岩为该两类岩石,即蚀变岩的物质来源于这两者,且以晋宁期基性岩为主(变异系数的计算:①首先计算出单项化学成分的变异系数: $M_i = (L_i - K_i) / K_i$ ($i = 1, 2, \dots, 13$; 1 代表 SiO_2 , 2 代表 TiO_2 , ..., 13 代表 H_2O^+ ; L_i 为蚀变岩加权平均值, K_i 为其他岩石的平均值, M_i 为变异系数);②计算出 M_i 的绝对值;③各化学成分变异系数绝对值的平均值即为蚀变岩与有关岩石的变

表 3 碾子沟矿区内蚀变岩与其他岩石化学成分平均值的变异系数

Table 3 Variation coefficients of average chemical compositions between altered rock and other rocks in Nianzigou ore district

	A	B	C	D	E
常量元素	0.69	0.77	2.87	2.42	2.79
微量元素	0.27	0.34	0.48	1.18	5.19

注:A—蚀变岩与晋宁期基性岩;B—蚀变岩与碾子沟组基性变质岩;C—蚀变岩与碾子沟组变粒岩;D—蚀变岩与五台期变碱性岩;E—蚀变岩与冰淋沟组片麻岩。变异系数的计算见正文。

异系数)。

据该矿区实际情况分析,常量和微量化学成分变异系数绝对值分别大于 0.5、0.4 的化学成分是有明显变化的,正、负分别表示带入、带出。在蚀变过程中带入的常量化学成分由多到少依次为 H_2O^+ 、 MgO 、 TiO_2 ,带出的成分为 K_2O 、 CaO 及 Na_2O ,带入量大于带出量(表 4)。 H_2O^+ 的大量带入再次表明岩石的蚀变成因。 MgO 和 TiO_2 的大量带入,说明地下高温热液在上升过程中溶解了高 Mg 高 Ti 物质。微量元素明显带入的有 Gd、Dy、Yb、Lu,明显带出的有 Eu、B,其他微量元素的带入、带出量不明显(表 5),总体上看,带入量大于带出量。据该矿区地质情况分析,化学成分的带入方式为,地下高温热液在上升过程中溶解了深部的晋宁期基性岩物质,带出方式为,在矿区蚀变带外,形成了少量钾长石脉岩和石英脉岩。

蚀变岩 REE 平均值的分布模式,总体上近似平坦型(图 4),与碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩的接近,再次说明两者为蚀变岩的原岩;具体来看, Eu 明显亏损,再次说明在蚀变过程中 Eu 的带出量相对较大。

3.2 五大类蚀变岩化学成分特征对比

TiO_2 的对比

从细晶直闪(片)岩→粗晶直闪(片)岩→F 型绿泥片岩→T 型绿泥片岩→滑石(片)岩, TiO_2 平均含量呈波动式变化(表 1),最高是 T 型绿泥片岩(8.23%),次高为滑石(片)岩(4.48%),细晶直闪(片)岩(2.76%)略高于蚀变岩总平均值(2.16%),粗晶直闪(片)岩与蚀变岩总平均值相等(均为 2.16%),F 型绿泥片岩最低(0.75%)。单个样品对比, F 型绿泥片岩均极低(0.65%~0.84%),T 型绿泥片岩极高(1 件样品为 8.23%),其他岩类变化较

表 4 碾子沟矿区内蚀变岩与碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩单项常量化学成分平均值的变异系数

Table 4 Variation coefficients of individual item average values of chemical compositions of major elements between altered rock, basic metamorphic rock of Nianzigou Formation and basic rock of Jinning period in Nianzigou ore district

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	S
1	-0.07	0.51	-0.45	-0.29	-0.23	-0.70	3.08	-0.77	-0.66	-0.96	0.22	-0.51	1.60	-0.56
2	0.02	1.10	-0.45	-0.44	-0.38	-0.22	0.74	-0.57	-0.48	-0.57	-0.07	-0.05	3.83	0.33
3	-0.03	0.81	-0.45	-0.37	-0.31	-0.46	1.91	-0.67	-0.57	-0.77	+0.08	-0.28	2.72	-0.12

注：1—蚀变岩与碾子沟组基性变质岩；2—蚀变岩与晋宁期基性岩；3—变异系数的平均值。变异系数的计算见正文。

表 5 碾子沟矿区内蚀变岩与碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩单项微量元素平均含量的变异系数

Table 5 Variation coefficients of individual item average values of chemical compositions of trace elements between altered rock, basic metamorphic rock of Nianzigou Formation and basic rock of Jinning period in Nianzigou ore district

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Zr	B
1	-0.40	-0.33	-0.17	0.06	0.04	-0.49	0.31	0.25	0.41	0.32	0.39	0.36	0.71	0.77	0.47	-0.02	-0.40
2	-0.26	-0.31	-0.05	0.34	0.26	-0.42	0.57	0.00	0.44	0.24	0.20	0.08	0.10	0.25	0.27	-0.30	-0.54
3	-0.33	-0.32	-0.11	0.20	0.15	-0.46	0.44	0.13	0.43	0.28	0.30	0.22	0.41	0.51	0.37	-0.16	-0.47

注同表 4。

大, 细晶直闪(片)岩为 0.84%~6.52%, 粗晶直闪(片)岩为 0.50%~4.18%, 滑石(片)岩为 2.77%~7.14%, 单个样品最高的为 T 型绿泥片岩(8.23%) 和滑石(片)岩(7.14%)。

据此, 并结合蚀变岩中金红石的赋存状态, 可知在蚀变过程中钛发生了迁移、富集: ①从蚀变过程看, 在绿泥石化后期-滑石化早、中期的蚀变热液中, Ti 逐步富集并开始大量析出; ②从岩石类型看, Ti 从 F 型绿泥片岩向其他蚀变岩中迁移、富集; ③从空间位置看, Ti 从蚀变带的边部向中部迁移、富集; ④从均匀性看, Ti 的迁出是整体性的, 而富集是不均匀的; ⑤从不同矿石类型的量看, Ti 富集作用主要是蚀变叠加作用; ⑥从矿石品位看, Ti 富集作用主要是蚀变成岩作用。

FeO 和 Fe₂O₃ 的对比

从细晶直闪(片)岩→粗晶直闪(片)岩→F 型绿泥片岩→T 型绿泥片岩→滑石(片)岩, FeO 平均含量呈明显下降趋势(表 1)。FeO 主要存在于直闪石、绿泥石及磁铁矿中, 少量形成钛铁矿。直闪石主要形成于细、粗晶直闪石化阶段, 磁铁矿主要形成于 F 型绿泥石化阶段, 钛铁矿主要形成于 F 型绿泥石化-滑石化早、中期。上述特征说明, 蚀变作用一开始, FeO 便大量析出, 到 T 型绿泥石化和滑石化阶段, 蚀变热液中的 FeO 含量已不高。因此, 整个蚀变过程实质上是钛与二价铁分离的过程。

从细晶直闪(片)岩→粗晶直闪(片)岩→F 型绿泥片岩→T 型绿泥片岩→滑石(片)岩, Fe₂O₃ 平均含

量总体上呈凸形分布。F 型绿泥片岩的 Fe₂O₃ 含量最高(6.25%), T 型绿泥片岩(1.2%) 和滑石(片)岩(1.85%) 最低, 细、粗晶直闪(片)岩的 Fe₂O₃ 含量分别为 2.51% 和 1.95%。表明在蚀变过程中, 钛与三价铁也发生了分离。

REE 及其他微量元素含量特征对比

就平均含量而言, 从细晶直闪(片)岩→粗晶直闪(片)岩→F 型绿泥片岩→T 型绿泥片岩→滑石(片)岩: ①REE 总量和 Y 均呈下降趋势, 但最高的为粗晶直闪(片)岩, 最低的为 T 型绿泥片岩; ②Zr 呈凸形分布; F 型绿泥片岩中 Zr 含量异常的高, 为 115.25×10^{-6} , 其他岩石中较低, 为 $(47.2 \sim 51.2) \times 10^{-6}$; ③B 呈波动式变化, 最高的为 T 型绿泥片岩 (330×10^{-6}) , 最低的为 F 型绿泥片岩 (10.9×10^{-6}) , 其他岩石为 $(53.83 \sim 134.7) \times 10^{-6}$ (表 2)。这表明, REE 和 Y 在蚀变作用早期析出量较大(可能是直闪石比绿泥石和滑石更容易吸纳 REE 和 Y), Zr 与 Fe³⁺ 及 B 与 Ti 的富集可能是同步的。

REE 分布模式的对比

细晶直闪(片)岩的 REE 分布模式可分为 2 类: (1)总体上呈近平坦型, 波动不大(图 6 中的①和②号曲线); (2)总体上呈近平坦型, 但 Eu 明显亏损(图 6 中的③和④号曲线)。粗晶直闪(片)岩的 REE 分布模式也可分为 2 类: (1)总体上呈近平坦型, Eu 呈明显亏损(图 7A 中的③号曲线), 与细晶直闪(片)岩的第 1 类分布模式相近; (2)总体上呈 LREE 亏损型, 但 Nd、Sm、Eu 及 Gd 亏损幅度相对略大(图 7A

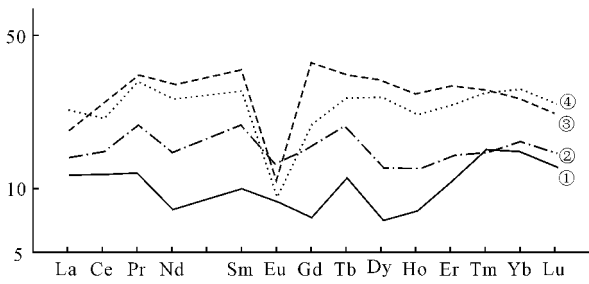


图6 碾子沟矿区细晶直闪(片)岩的REE分布模式
注 均为单个样品。曲线编号与表2中样品序号的对应关系：
①—9 ;②—10 ;③—11 ;④—12

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of fine-grained anthophyllite schist from Nianzigou ore district
Note : All the samples are single samples. The corresponding relationships between the serial number of curves and that of the samples in Table 2 are ①—9 ,②—10 ,③—11 ,④—12

中的①和②号曲线)。F型绿泥片岩的REE分布模式,总体上呈近平坦型,Eu明显亏损(图7A中的④和⑤号曲线)。T型绿泥片岩的REE分布模式较特殊,总体上呈U型,但略向左倾,Tb呈明显正异常

(图7B中的④号曲线)。滑石(片)岩的REE分布模式,总体上呈LREE轻度亏损型,Eu明显亏损(图7B中的⑤号曲线)。

依据REE含量及赋存状况,含REE的矿物可分为3类:①REE独立矿物,以REE为主或为基本含量,在矿物分子式中有一定的位置;②REE为微量成分的矿物,其含量常为0.01%~1%;③REE含量很低的矿物,多为一般的造岩矿物(王中刚等,1989)。岩石中主要造岩矿物的REE含量均不高(多在0.2%以下),但由于其在岩石中占有较大比例,因而,其REE组成对岩石有重要影响(王中刚等,1989)。故笔者认为,决定上述REE分布模式的主要因素可能是主要造岩矿物的不同的组合(限于篇幅,具体蚀变岩样品的矿物组合略)。

这5类蚀变岩的REE平均值分布模式(图7B)可分为2类:①总体上呈U型略向左倾斜,Tb呈明显正异常,属该类型的仅为T型绿泥片岩;②总体上呈近平坦型或向左略倾斜,Eu呈明显负异常,其他蚀变岩均属此类。

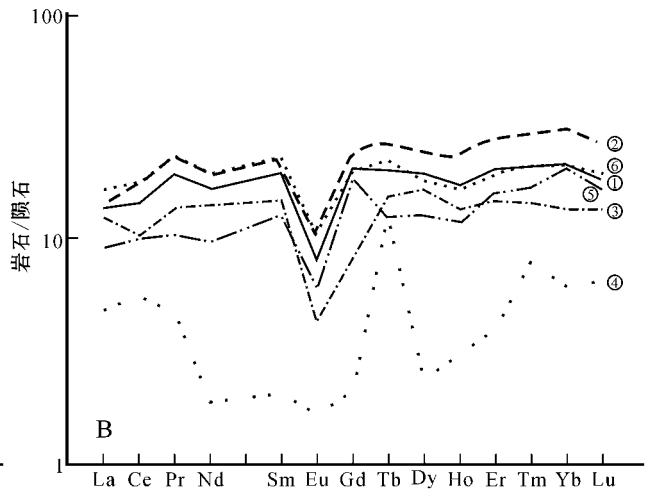
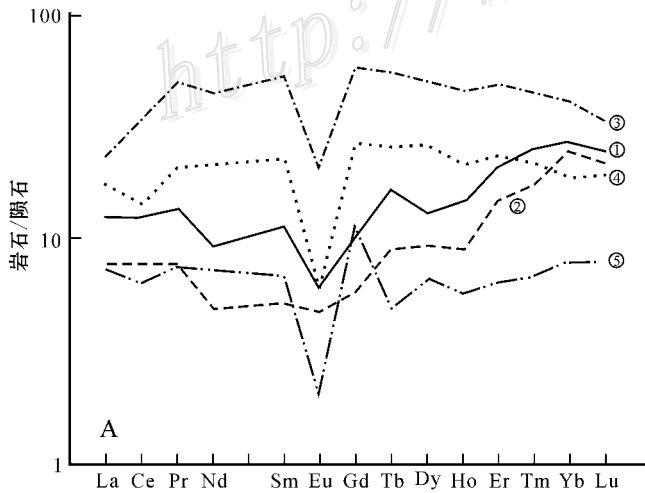


图7 碾子沟矿区蚀变岩的REE分布模式对比

A. 图中曲线编号与表2中样品序号的对应关系:①—13(粗晶直闪(片)岩);②—14(粗晶直闪(片)岩);③—15(粗晶直闪(片)岩);④—17(F型绿泥片岩);⑤—16(F型绿泥片岩)。B. ①—细晶直闪(片)岩(4个样品平均);②—粗晶直闪(片)岩(3个样品平均);③—F型绿泥片岩(2个样品平均);④—T型绿泥片岩(1个样品,表2中的18号样品);⑤—滑石(片)岩(1个样品,表2中的19号样品);⑥—蚀变岩(加权平均)

Fig. 7 REE distribution patterns of altered rocks in Nianzigou ore district

A. The corresponding relationships between the serial number of curves and that of the samples in Table 2 : ①—13(Macrocrystalline anthophyllite schist);②—14(Macrocrystalline anthophyllite schist);③—15(Macrocrystalline anthophyllite schist);④—17(F type chlorite schist);⑤—16(F type chlorite schist) . B. ①—Fine-grained anthophyllite schis(average of four samples);②—Macrocrystalline anthophyllite schis(average of three samples);③—F type chlorite schis(average of two samples);④—T type chlorite schist(one sample , i. e. , No. 18 sample in Table 2);⑤—Talc schis(one sample , i. e. , No. 19 sample in Table 2);⑥—Altered rock(weighted average)

对比典型样品可知,金红石的富集与 REE 分布模式无明显关系。图 7B 中的④号曲线为 T 型绿泥(片)岩,其 $R(\text{TiO}_2)$ (金红石的 TiO_2 含量)为 8.2%;图 6 中的④号曲线为细晶直闪片岩,其 $R(\text{TiO}_2)$ 为 5.38%;图 7A 中的⑤号曲线为 F 型绿泥片岩,其 $R(\text{TiO}_2)$ 为 0.12%;图 7A 中的③号曲线为粗晶直闪(片)岩,其 $R(\text{TiO}_2)$ 为 0.018%。

其他化学成分的对比

MgO 平均含量 从细晶直闪(片)岩(23.39%)→粗晶直闪(片)岩(24.43%)→F 型绿泥片岩(28.45%)→T 型绿泥片岩(26.46%)→滑石(片)岩(25.92%),呈典型的凸形分布,F 型绿泥片岩的最高,向两端渐低。表明在蚀变过程中,Mg 在 F 型绿泥石化阶段富集并大量析出。

SiO₂ 平均含量 从细晶直闪(片)岩(46.58%)→粗晶直闪(片)岩(50.44%)→F 型绿泥片岩(41.50%)→T 型绿泥片岩(30.18%)→滑石(片)岩(45.90%),呈波动型,但波动幅度不大,最低的为 T 型绿泥片岩。主要由矿物组合的不同及各矿物 SiO₂ 含量的差异所致,如,T 型绿泥片岩以低硅的绿泥石和铁质矿物为主,导致该类岩石的 SiO₂ 含量最低。

Al₂O₃ 平均含量 从细晶直闪(片)岩(7.36%)→粗晶直闪(片)岩(5.90%)→F 型绿泥片岩(7.45%)→T 型绿泥片岩(18.09%)→滑石(片)岩(8.09%),除 T 型绿泥片岩的特高外,其他岩石的变化不大。主要原因仍是矿物组合的不同及各矿物 Al₂O₃ 含量的差异,如,T 型绿泥片岩以高铝的绿泥石为主,导致该类岩石的 Al₂O₃ 含量最高。

综上所述,这 5 类蚀变岩的化学成分变化较大,REE 分布模式复杂多样,表明在蚀变过程中化学成分发生了迁移和分异富集。

3.3 蚀变岩化学成分的相关性

SiO₂ 与 FeO,B 与 Al₂O₃ 和 TiO₂,Al₂O₃ 与 H₂O⁺ 均呈明显正相关;Fe₂O₃ 与 FeO 略呈正相关;不考虑个别奇异点,SiO₂ 与 MnO 呈明显正相关。SiO₂ 与 Al₂O₃ 和 H₂O⁺,TiO₂ 与 FeO,Al₂O₃ 与 FeO,均呈明显负相关;不考虑少数 TiO₂ 和 Fe₂O₃ 的极低点,SiO₂ 与 TiO₂ 和 Fe₂O₃ 呈明显负相关(图 8)。这表明,在蚀变过程中:Si⁴⁺ 与 Fe²⁺ 和 Mn²⁺,B 与 Al³⁺ 和 Ti⁴⁺,Fe³⁺ 与 Fe²⁺,可能形成离子团共同迁移,含结晶水的矿物主要为高铝矿物,Ti⁴⁺ 或 Al³⁺ 的存在不利于 Fe²⁺ 的迁移;Si⁴⁺ 的存在不利于 Ti⁴⁺、

Al³⁺、Fe³⁺ 的迁移,Si 的存在不利于含结晶水矿物的形成。TiO₂ 与 Fe₂O₃ 的相关性不明显,Fe₂O₃ 含量高的样品,其 TiO₂ 含量却很低,反之,TiO₂ 含量高或较高的样品,其 Fe₂O₃ 含量却很低,说明在蚀变过程中 Ti⁴⁺ 与 Fe³⁺ 发生了分离。尤应指出的是,TiO₂ 与 FeO 的负相关性说明,在蚀变过程中 Ti⁴⁺ 与 Fe²⁺ 也发生了分离。

3.4 蚀变岩成因分析

(1) 蚀变岩的原岩为碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩。

(2) 在蚀变过程中,大量的水参与。据矿区地质条件及成矿温度(待刊)等分析,水为来自深部的高温热液,其上升通道为 F₁、F₂、F₃ 断裂破碎带。

(3) 蚀变过程依次经历了细晶直闪石化→粗晶直闪石化→F 型绿泥石化→T 型绿泥石化→滑石化→斜长石化等阶段,前 5 个阶段分别在不同部位形成了相应的蚀变岩,斜长石化仅在滑石(片)岩等岩石中形成了细脉。T 型绿泥石化和滑石化,虽然形成的岩石量较少,却普遍叠加在细晶直闪(片)岩和粗晶直闪(片)岩上。

(4) 在蚀变过程中,化学成分发生了充分的迁移,迁移的动力是矿物对化学成分的选择性吸纳,迁移的条件是,蚀变介质水的大量存在有利于元素的迁移;迁移的原因是,主要矿物由于其形成时的温度、压力等物理化学条件不同,导致其形成的时空不同。

4 岩石化学成分与成矿的关系

4.1 蚀变岩原岩化学成分与成矿的关系

从围岩特征看,I 号蚀变带两侧的围岩为碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩,带内常见碾子沟组基性变质岩残留体。从微观组构特征看,蚀变岩中常见碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩的矿物残晶。从化学成分看,蚀变岩与这 2 种岩石最接近。因此,蚀变岩的原岩为这 2 种岩石。I 号蚀变带是主要含矿带。

II 号蚀变带西北端的两侧围岩主要为碾子沟组基性变质岩,类比推断,蚀变岩的原岩主要为碾子沟组基性变质岩。同时,该处又是矿体产出部位(图 2)。

因而,当蚀变岩的原岩为碾子沟组基性变质岩

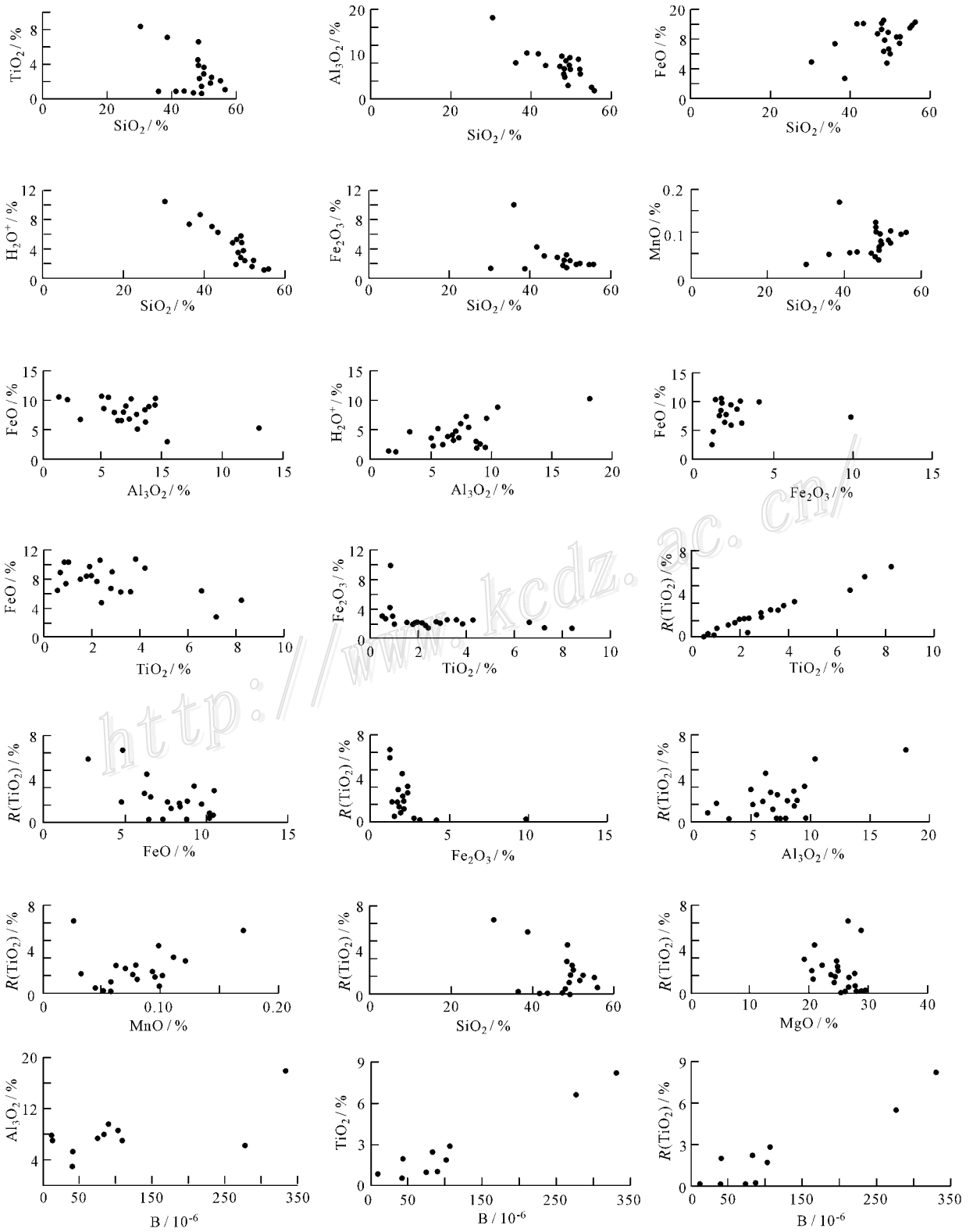


图 8 碾子沟矿区蚀变岩化学成分相关关系图

作图数据源自本文的表 1 和表 2

Fig. 8 Correlative map of chemical composition of altered rocks from the Nianzigou ore district

(data from Table 1 and 2)

或晋宁期基性岩时,便可成矿,主要原因是这 2 种岩石的 Ti 含量较高(表 1)。

4.2 蚀变岩钛的富集与化学成分的关系

蚀变岩的 TiO_2 与 SiO_2 和 FeO 呈负相关,与 B 呈正相关,与 Fe_2O_3 呈负相关(图 8),说明高 B、低 SiO_2 、低 Fe 有利于 Ti 的富集。

4.3 蚀变岩化学成分与金红石形成的关系

$R(TiO_2)$ (金红石的 TiO_2) 与 TiO_2 (全岩的 TiO_2)、B、 Al_2O_3 呈明显正相关,与 FeO 呈明显负相关,与 Fe_2O_3 略呈负相关。如不考虑少数奇异点和低 $R(TiO_2)$ 点, $R(TiO_2)$ 与 MnO 呈明显正相关,与 SiO_2 和 MgO 呈明显负相关。这说明:① Ti 是形成金红石的物质基础;② 高 B、Al、Mn,低 Si、Mg、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} ,有利于金红石的形成。

据实际情况分析,对成矿影响最大的是蚀变热液中 TiO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 的含量和共存情况。Ti 是成矿的物质基础, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的存在不利于金红石的形成, Ti^{4+} 易与 Fe^{2+} 结合形成钛铁矿($FeTiO_3$),或易呈代换 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的方式进入磁铁矿($Fe^{2+}Fe^{3+}O_4$)等铁质矿物中。因此,成矿的基本条件是, Ti^{4+} 在蚀变热液中富集,同时, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 不能大量存在,即 Ti 与 Fe 的分离。

5 矿床成因成矿规律及找矿问题

5.1 矿床成因

根据笔者对碾子沟矿床形成条件的研究(徐少康 2000,2002,2004)以及上述地球化学特征,可将该矿床的形成过程简述如下。

新太古代时期,该地区为板块缝合带,随着板块运动,形成了深断裂,上地幔富钛基性岩浆和地壳酸性岩浆沿断裂呈阶段性上升、溢出地表,形成了一套玄武岩与流纹岩互层的火山岩地层(碾子沟组的原岩)。由于矿区内的碾子沟组变质较深,岩石中已看不到残留的原岩矿物,但是,根据笔者近期的研究(待刊),即使钛含量较高的玄武岩中,一般也不含原生金红石,例如,四川会东地区的二叠纪玄武岩,其 TiO_2 含量可达 3% 以上,却不含金红石(笔者 2005 年实地调查)。因此,笔者推断该区内碾子沟组原岩中的玄武岩也不含金红石。

吕梁运动时期,碾子沟组等被推入深部,环境温度和压力的升高使其发生变质,使不含金红石的玄

武岩变质为含金红石的角闪岩和榴闪岩[镜下可看到与角闪岩共生的金红石,经化学分析,其 $R(TiO_2)$ 为 0.24%~0.40%(第 1 次成矿作用),流纹岩变质为变粒岩。

晋宁运动早期,地幔基性岩浆沿断裂侵入,形成高钛基性岩(晋宁期基性岩);晋宁运动后期,碾子沟组和晋宁期基性岩又被快速带至地壳浅部,在此过程中,环境温度和压力的降低,使两者发生轻度退变质,碾子沟组榴闪岩中的石榴子石退变为石英等,晋宁期基性岩中的钛铁矿有一部分变质为金红石等[镜下可见岩浆成因的钛铁矿,未见岩浆成因的金红石,可见钛铁矿变质为金红石现象,经化学分析,其 $R(TiO_2)$ 为 0.24%~1.06%【第 2 次成矿作用】。

中生代时期,由于太平洋板块的运动,导致华北地台活化,使该地区的深断裂重新活动,同时形成一些新的断裂,地下的高温热液沿这些断裂破碎带上升,在上升过程中溶解了深部的晋宁期基性岩的物质,成为富钛热液,至适当部位停留下来,使围岩发生蚀变,形成 3 条蚀变岩带。I 号蚀变带,规模大,两侧围岩为高钛的碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩,蚀变过程中其化学成分发生了充分的分异,其中的钛进一步向中部富集,铁向边部迁移,钛与铁的分离使钛形成金红石的比例也大幅度提高(在细、粗晶直闪(片)岩、滑石(片)岩和 T 型绿泥片岩中,均可见到大量蚀变成因的金红石,经化学分析,其 $R(TiO_2)$ 最高可达 8.2%,显著高于碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩【第 3 次成矿作用】)。

新生代时期,印度板块向北俯冲,该地区地壳再次活动,下地壳基性岩浆侵入,形成喜马拉雅期基性岩,局部对该矿区内的矿体造成破坏。

5.2 成矿特点

钛的三次富集

钛的第 1 次富集,在地球物质分异之前已完成,证据为,碾子沟组基性变质岩和晋宁期基性岩的成岩岩浆物质成分为地球物质分异作用发生前的状态。钛的第 2 次富集,地下高温热液从深部上升时携带有钛(溶解了深部晋宁期基性岩的物质),证据为,蚀变岩 TiO_2 的加权平均值(2.16%)明显高于碾子沟组基性变质岩(1.43%)和晋宁期基性岩(1.19%)。钛的第 3 次富集,蚀变过程中钛进一步向蚀变带的中部富集,证据为, TiO_2 含量在分布于蚀变带中部的 T 型绿泥片岩中为 8.23%、滑石(片)岩中为 4.48%、细晶直闪(片)岩中为 2.76%、粗晶直

闪(片)岩中为2.16%,均明显高于分布在蚀变带边部的F型绿泥片岩的0.75%。第1次富集是基础,第2次富集是补充,第3次富集是关键。需特别说明的是,碾子沟组和晋宁期基性岩在变质过程中,基本上未发生钛的迁移、富集,理由为:①矿区内碾子沟组的变质程度较深,没有发现未变质或浅变质的部位,无法与原岩直接对比,而且,该组的变质是在没有水参与的情况下发生的“干变”,离子迁移困难,因此,钛不可能发生明显的迁移、富集;②晋宁期基性岩的变质程度较低,可见变质矿物金红石与原生矿物钛铁矿连生,说明钛基本上是在原处完成矿物的转型。

三次成矿作用

第1次为变质成矿作用,发生于新太古代,使碾子沟组基性变质岩中形成了金红石(变质前不含金红石,变质后,其 $R(\text{TiO}_2)$ 为0.24%~0.40%);第2次也为变质成矿作用,发生于晋宁运动后期,使晋宁期基性岩中形成了金红石(变质前不含金红石,变质后,其 $R(\text{TiO}_2)$ 为0.24%~1.06%);第3次为蚀变成矿作用,发生于中生代,在直闪(片)岩、滑石(片)岩和T型绿泥片岩中形成大量金红石,其 $R(\text{TiO}_2)$ 最高可达8.2%。第3次成矿作用是主成矿作用。

蚀变成矿作用的3个关键因素

①大量高温热液的参与,使各种离子具备了高度活化和易于迁移的条件。②钛的进一步富集,是形成富矿的物质条件。③钛与铁的分离,消除了影响金红石形成的重要不利因素。研究表明,在中国变质型金红石矿床的形成过程中,铁常表现出两面性,在成矿过程早期,钛富集的同时铁也同步富集,在成矿过程后期,铁的存在不利于金红石的形成(钛与铁常结合形成钛铁矿),这就是高钛基性岩浆岩一般不能形成金红石矿床的重要原因,同时,也是中国的主要金红石矿床均为变质成因的重要原因。

金红石的粗粒性

在蚀变作用过程中,随着温度的降低,岩石中形成的大量空隙为金红石提供了充分的结晶空间,因此“粗粒性”是该类型矿床的特点。

5.3 成矿规律及找矿问题

成矿规律 根据矿床成因,总结的成矿规律主要为:古板块的缝合部位有利于成矿,蚀变带与碾子沟组基性变质岩或晋宁期基性岩叠加处成矿;大的蚀变带的蚀变岩常具分带性,其边部一般为不含矿的高铁绿泥片岩,其中部一般为含矿的直闪(片)岩、

滑石(片)岩及高钛绿泥片岩,富矿处,微量元素B的含量明显升高。

找矿方向 古板块的缝合部位。

找矿标志 适当范围内,基性(变质)岩与蚀变岩共同出露处。

找矿方法 据地表基性(变质)岩及蚀变带的产状,预测深部的叠加成矿部位,再根据蚀变岩的分带性和B的含量预测矿体的位置。同时,尽可能避开喜马拉雅期基性岩。

References

- Chinese Geological Information Academy. 1996. Overseas mineral resources[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Clerici C, Mancini A, Mancini R, et al. 1981. Recovery of rutile from an eclogite rock[A]. In: Laskovski J. Mineral processing: Developments in Mineral Processing[C]. New York: Elsevier. 1803-1827.
- Force E. 1991. Geology of titanium-mineral deposits[J]. Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 259: 1-112.
- Huang J P, Ma D S, Liu C and Wang H. 2002. Rutile deposit in eclogite of ultra-high pressure metamorphic belt in the northeast of Jiangsu Province and ore genesis[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 38(4): 514-524 (in Chinese with English abstract).
- Huang J P, Ma D S, Liu C and Wang C L. 2003. Character and origin of rutile deposit in eclogite in Xiaojiao, Xinyi, Jiangsu Province[J]. Geoscience, 17(4): 435-443 (in Chinese with English abstract).
- Li B Y, Qian Z Q, Zhou J M, Xu S K and Yang L P. 1998. Tectonic conditions necessary for rutile mineralization in the eastern segment of Qinling Mountains[J]. Geology of Chemical Minerals, 22(3): 139-148 (in Chinese).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. Geochemistry for elements[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Mancini A, Mancini R and Martinotti G. 1979. Valorization of new titanium resource: Titaniferous eclogites[J]. Mineral Economics, 4: 1-19.
- Mclimans R K, Rogers W T, Korneliussen, et al. 1999. Norwegian eclogite: An ore of titanium[A]. In: Stanley C J, et al. eds. Mineral deposits: Processes to processing[C]. Balkema: Rotterdam. 1125-1127.
- Page C V and Judith A C. 1990. Fine-grained rutile in the gulf of Maine: Diagenetic origin, source rock, and sedimentary environment of deposition[J]. Econ. Geol., 85: 862-876.
- Rock Teaching and Research Department of Wuhan Geological College. 1980. Magmatic rocks course (Book 1 and 2) [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Smirnov V I, Ginzburg A I, Grigoriev V M and Yakovlev G F. 1983. Studies of mineral deposits [M]. Moscow: Mir Publishers.
- Stanley J L (Editor-in-Chief). 1983. Industrial minerals and rocks (Fifth Edition, Vol. 2) [M]. New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and

- Petroleum Engineers, Inc. New York. 1313-1336.
- Wang Z G, Yu X Y and Zhao Z H. 1989. Rare earth elements geochemistry[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Xu S K. 2001a. Genetic types of mineralizing provinces of rutile deposit in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(1): 11-18 (in Chinese).
- Xu S K. 2001b. Size analysis for natural rutile grains in main rutile deposits of China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(2): 101-103 (in Chinese).
- Xu S K, Liu L S, Yun L T and Deng X L. 2002. Metamorphic process of Nianzigou rutile deposit and its relation to rutile mine[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 24(1): 48-58 (in Chinese).
- Xu S K, Liu L S, Yun L T, Deng X L and Zhou X X. 2000. Primary Geological characteristics of Nianzigou rutile deposit[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 22(3): 139-148 (in Chinese).
- Xu S K, Liu L S, Yun L T, Deng X L and Zhou X X. 2004. The basic characteristics of alteration and its relationship with ore-forming in Nianzigou rutile deposit[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 26(2): 83-91 (in Chinese).
- Zhao Y M, Li D X, Chen W M, Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: discovery of new genetic type of titanium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 25(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).
- 黄建平, 马东升, 刘 聪, 王 辉. 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 38(4): 514-524.
- 黄建平, 马东升, 刘 聪, 王传礼. 2003. 江苏省新沂市小焦榴辉岩型金红石矿床的特征及成因初探[J]. *现代地质*, 17(4): 435-443.
- 李博响, 钱自强, 周建敏, 徐少康, 杨流平. 1998. 秦岭东段金红石矿床成矿构造环境分析[J]. *化工矿产地质*, 20(1): 17-24.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 武汉地质学院岩石教研室. 1980. 岩浆岩岩石学(上、下册)[M]. 北京: 地质出版社.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 徐少康. 2001a. 我国主要金红石矿床金红石自然颗粒产状及粒度特征[J]. *化工矿产地质*, 23(2): 101-103.
- 徐少康. 2001b. 我国金红石矿床成因类型及成矿区带[J]. *化工矿产地质*, 23(1): 11-18.
- 徐少康, 刘力生, 云连涛, 邓小林. 2002. 碾子沟金红石矿床变质作用特征及其与成矿的关系[J]. *化工矿产地质*, 24(1): 48-58.
- 徐少康, 刘力生, 云连涛, 邓小林, 周希贤. 2000. 碾子沟金红石矿床基本地质特征[J]. *化工矿产地质*, 22(3): 139-148.
- 徐少康, 刘力生, 云连涛, 邓小林, 周希贤. 2004. 碾子沟金红石矿床蚀变作用的基本特征及其与成矿的关系[J]. *化工矿产地质*, 26(2): 83-91.
- 赵一鸣, 李大新, 陈文明, 丰成友, 孙文泓. 2006. 内蒙古羊蹄子山沉积变质型钛矿床: 一个新的钛矿床类型的发现[J]. *矿床地质*, 25(2): 113-122.
- 中国地质矿产信息院. 1996. 国外矿产资源[M]. 北京: 地震出版社.

附中文参考文献

黄建平, 马东升, 刘 聪, 王 辉. 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 38(4):