文章编号 10258-7106(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、酸碱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(TiO₂)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(Ar₃n)和 冰淋沟组(Ar₃b)(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(Ar₃n¹)厚约85~260m,主 要为基性变质岩(角闪片岩和榴闪岩);二段 (Ar₃n²)厚约30~168m,为基性变质岩(角闪片岩 和榴闪岩)与变粒岩互层;三段(Ar₃n³),厚约190~ 450m,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 40~500m。

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F₁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— [号蚀变带;9—][号蚀变带;10—]][号蚀变带;11—断裂;12—地层及蚀变带产状;13—片麻 理产状



1—Gneiss of Neoarchean Binglingou Formation ; 2—3rd Member of Neoarchean Nianzigou Formation : granulite intercalated with plagioclase-amphibole schist ; 3—2nd Member of Neoarchean Nianzigou Formation : basic metamorphic rock interbedded with granulite ; 4—1st Member of Neoarchean 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 5—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 ; 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20022004)。

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 1号蚀变 带,另1个产于 1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 粒经一般为 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)酸碱 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 岩类和酸碱性变质岩类 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; (Na₂O + K₂O)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-Granulitite of Nianzigou Formation ;

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

				Τ	able 1 Må	ajor chemi	cal compos	ition of va	rious kinds	of rocks	rom Nian	rigou ore d	listrict				
岩石	样品								w(B)	% /0							
类型	序号	SiO_2	TiO_2	Ai ₂ O ₃	$\mathrm{Fe_2O_3}$	FeO	MnO	OgM	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	CO ₂	$\mathrm{H_2O^+}$	s	总和	R(TiO ₂)
	-	50.00	1.60	12.55	4.58	11.32	0.26	5.50	F 9.40	0.80	0.66	0.27	0.92	1.53	0.23	99.62	0.24
F	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
-	б	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
	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
П	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
⊟		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	
Ν	9	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
Λ	7	72.15	0.68	10.72	3.59	3.82	0.10	1.13	2.06	4.60	0.30	0.12	0.22	0.51	0.01	100.01	0.005
IV	8	66.29	0.28	16.23	1.56	1.97	0.06	1.66	5.30	4.33	0.98	0.12	0.24	0.66	0.01	99.69	0.034
IA	6	57.85	0.45	19.86	2.00	2.66	0.09	1.90	5.16	6.38	2.45	0.25	0.31	0.45	0.01	99.82	0.05
M		65.43	0.47	15.60	2.38	2.82	0.08	1.56	4.17	5.10	1.24	0.16	0.26	0.54	0.01	99.82	
	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
AI	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
ΥT	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	4.18	0.30	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	1.28	5.36	0.02	100.26	2.12
	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
Λ	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
V	21	49.36	2.84	8.91	1.94	8.76	0.09	20.20	3.36	0.94	CII.0	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

表1 碾子沟矿区各类岩石的常量化学成分

第27卷 第4期

							j [[].	1.4-1						Co	续 ntinued Ta	表 1-1 ble 1-1
ᄪᇤ								w(B)	% /(
ΠļΓ	SiO_2	TiO ₂	Ai ₂ O ₃	$\mathrm{Fe_2O_3}$	FeO	OnM	MgO	e CaO	Na_2O	$\rm K_2O$	P_2O_5	CO ₂	$\mathrm{H_2O^+}$	s	总和	R(TiO ₂)
9	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
5	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	
¥4	9 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
∞	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	96.66	8.2
0	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
2	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
	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
÷	5.90 d	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
	46.12	2.16	7.09	3.37	7.99	0.07	25.56	2.09	0.33	< 0.03	0.28	0.36	4.35	0.04	99.84	1.68
	49.20	1.84	15.74	3.79	7.13	0.20	6.73	9.47	2.91	1.10	0.35	0.11	0.95			
	50.14	1.12	15.48	3.01	7.62	0.12	7.59	9.58	2.39	0.93	0.24	0.07	0.11			
	72.82	0.28	13.27	1.48	1.11	0.06	0.39	1.14	3.55	4.30	0.07	0.08	1.10			
	58.58	0.84	16.64	3.04	3.13	0.13	1.87	3.53	5.24	4.95	0.29	0.28	0.99			
	66.09	0.54	15.73	1.38	2.73	0.08	1.74	3.83	3.75	2.73	0.18	0.08	0.85			
	57.03	1.05	15.02	2.90	4.63	0.14	5.06	6.13	3.50	2.45	0.26	0.15	1.12			
THE	子沟组基性变	€质岩:Ⅱ一	晋宁期基性	岩: 田一新	大古代时期吨	曼源物质平:	均含量(碾子	⁵ 沟组基性3	医质岩及 晋·	宁期基性岩	的平均值);	±四喜一N:	立雅期基性者	号:V─碾子	~沟组变粒;	∃; VI—W
Æ	除岩: Ⅶ一五台	計期变碱性岩	计二十字	古代时期壳	源物质平均	含量(碾子)	沟组变粒岩。	、冰淋沟组上	十麻岩及五:	台期碱性岩	的平均值);	: IX—细晶崖	寬冈(片)岩;	X—粗晶直	〔 闪(片)岩;	XIF 型
	M 一丁型绿泥	3片岩; X Ⅲ-	滑石片岩:	; X IV—蚀刭	 这岩总平均:	X V一世界	!玄武岩平线	J: X W—₩.	界辉长岩平	·均, X III—	世界流纹岩	平均; X Ш	一世界正长	岩平均; X]	IX-世界花	岗闪长岩
<u> </u>	一世界岩浆岩	计平均。 蚀变	经出总平均:	以各类蚀变	医岩的算术子	^z 均值为基 3	收以分布面?	积为权的加强	权平均值。	R(TiO2)为	金红石的「	TiO。资料3	疼源:世界岩	石数据据词	武汉地质学	院岩石教
C);其他据本项	页目组。 测记	【单位:26 利	印 27 号样品	为国家地质	实验测试中	1.25×1، شارا ا	29~31 号梓	作品为化工机	也质中心实现	臉室。					
										ľ						

2008 年

匈矿区各类岩石的微量元素含量
子沟矿
2 碾
表

district
ore
anzigou
Ż
from
rocks
5
kinds e
various
<u>0</u>
contents (
element
Trace
Table 2

岩石	样品								Ŋĺ	w(B)/	10^{-6}								
类型	序号	La	Ce	\mathbf{Pr}	PN	Sm	Eu	Gd	dT.	Dy	Но	Er	Tm	$\mathbf{Y}\mathbf{b}$	Lu	总和	Υ	Zr	В
	1	12.1	31.2	4.34	14.3	4.9	1.49	5.2	<u>,</u>	4.93	1.24	3.57	0.61	3.1	0.45	88.43	35.2	70.6	156
П	2	3.2	6	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 0	4.115	1.035	2.985	0.51	2.85	0.375	62.22	29.25	69.85	113.8
	ю	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
Π	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		4.04	1.1	3.45	0.64	4.45	0.53	58.75	33.75	97.7	148
Ш		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
N	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
Λ	6	9	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
М	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
IN	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
III		13.14	45.73	4.58	14.02	4.11	1.09	5.08	0.91	5.03	1.25	3.88	0.66	4.88	0.62	104.98	59.11	52	348
	6	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
IX	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	99	46.6	73.4
	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
Δ	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
V	15	7.6	30	5.96	28.5	10.3	1.52	15	2.58	15.2	3.56	9.8	1.45	6	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
	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
IX	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
IX	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
ТXШ	19	3.1	6	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
X IV		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: 4	計石类型1	代号同表 1	。数据来	自本项目	组。测试	单位:16月	a 17 号样 d	引为国家地	原实验测	试中心:1	~15以及	18 和 19 ^長	号样品为化	二地质 中	小文验室	。表2与	表1样品)	序号的对应	送系:1一
																		•	
$1, 2^{-}$	-3, 3-5,	4-4, 5-6	, 6—7, 7–	-8, 8—9,	. 9-12,1()-14, 11-	-13, 12-	11, 13 - 15	, 14—23,	15-24, 10	5-26, 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(70.6~44.9)× 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(71.6~156) $\times 10^{-6}$,平均值 107.43×10^{-6} ,是地壳丰度 $10 \times$ 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)_x = 1.48,接近 1,与球粒陨石型相接近(王中刚等, 1989)。其 REE 总量为($36 \sim 88.43$)× 10^{-6} (为了便 于与球粒陨石对比,本文的所谓 REE 总量为 Σ 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($2.60 \sim 3.63$)× 10^{-6} ,平均为 3.20 $\times 10^{-6}$)。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 FeyO3、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

图中点亏与表 2 甲柱品序亏相对应

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(73.4~122)×10⁻⁶,平均为 97.7×10⁻⁶,是地 壳丰度的 59%。B含量为(136~166)×10⁻⁶,平均 148×10⁻⁶,是地壳的 14.8 倍。其 REE 总量为 (42.2~75.23)×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)_x = 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 Si₂O 含量低得较多,而 TiO₂ 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,Si₂O、全铁、MgO、 Y和 Zr 较低,TiO₂、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;(Na₂O + K₂O)为 4.9% Na₂O>K₂O,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)₄ = 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;(Na₂O + K₂O)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 定亲的缘关系。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)_A=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 时期该地区上地壳的化学成分(表 1 和表 2 中的 III)。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III)。

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H₂O⁺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 1 号蚀变带,蚀变岩宏观上与该 两类岩石关系密切,在微观上,蚀变岩中常见该两类 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: $M_i = (L_i - K_i)K_i(i = 1, 2, ..., 13; 1)$ 代表 SiO₂ 2 代表 TiO₂ ,...,13 代表 H₂O⁺; 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 3Variation coefficients of average chemicalcompositions between altered rock and other rocks in

Nianzigou ore district

	А	В	С	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 H₂O⁺、 MgO、TiO₂,带出的成分为 K₂O、CaO 及 Na₂O,带入 量大于带出量(表4)。H₂O⁺的大量带入再次表明岩 石的蚀变成因。MgO 和 TiO₂ 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

TiO₂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,TiO₂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	${\rm TiO}_2$	$\mathrm{Ai}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	P_2O_5	CO_2	$\mathrm{H_{2}O^{+}}$	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	В
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:① REE 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;② Zr 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(47.2~51.2)× 10⁻⁶ ;③ B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(53.83~134.7)×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 22—10 33—11 43—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 0-9 , 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:① REE 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;② REE 为微 量成分的矿物,其含量常为0.01%~1%;③ REE 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) ; ⑧—17(F type chlorite schist) ; ⑧—16(F type chlorite schist) ; ⑧—17(F type chlorite schist) ; ⑧—16(F type chlorite schist) ; ⑧—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(F type chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(F type chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(F type chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(F type chlorite schist) ; ⑨—16(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(F type chlorite schist) ; ⑨—16(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—16(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—17(F type chlorite schist) ; ⑨—18(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—18(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—18(average of two samples) ; ⑨—17(bype chlorite schist) ; ⑨—18(average of two samples) ; ⑨—18(average of two sample ; i.e. , No. 18(average of two sample ; i.e. , No. 19(average) ; ⑩—18(average) ; ⑩

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(TiO₂)金红石的TiO₂含量)为8.2%; 图 6 中的④号曲线为细晶直闪片岩,其 R(TiO₂)为 5.38%;图 7A 中的⑤号曲线为 F 型绿泥片岩,其 R (TiO₂)为0.12%;图 7A 中的③号曲线为粗晶直闪 (片)岩,其 R(TiO₂)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。

 Al_2O_3 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 Al_2O_3 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 Al_2O_3 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 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⁺、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 的迁移 Si 的存在不利于含结晶水矿物的 形成。 TiO_2 与 Fe_2O_3 的相关性不明显 , Fe_2O_3 含量 高的样品 ,其 TiO_2 含量却很低 ,反之 , TiO_2 含量高或 较高的样品 ,其 Fe_2O_3 含量却很低 ,说明在蚀变过程 中 Ti^{4+} 与 Fe^{3+} 发生了分离。尤应指出的是 , TiO_2 与 FeO的负相关性说明 ,在蚀变过程中 Ti^{4+} 与 Fe^{2+} 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,有大量的水参与。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



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 TiO₂ 与 SiO₂ 和 FeO 呈负相关,与 B 呈正相关,与 Fe₂O₃ 呈负相关(图 8),说明高 B、低 SiO₂、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

 $R(\text{TiO}_2)$ 金红石的 TiO_2)与 TiO_2(全岩的 TiO_2) B, Al₂O₃ 呈明显正相关,与 FeO 呈明显负相 关,与 Fe₂O₃ 略呈负相关。如不考虑少数奇异点和 低 $R(\text{TiO}_2)$ 点, $R(\text{TiO}_2)$ 与 MnO 呈明显正相关,与 SiO₂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, Fe²⁺、Fe³⁺,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 TiO₂、FeO、Fe₂O₃的含量和共存情况。Ti 是成 矿的物质基础,Fe²⁺和 Fe³⁺的存在不利于金红石的 形成,Ti⁴⁺易与 Fe²⁺结合形成钛铁矿(FeTiO₃),或 易呈代换 Fe²⁺和 Fe³⁺的方式进入磁铁矿(Fe²⁺ Fe³⁺O₄)等铁质矿物中。因此,成矿的基本条件是, Ti⁴⁺在蚀变热液中富集,同时,Fe²⁺和 Fe³⁺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 TiO₂ 含量可达 3%以上,却不含金红石(笔者 2005 年实地调查)。因此,笔者推断该矿区内碾子沟组原 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*(TiO₂) 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*(TiO₂)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。1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 中的钛进一部向中部富集,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*(TiO₂)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 TiO₂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,TiO₂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*(TiO₂)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*(TiO₂)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*(TiO₂) 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]. Bejing : 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 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]. Ecno. Geol., 85:862-876.
- Rock Teaching and Research Department of Wuhan Geological College. 1980. Magamatic rocks course (Book 1 and 2 J 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 J 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 depositand its relation to rutile miner[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 deposi [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. Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit : discovery of new genetic type of titanium deposit J]. Mineral Deposits , 25(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).

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): 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,1ズ4);435-443.
- 李博昀, 线自强, 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[1]. 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.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.