

文章编号 0258-7106(2008)04-0520-11

金红石矿床的类型、分布及其主要地质特征*

赵一鸣

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 金红石及其同质多象(锐钛矿)是钛的氧化物中最具经济意义的矿产资源,也是中国当前短缺和重要的急需矿种之一。金红石矿床产出的大地构造背景主要是古老地盾区及其边缘或褶皱带中的变质地体。全球范围内,主要的金红石矿床可分为4个大类,即:变质的、与侵入岩有关的、沉积的和风化的,它们又可以分为12个类型,其中,第四纪海滨沉积砂矿是最重要的类型,榴辉岩型、碱性岩风化型和河流沉积砂矿型次之,碱性辉石岩中的钙钛矿、角闪岩型和斑岩铜(钼)矿伴生的金红石矿床经济潜力很大。大多数金红石富矿床来自榴辉岩型、与侵入岩有关的热液交代型和深度风化的碱性岩型,但在变质(粉)砂岩型和古沉积砂矿型中也有富矿床产出。

关键词 地质学;金红石矿床;类型;分布;主要地质特征;综述

中图分类号:P618.47

文献标志码:A

Genetic types, distribution and main geological characteristics of rutile deposits

ZHAO YiMing

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Rutile and its isomeric mineral—anatase have the most important economic significance among titanium mineral resources and constitute one of the badly needed mineral resources currently in China. The major rutile deposits may be divided into four types, namely, metamorphic, igneous-related, sedimentary, and weathered. They may be further divided into 12 sub-types. Among them, the young sedimentary rutile deposits are economically most important, followed by eclogite type and deeply weathered alkalic pyroxenites. Some deposit types, such as rutile from amphibolite, and rutile byproduct from porphyry Cu-Mo deposits, are likely to become economic resources in the near future. Geotectonically, the rutile deposits are mostly distributed in ancient shields and their margins as well as within metamorphic terranes of the folding regions. Most of rutile-rich ores came from deposits of eclogite type, metasomatic zones of igneous-related deposits, and deeply weathered alkalic pyroxenites. Nevertheless, in metamorphic sandstone (siltstone) deposits and ancient placer deposits, rich ores may also occur.

Key words: geology, rutile deposits, genetic types, distribution, main geological characteristics, comprehensive

* 本文得到国家自然科学基金项目(40773038)、内蒙古自治区地勘项目(05-1-TK01)和中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(K0714-3)的联合资助

第一作者简介 赵一鸣,男,1934年生,研究员,长期从事金属矿床地质地球化学研究。

收稿日期 2008-04-10;改回日期 2008-05-08。张绮玲编辑。

钛在岩石中呈氧化物和硅酸盐矿物存在。自然界的主要富钛矿物有：金红石 (TiO₂)、锐钛矿 (TiO₂)、板钛矿 (TiO₂)、钛铁矿 (FeTiO₃)、钙钛矿 (CaTiO₃) 和榍石 (CaTiSiO₅)。此外，磁铁矿、黑榴石、黑云母、钙质角闪石和普通辉石等矿物的 TiO₂ 含量，也可达到 0.12% ~ 17% (Deer et al., 1962; 汪濮等, 1982)。经济地质学家把焦点集中于钛的氧化物上，即金红石、锐钛矿和钛铁矿。

因为金红石是当前中国短缺而又急需的重要矿种之一，本文着重讨论最具经济意义的钛氧化物——金红石及其同质多象锐钛矿的矿床类型、主要地质特征及其分布简况。考虑到徐少康等 (2001) 和夏学惠等 (2007) 对中国金红石矿床的类型、地质特征和找矿区带等已作过较全面的总结和讨论，因此，本文的重点放在介绍国外有关重要金红石矿床的类

型和简要地质特征上。这可能对中国金红石矿床的寻找有所借鉴。

1 金红石矿床的分类及其主要地质特征

世界上主要的金红石矿床可大致分为 4 大类别，即变质的、与侵入岩有关的、第四纪沉积的和风化的，它们可进一步划分为榴辉岩型、角闪岩型、变质(粉)砂岩型、变质铝硅酸盐型、斜长岩-铁闪长岩型、钠长岩型、碱性岩型、斑岩型、海滨砂矿型、河流砂矿型、古沉积砂矿型和碱性岩风化型等 12 个类型。其中以海滨砂矿型最为重要，榴辉岩型、碱性岩风化型和河流沉积砂矿型次之。各类型的矿床典型实例、典型钛矿物、矿石品位和金红石粒度及其经济意义见表 1。

表 1 重要金红石(锐钛矿)矿床类型及其经济意义(据 Force, 1991 修改和补充)

Table 1 Types of rutile (anatase) deposits and their economic significance (modified and replenished after Force, 1991)

类别及类型	典型钛矿物	金红石粒度	矿石品位 α(TiO ₂) %	重要性	矿床实例	资料来源
1 变质的						
a. 榴辉岩型	金红石	0.1~0.2 mm	3.1~5.8	B	意大利 Piampaludo 挪威 Sunnfjord 中国江苏毛北	Mancini, 1979 ;Griffin et al., 1981;程振香, 1990;王大志等, 2006
b. 角闪岩型	金红石 钛铁矿	0.02~2.2 mm	1.5~2.5	D	中国河南八庙 中国山西碾子沟	阎中英, 1991 沈永和等, 1986
c. 变质(粉)砂岩型	锐钛矿 金红石 钛铁矿	0.01~0.1 mm	1.5~15	D	中国内蒙古羊蹄子山-磨石山	赵一鸣等, 2006 本文
d. 变质铝硅酸盐型	金红石	<0.1 mm	±1	D	美国科罗拉多州 Evergreen	Schmidt, 1985
2 与侵入岩有关的						
a. 斜长岩-铁闪长岩型	金红石 钛铁矿	较粗	2~50	C	美国弗吉尼亚州 Roseland 墨西哥 Pluma Hidalgo	Herz et al., 1987 Ortega-Gutierrez, 1981
b. 钠长岩型	金红石		6~10	D	挪威 Kragero	Green, 1956
c. 碱性岩型	钙钛矿 金红石 板钛矿	1~4 mm	6.5	C	美国科罗拉多州 Powderhorn ; 美国阿肯色州 Magnet cove	Thompson, 1987 Erickson et al., 1963
d. 斑岩型	金红石	0.03~0.06 mm	0.24~0.9	D	美国犹他州 Bingham	Czaminske et al., 1981
3. 沉积的						
a. 海滨砂矿型	钛铁矿 金红石	0.10~0.18 mm	1.4, 金红石 占重矿物的 4~11	A	澳大利亚东海岸 ; 南非 Richards Bay ; 印度 Kerala 和 Tamil Nadu 省 ; Travancore 海岸地区	Mckellar, 1975 Fockema, 1986 Mallik et al., 1987
b. 河流砂矿型	钛铁矿 金红石	0.06~0.5 mm	0.5~2	C	塞拉里昂 Ghangbama	Force, 1991
c. 古沉积砂矿型	金红石 锐钛矿 假象金红石 钛铁矿	0.2~0.25 mm	>20	C	加拿大魁北克 Sutton	Hebert et al., 2007
4. 风化的						
碱性岩风化型	锐钛矿 (钙钛矿)	<0.1 mm~1 cm	>20	B	巴西 Tapira	Turner, 1986

注：A—很重要 B—在最近将来可能很重要 C—中等重要 D—目前在世界范围内较不重要。

下面对各类型金红石矿床的主要地质特征作简要介绍。

1.1 变质类矿床

这一大类的金红石矿床主要包括榴辉岩型、角闪岩型、变质(粉)砂岩型和变质铝硅酸盐岩 4 个矿床类型。变质原岩的成分和变质程度的高低对这类金红石矿的共生矿物组合和含铝硅酸盐矿物中 TiO_2 含量高低影响较大。在高压(超高压)高级变质的榴辉岩中,钛的氧化物只以金红石形式存在,一般不生成钛铁矿,共生的脉石矿物可能有石榴子石、绿辉石和闪石等,只有在退化变质带才有可能出现少量钛铁矿;在中(偏低)级变质的角闪片岩和变质(粉)砂岩中,金红石常与钛铁矿等密切共生,个别矿床甚至出现较多的锐钛矿(表 1)根据变质原岩成分的不同,脉石矿物可能有石英、角闪石、斜长石、铁直闪石、黑云母、蓝晶石和矽线石等。

随着变质程度的增高,黑云母和角闪石中 TiO_2 含量也相应增加,在中级变质相中(如内蒙古磨石山)黑云母一般含 TiO_2 0.06%~2.44%,角闪石的 TiO_2 含量也只有 0.03%~0.18%;但在麻粒岩相,黑云母的 TiO_2 含量可增至 6%,角闪石的 TiO_2 含量可增至 4%(Dymer, 1983)。

1.1.1 榴辉岩型矿床

金红石是高温高压变质系列榴辉岩中的一个特殊相。在此相中,金红石常与石榴子石(铁铝榴石)、绿辉石或碱质角闪石以及绿帘石共生,钛铁矿很少出现,而榍石只是作为退化变质矿物存在(Force, 1991)。当榴辉岩具有铁质辉长岩成分时,金红石的含量可超过 5%(Cortesogno et al., 1977)。

榴辉岩型金红石矿床在变质钛矿床中具有最重要的经济潜力。它见于意大利(Mancini, 1979)、挪威(Griffin et al., 1981)、俄罗斯南乌拉尔(Smirnov, 1983)、中国苏北(程振香, 1990)等地。

下面举榴辉岩型金红石矿床的 3 个实例:

(1)意大利 Piampalud 矿床 该矿床位于意大利西北部的榴辉岩中(Mancini, 1979; Clerici et al., 1981)。区域上还有不少小的含金红石榴辉岩体。矿区内榴辉岩具有铁质辉长岩的成分, TiO_2 含量为 4.6%~5.8%, 而 TFe 含量则高达 18.2%。

矿石薄片中能見到石榴子石变斑晶和辉石的大晶体,它们产于蓝绿色角闪石基质中。金红石呈集合体平行片理产出。集合体一般宽 1~2 mm,大多数金红石晶体大小为 0.1 mm 左右。集合体中的其

他矿物有角闪石、绿帘石、钛铁矿和少量石榴子石。Force(1991)在薄片中估算金红石的含量为 2.7%~9.3%,平均 5.3%。

Mancini 等(1979)曾估算 Piampaludo 矿床的金红石资源量为 780 万吨(根据 9 个钻孔资料),而 Force(1991)则乐观地估算可增加到 3 640 万吨。

(2)挪威 Sunnfjord 地区 早古生代含矿榴辉岩的成分为铁质辉长岩,包括石榴子石橄榄岩、橄榄岩、斜长岩、橄长岩、斜长二长岩等。榴辉岩边缘由于退化变质变为角闪岩。实际上,含矿榴辉岩是产于花岗岩类岩石中的一个很大的捕虏体。矿石 TiO_2 的平均含量为 2.7%~3.1%,而金红石资源量则为 290 万吨(Griffin et al., 1981)。

金红石粒径平均 0.1~0.2 mm,通常组成集合体产于粗晶绿辉石、自形的石榴子石和角闪石裂隙中。

Force(1991)总结了榴辉岩型矿床的几点规律:①含金红石的榴辉岩的成分多为铁质辉长岩,它比正常的榴辉岩更富 TiO_2 ;②未蚀变和未遭剪切切的榴辉岩中,金红石分布较均匀,否则就不均匀;③榴辉岩的大小一般为 0.1~4 km²,对于每个岩体来说,金红石资源量多在 10~1 000 万吨之间,金红石的品位一般为 3%~5%;④石榴子石的成分是铁铝榴石,含较多的锰铝榴石分子,绿辉石质成分的辉石对成矿不利。

(3)江苏东海毛北 东海地区位于苏鲁造山带南部,是超高压变质岩的典型出露地区之一。该区分布有 530 多个大小不等的榴辉岩体。它们成群成带地出现在以太古宇片麻岩为主的围岩中。在 20 世纪 80 年代,江苏省第六地质队等在本区进行了矿产普查,投入了大量钻探工作,探明毛北榴辉岩体是一个大型金红石矿床。随着中国大陆超深钻项目的实施,众多学者对苏北等高压变质带中含金红石榴辉岩的产出构造背景、岩石学、矿物学和地球化学等方面进行了较深入的研究,其中重点是大陆超深钻主孔中的含金红石榴辉岩和东海毛北金红石矿床。程振香(1990)、王大志(2006)和余金杰等(2006)曾对毛北矿区的基本地质特征、岩石、矿物和地球化学作过研究。

毛北矿区出露的变质岩有黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩、斜长片麻岩和角闪片岩等。榴辉岩体成群分布,呈透镜状和不规则弧状产出。其中主要岩体南北长 2 200 m,东西宽 120~300 m。已圈出 10 多个大小不等的矿体,主矿体长 1 300 m,厚 4

~210 m,平均130 m,向深部延伸300 m。

按榴辉岩构造特征和共生矿物的不同,可进一步划分出含金红石块状榴辉岩、片麻状榴辉岩、含蓝晶石多硅云母片麻状榴辉岩、石英榴辉岩和黝帘石条带状榴辉岩等。前者为矿体,其他类型榴辉岩的金红石含量大多小于1%,矿石中金红石含量为1.02%~5.85%,平均2.32%。金红石的粒径是0.04~0.6 mm,平均0.25 mm左右。

金红石矿石选矿效果良好,精矿品位 $w(\text{TiO}_2)$ 达93.6%,回收率64.17%。邱检生等(2006)曾分析了东海大陆科学钻井孔中贫钛和富钛两类榴辉岩的地球化学特征。

根据程振香(1990)、王大志等(2006)和张斌辉等(2006)所提供的东海毛北矿区各类含金红石榴辉岩的大量化学全分析资料,也可划分出低钛榴辉岩(TiO_2 含量0.4%~2.19%,平均1.41%)和高钛榴辉岩(TiO_2 含量2.24%~5.85%,平均4.45%)两大类。低钛榴辉岩的TFe含量也较低,为5.3%~10.0%;而高钛榴辉岩的TFe含量则相当高,达11.0%~24.0%,平均14.5%。高钛榴辉岩的 SiO_2 含量也偏低。这说明,榴辉岩型金红石富矿往往与含铁较高的榴辉岩密切相关。因此,榴辉岩含TFe的高低,是区分富矿和贫矿的重要标志之一。

余金杰等(2006)应用锆石地质温度计,测得毛北矿区附近小焦、新杨昌和许沟等地榴辉岩中金红石形成的温度为600~751℃。

1.1.2 角闪岩型矿床

由基性或镁铁质岩变质而成的角闪岩型金红石矿床主要产于中国东秦岭和晋北地区,如陕西河南交界处的西峡、商南、河南方城、新县和山西代县等地。根据变质前原岩基性程度的不同,又可分为变质基性岩型和变质镁铁质岩型2个亚类。下面分别举例作简要介绍。

(1)变质基性岩型 八庙-青山金红石矿床位于豫陕交界处的西峡八庙和商南青山之间,大地构造上隶属于秦岭构造带东段北秦岭褶皱带。曾有不少人认为含矿层时代为中元古代,张银波(1996)和徐少康等(1997)根据化石等资料,将其定为中泥盆世。矿层与白云石大理岩、大理岩互层,与围岩呈整合接触。金红石产于黑云母角闪片岩、角闪黑云片岩、钠长角闪片岩及斜长角闪片岩等变质岩中。矿层厚度一般0.63~13.37 m。金红石的共生矿物除角闪石、黑云母、斜长石(钠长石占相当比例)外,含少量榴

石、钛铁矿、黄铁矿和绿泥石。金红石多为半自形、自形、短柱状,粒度小于1 mm。矿石品位(TiO_2)在1.64%~3.56%之间。

(2)变质镁铁质岩型 山西代县碾子沟(据沈永和等,1986)矿区内有吕梁期基性、超基性岩体(辉石岩、橄榄辉石等)侵入。它们遭受自变质和后期热液作用后蚀变为阳起透闪岩和直闪岩(含蓝晶石)等,并使金红石富集成矿。

矿化带长11 km,主矿体长1700 m,延深400~500 m,平均厚44 m。矿体呈脉状、条带状和团块状。矿石 TiO_2 的平均品位2.2%。金红石与钛铁矿密切共生,粒度为0.1~0.5 mm。

已探明金红石的资源量163.4万吨。由于矿石中金红石颗粒度较大,矿石的选矿效果很好:原矿中 TiO_2 含量为2.21%,金红石($w(\text{TiO}_2)$)含量为1.86%。经试验后,精矿混合品位(TiO_2)90.17%,回收率高达75.06%(贾琇明等,2006)。因此,碾子沟金红石矿可能是目前国内开发利用条件最好的金红石矿山。

1.1.3 变质(粉)砂岩型——内蒙古羊蹄子山-磨石山矿床

这是笔者近年来(赵一鸣等,2006)发现和勘查的一个以锐钛矿为主的新类型钛矿床。在大地构造上,矿床地处华北地台北缘内蒙地轴的中东部,位于侏罗系火山盆地的局部隆起区。矿体产于中元古代[(1751.4±8)Ma]二道凹群绢云石英(或石英绢云)片岩、变质石英(粉)砂岩中,围岩还有斜长角闪岩和角闪岩等。矿体呈透镜状、似层状,与围岩整合产出。

富矿石呈条纹状或条痕状构造,表现为以钛的氧化物为主的条纹(痕)与以石英为主(伴有星散状钛矿物)的条纹相间组成。矿石矿物较特殊,主要为锐钛矿,伴有一定量金红石和钛铁矿。脉石矿物主为石英(其含量>60%),含少量直闪石、黑云母和绿泥石,局部有锰铝-铁铝榴石。富矿品位($w(\text{TiO}_2)$)3.17%~15.46%,而贫矿品位则为1.3%~2.97%。锐钛矿、金红石和钛铁矿的粒度较细,一般为0.01~0.1 mm。在贫矿石中,上述钛矿物主要呈不均匀的浸染状分布。

矿床局部又有燕山晚期[(118±3)Ma]花岗岩的侵入,而遭到热液改造,形成块状、网脉状和细脉浸染状矿石。

锐钛矿和金红石的微量元素地球化学研究揭

示,Cr和Nb的数据主要落在Zack(2004)Cr-Nb相关图中的变质镁铁质岩区,而不是它的赋存岩石变质粉砂岩区,说明成矿与围岩斜长角闪岩(变质基性、超基性岩)有成因联系。

矿石和围岩硅同位素研究表明, $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $0.1\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$,完全可以和白云鄂博矿床和秦岭泥盆纪多金属矿床的交代岩、矿石和硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(丁悌平等,1994)进行对比。大多数学者都倾向认为后两类矿床属海底喷气沉积矿床。因此,羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床成因属于中元古代沉积变质矿床,成矿与海底中(基)性火山喷发活动有关。

1.1.4 变质铝硅酸盐型矿床

在美国,这类金红石矿床的重要性在变质型矿床中仅次于变质榴辉岩型。矿床大多数由火山成因的母岩经变质作用或变质热液作用而形成的(Marsh et al., 1976; Schmidt, 1985)。

矿床的矿物组合很特殊,而且与变质程度的变化有很大关系。矿石中铝硅酸盐矿物很丰富,其数量能超过石英。它们从高级变质的矽线石,通过蓝晶石和红柱石,到低级变质的叶蜡石。黄玉和铝质磷酸盐矿物(如天蓝石)较常见。黄铁矿局部富集。

美国东南部的蓝晶石、叶蜡石和其他铝硅酸盐型矿床中,金红石可作为副产品。矿石中金红石含量约1%或少一点。金红石粒径小于0.1 mm。矿床规模通常为中小型,个别达大型。

1.2 与侵入岩有关的矿床

1.2.1 斜长岩-铁闪长岩型矿床

斜长岩侵入体一般产于高级变质的地体中,常伴生铁闪长岩、铁辉长岩、紫苏花岗岩和环斑花岗岩(Emslie, 1978)。铁闪长岩和辉长岩的侵入时间明显晚于斜长岩,但它们之间具有一定的地球化学联系。

斜长岩侵入体的成分变化于英安质岩至浅色辉长岩之间。在斜长岩-铁闪长岩侵入体内,斜长岩含 TiO_2 较低,但铁闪长岩及有关岩石富含金红石和钛铁矿。除了这两个含钛氧化物外,在这套侵入杂岩中,还有磁铁矿、赤铁矿和钛尖晶石。

与斜长岩、铁闪长岩有关的钛矿床可进一步分成2个亚类:一类是钛铁矿-磁铁矿矿床;另一类为金红石矿床。应该指出,与斜长岩类有关的钛铁矿-磁铁矿矿床属岩浆型,在美国纽约州的Sarford湖地区(Force et al., 1984)、加拿大魁北克Allard湖地区(Bergeron, 1972)、挪威Tellnes地区(Krause et al.,

1986)以及中国河北大庙(赵一鸣等,2004)等地均有产出,而且有些是世界上非常重要的钛铁矿产地,仅加拿大的Allard湖和挪威的Tellnes地区,目前就提供世界钛资源的19%和12%。但本文不打算讨论钛铁矿矿床,只着重讨论金红石矿床,这类金红石矿床大多可能与热液交代作用有关,品位往往较高。

实例一:美国弗吉尼亚州Roseland地区

该钛矿床既有岩浆型钛铁矿矿床,又有交代型金红石矿床,均曾开采过,剩下金红石资源量约150万吨和钛铁矿资源量1250万吨(Herz et al., 1987)。粗粒金红石主要沿斜长岩与含钛铁蚀变火山岩片麻岩接触带产出,金红石含量约2%左右。在含钛铁矿的片麻岩中,还有钛铁磷灰岩产出。

实例二:墨西哥Pluma Hidalgo地区

该地区(瓦哈卡省)发育一个大的高级变质岩地体。变质岩主要由片麻岩组成,组成矿物有石英、反条纹长石、辉石、石榴子石、石墨和钛铁矿,构成条带状构造。片理方向为北西-南东(Ortega-Gutierrez, 1981)。

斜长岩含有反条纹长石、辉石的大晶体及石英。这套岩石是Pluma Hidalgo矿床的围岩。斜长岩遭高度蚀变,增加了许多石英和电气石。在Pluma Hidalgo中部地区,有许多小的不纯斜长岩侵入体,一般含1%~2%的粗粒金红石。但具有巨大经济价值的是含2%~50%金红石的不纯斜长岩,平均含 TiO_2 20%。这可能是世界上最富的金红石矿石。金红石矿体宽约20~40 m,长至少有600 m。这个矿带的围岩主要是片麻岩,局部是含低品位金红石的斜长岩。在富矿石中,金红石呈粗粒单晶产出,产于蚀变长石或辉石巨晶中(Paulson, 1964)。

Paulson(1964)认为,高品位金红石矿石的形成可能与接触交代作用有关。矿床的原始岩石应是正常的低品位金红石斜长岩。

1.2.2 钠长岩型矿床——挪威Kragero地区

在挪威南部海岸靠近Kragero产有富金红石的钠长岩,该矿床1927年以前就曾开采过,现已采完。Greer(1956)曾对矿区地质情况作过报导,含金红石钠长岩的围岩是角闪岩,它有2种类型:一是片理化的变辉长岩,含有方柱石和楣石;另一类为斜长角闪岩,是变形的枕状熔岩。

钠长岩中富集金红石,而角闪岩类围岩则富含楣石。Kragero的主要金红石矿体宽2 m,金红石含量平均为6%至10%,但分布不均匀,局部甚至高达

25% ,其他岩石则含电气石或刚玉和少量金红石。Green(1956)认为金红石富矿的生成是交代成因的。

1.2.3 与碱性侵入岩有关的矿床

含钛氧化物的重要碱性岩为云霞正长岩杂岩,它可能含丰富的钙钛矿、磁铁矿和金红石同质多形晶。除富含磁铁矿外,常富含铌。钛铁矿一般较少,但也有较富集的。与此相反,钠质霞石正长岩类碱性杂岩体中的含钛矿物多为硅酸盐,如榍石、钛普通辉石、钛钙铁榴石、钛闪石等(Force, 1991)。就是说,这些含钛矿物均不具工业意义。

这里介绍 2 个与碱性侵入岩有关的矿床:

(1) 美国科罗拉多州的 Powderborn

Thompson(1987)曾报导,在 Powderborn 地区大约有钙钛矿资源量 5 亿吨左右。这是美国最大的钛矿床。矿区发育大面积辉石岩(30 km²)。该辉石岩由透辉石质普通辉石组成,局部为含钛辉石,伴有少量磁铁矿、钙钛矿、黑云母和金云母。

辉石岩的重要变种是局部富含磷灰石、橄榄石、霞石、长石和灰黑榴石的碱性岩,含约 5% 的 TiO₂。石榴子石和榍石一样,均属晚期矿物。辉石的 TiO₂ 含量很高,可达 0.3% ~ 11.9%, 平均 6.5%。

磁铁矿-钙钛矿岩形成不连续的透镜状岩脉,厚度 0.5 ~ 50 m。岩脉中的钙钛矿含量很高(50% 左右)。在磁铁矿-钙钛矿岩石中 TiO₂ 的含量最高达 40%。钙钛矿晶体粒度大小一般为 1 ~ 4 mm。

(2) 美国阿肯色州 Magnet Cove 地区

这是一个非常特殊的以板钛矿为主的碱性岩型矿床。据 Erickson 等(1963)报导,一群中生代碱性环状杂岩体侵入到古生代沉积岩组成的褶皱带中,形成一个小的碱性侵入岩盆地。碱性岩内带有碳酸岩,钛矿床产于钛铁霞辉岩外环和中环的响岩中。另外,外环的石榴子石正长岩和钛铁霞辉岩可能与产于蚀变沉积围岩的接触变质板钛矿矿床有关。

钛铁霞长岩或磁铁矿-钙钛矿辉石岩含 4.0% ~ 4.3% 的 TiO₂; 蚀变响岩局部遭角砾岩化,平均含 TiO₂ 2.5%。

矿床的产出有 3 个主要形式(环境):① 蚀变响岩中的金红石、长石、碳酸盐脉群,金红石含量为 2.7%;② 钛铁霞辉岩中的板钛矿-长石(微斜长石)-黄铁矿脉,还伴有辉钼矿;③ 在接触变质似砂卡岩中,板钛矿矿体产于碱性侵入岩和沉积围岩的接触带中。矿体由细网脉状和浸染状石英、板钛矿和褐铁矿组成,产于重结晶的石英岩中。矿石中板钛矿

含量为 5%。板钛矿含有 2% 的 Nb 和 0.5% 的 V₂O₅。

估计该热液交代型矿床的板钛矿资源量可达 500 万吨。

1.2.4 斑岩型

金红石在钙碱性花岗岩类斑岩蚀变系统中的含量可达 0.3% ~ 1.0%。在斑岩的蚀变岩带中,含钛矿物黑云母、角闪石、钛磁铁矿、榍石和钛铁矿往往消失,形成金红石。

以美国犹他州 Bingham 斑岩铜(钼)矿床为例,这个矿床是美国最大的斑岩铜矿,伴生钼。但伴生的金红石可能也是有价值的资源。该矿床中第三纪等粒石英二长岩和较晚的浅色斑状石英二长岩侵位于古生代沉积岩中(Bray et al., 1975)。矿石几乎与钾化蚀变带一致,青磐岩化蚀变带在其外带,而绢云岩化蚀变带则叠加在岩体和钾化带之上。Czamancke 等(1981)发现,金红石在等粒石英二长岩和浅色斑状石英二长岩的钾化蚀变带中平均含量分别为 0.34% 和 0.24%; 金红石的粒度是 0.03 ~ 0.06 mm。

Force(1991)认为斑岩铜(钼)矿所伴生的金红石虽然 TiO₂ 品位较低,但可以作为副产品回收,具有很大的经济潜力。实际上, Sullivan 等(1981)早在 20 世纪 80 年代初用浮选和重选方法把金红石从斑岩铜矿石及其尾矿中分离出来的初步试验已获得成功。

据 Force(1991)估计,该斑岩铜(钼)矿床中的伴生金红石资源量达 600 万吨。

除了上述与斜长岩、钠长岩、斑岩和碱性侵入岩有关的金红石矿床外,还有与花岗岩类(Force, 1991)、玄武岩(Haggerty, 1976b)甚至金伯利岩(Haggerty, 1976a)有关矿床的报导,但这些矿床的规模均较小,而且矿石 TiO₂ 品位也都较低。因此,这里不作为独立的类型一一介绍。

1.3 沉积类矿床

1.3.1 第四纪海滨沉积砂矿床

这是当前世界上钛矿床中最重要的类型。它在资源量或产量上均居世界各类钛矿床的首位(Force, 1991)。矿床位于大陆边缘,其产出纬度低于 35°, 大多是由从陆地流入海洋的高级变质地体源的碎屑物沉积而成。砂矿粒度为中细粒。重矿物组合属抗风化能力较强的矿物,如钛铁矿、金红石、锆石、独居石和铝硅酸盐矿物等。有经济意义矿床的重砂矿物含量从 1% 至 25% 甚至以上。

海滨金红石砂矿床可进一步划分为海滨沉积矿床和海岸风成矿床两类,以前者为主,两者常共生在一个砂矿床中。

重要的海滨砂矿有澳大利亚东海岸、西海岸,印度 Kerala 和 Tamil Nadu 省 Trauancore 海岸地区和南非 Richards Bay 等(表 1)。下面对澳大利亚东海岸和南非的 Richards Bay 地区作简要介绍。

澳大利亚东海岸地区的金红石砂矿床南起 Sydney,北至 Brisbane,断续延长 1 200 km (Mc Kellar, 1975)。开采的重砂矿物粒径一般为 0.11~0.13 mm。高品位矿层主要由金红石、锆石和钛铁矿组成。这 3 个矿物约占了重砂矿物的 90% 以上,其他重矿物还有电气石、独居石、铬铁矿和石榴子石等。矿层厚为 2 m。矿床可进一步细分为全新世海滨矿床、全新世风化矿床、更新世海滨矿床和更新世风成矿床 4 类。

南非 Richards Bay 地区的砂矿床由风成矿床和海滨沉积矿床构成,以前者为主 (Fockema, 1986)。矿层厚 20 m 左右。重矿物含量平均 10%~14%,有经济意义的重矿物为钛铁矿、锆石和金红石,其中钛铁矿占主导地位。另外还有少量白钛矿、独居石、磁铁矿、石榴子石等。重矿物的粒径一般 0.1~0.15 mm。

1.3.2 河流沉积砂矿床(非海相沉积砂矿床)

这是金红石(钛铁矿)矿床一个相当重要的类型。Force (1991)曾总结这类河流沉积矿床形成的 3 个有利地形-岩性条件,即:①从矿源区出发具有放射状的排水系统;②排水盆地完全产于有利源岩区(如榴辉岩);③排水盆地源头有利岩源区被来自这些有利源岩的沉积物所包围。

非洲塞拉里昂 Gbanbama 金红石砂矿床就具备上述 3 个有利的成矿条件。塞拉里昂完全靠出口金红石获得重要外汇收入。

该砂矿床的源岩为石榴子石麻粒岩,富含金红石(0.2%~1%)。这类岩石遭到很强的风化作用,并被放射状排水系统包围。矿体厚 10~20 m,直接覆盖于风化源岩基岩之上。重矿物含量一般为 1%~5%,含 0.5%~2% 的金红石。

1.3.3 古沉积砂矿床加拿大魁北克 Sutton 地区

Hebert 等最近(2007)报导了加拿大魁北克省阿巴拉契亚山一个非常特殊的金红石富矿床,属于早寒武世的古砂矿,但又经历了绿片岩相低级变质作用。他们称其为非常规的金红石矿床。

在魁北克阿巴拉契亚山 Sutton 地区,下寒武统富钛变质沉积岩地层分布广泛。该富钛地层 TiO_2 的含量大于 20%,层厚达 5~30 m,含矿岩石露头分布面积约 20 km²。因此,钛矿资源潜力很大。

下寒武统金红石古砂矿的赋矿地层自下至上依次为:

变质玄武岩;

千枚岩,厚 3 m;

含白云母石英岩,厚 2.5 m;

变玄武质砂岩,由重矿物、石英和绿泥石组成,厚 35 m;

变玄武质砂岩,由重矿物、石英和白云母组成,局部夹白云岩,厚 30 m;

白云质大理岩。

重矿物的成分为:金红石 18%,锐钛矿 20%,假象金红石($Fe_2Ti_3O_9$)12%,钛铁矿 5%,磁铁矿 10%,赤铁矿 15%,锆石 10%,电气石 5%,钛磁铁矿 3%。这些铁钛氧化物的粒度为 0.2~0.25 mm。重矿物在含矿岩石中的比例超过 60%。

关于矿床的成矿作用过程,Hebert 等(2007)认为原始的碎屑沉积重矿物中,钛铁矿占了 65%左右,金红石碎屑很少。沉积成岩后的古风化淋滤作用,使铁被淋滤,增加了钛的含量,志留纪造山运动又促使矿层遭受低级变质作用,产生的新矿物,包括假象金红石、锐钛矿和金红石等。

1.4 碱性岩风化型矿床

巴西 Tapira, Salltre 和 Catalao I 矿床是该风化型矿床的唯一实例。这是一个超大型锐钛矿矿床,产于风化的碱性岩中。锐钛矿资源量可达 3 亿吨,矿石含 TiO_2 高达 20% (Force, 1991)。

Ulbrich 等(1981)测定该区 64 个碱性岩的时代为 40~90 Ma。其中有 3 个岩体富含钛,其他岩体则含稀土元素、磷酸盐、斜锆石、表生氧化锰矿和硅镁镍矿。这 3 个富钛碱性岩体侵入于前寒武纪地层中,其分布范围可达 25~40 km²。它们由钛铁霞辉岩、云霞钛辉岩和其他碱性辉石岩组成,含 14% 的钙钛矿和 30% 榍石,局部还富集磷灰石和磁铁矿。

有潜力的钛矿石实际上不是这些富钛的碱性岩,而是部分产于其上的风化残余物,厚度可达 200 m。在风化残余物中,锐钛矿是交代钙钛矿、磁铁矿和榍石形成的,矿物集合体大小可达 0.1 mm~1 cm。锐钛矿的显微晶体是多孔的,并被褐铁矿所胶结 (Turner, 1986)。

2 金红石矿床的分布

世界重要金红石矿床的分布,大多位于古老地盾区及其边缘或褶皱带中的变质地体(图 1)。一些世界级金红石矿床,如巴西的 Tapira、墨西哥的 Pluma Hidalgo、挪威的 Sunnfjord 和前苏联的 Shubino 等产于上述构造环境。包括金红石资源量和产量占世界前列的第四纪海滨砂矿床在内,如澳大利亚的东部和西部海岸、南非的 Richard Bay 和印度的 Travancore 以及塞拉里昂的非海相沉积砂矿床,其源区都离不开地盾边缘的老变质岩系。美国不同类

型金红石矿床的产出地层大多是老变质岩系。与金红石矿化有关的斜长岩或碱性岩等大多侵位其中 (Force, 1984; 1991)。

中国金红石矿床产出的构造环境也是如此。笔者收集了中国 53 个金红石矿床(点)的地质资料,发现有 90% 左右的矿床(点)落在华北地台范围内的老变质岩系中(图 2),只有少数点散布于湖南、广东、福建、四川和贵州等省。

在华北地台区,金红石矿床(点)的分布大致可分为 3 个带:① 东秦岭成矿带,包括陕西户县、商南、西峡、安康、平利,河南方城、新县,安徽西部和湖北枣阳等地的有关矿床(点)。各类金红石矿床的分

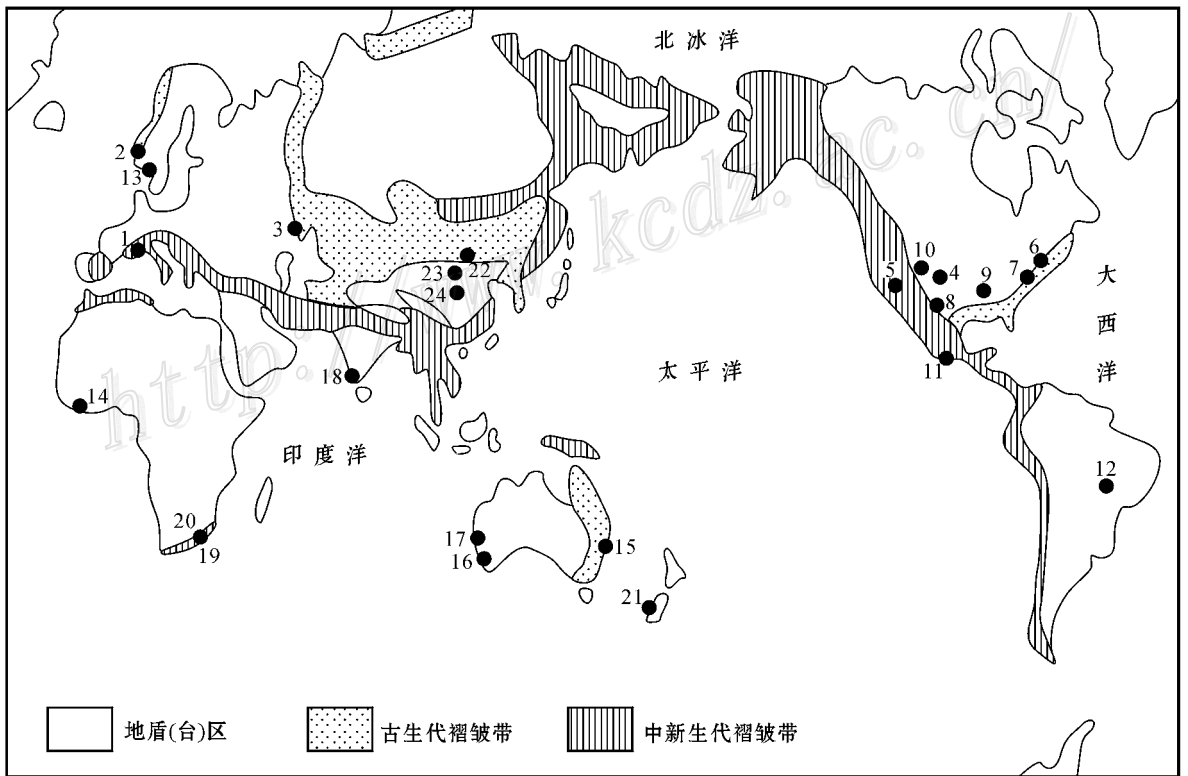


图 1 世界主要金红石(锐钛矿)矿床分布略图

- 1—意大利 Plampaludo ;2—挪威 Sunnfjord ;3—俄罗斯 Shubino ;4—美国科罗拉多州 Evergreen ;5—美国加利福尼亚州 White Mountain ;6—美国纽约州 Sanford Lake ;7—美国弗吉尼亚州 Roseland ;8—美国科罗拉多州 Powderhorn ;9—美国阿肯色州 Magnet Cove ;10—美国犹他州 Binham ;11—墨西哥 Pluma Hidalgo ;12—巴西 Tapira ;13—挪威 Kragero ;14—塞拉里昂 Gbangbama ;15—澳大利亚东海岸 ;16—澳大利亚西海岸 Geographe Bay ;17—澳大利亚西海岸 Eneabba ;18—印度 Travancore ;19—南非 Richards Bay ;20—南非 Kroo 盆地 ;21—新西兰 Mc Nairy Sand ;22—中国内蒙古羊蹄子山-磨石山 ;23—中国山西碾子沟 ;24—中国河南柏树岗

Fig. 1 Worldwide distribution of major rutile (anatase) ore deposits

- 1—Plampaludo (Italy) ;2—Sunnfjord (Norway) ;3—Shubino (Russia) ;4—Evergreen (Colorado , USA) ;5—White Mountain (California , USA) ;6—Sanford Lake (New York , USA) ;7—Roseland (Virginia , USA) ;8— Powderhorn (Colorado , USA) ;9—Magnet Cove (Arkansas , USA) ;10—Binham Utah , USA) ;11—Pluma Hidalgo (Mexico) ;12—Tapira (Brazil) ;13—Kragero (Norway) ;14—Gbangbama (Sierra Leone) ;15—East coast of Australia ;16—Geographe Bay (West coast of Australia) ;17—Eneabba (West coast of Australia) ;18—Travancore (India) ;19—Richards Bay (South Africa) ;20—Kroo Basin (South Africa) ;21—Mc Nairy Sand (New Zealand) ;22—Yangtizishan-Moshishan (Inner Mongolia , China) ;23—Nianzigou (Shanxi , China) ;24—Baishugang (Henan , China)

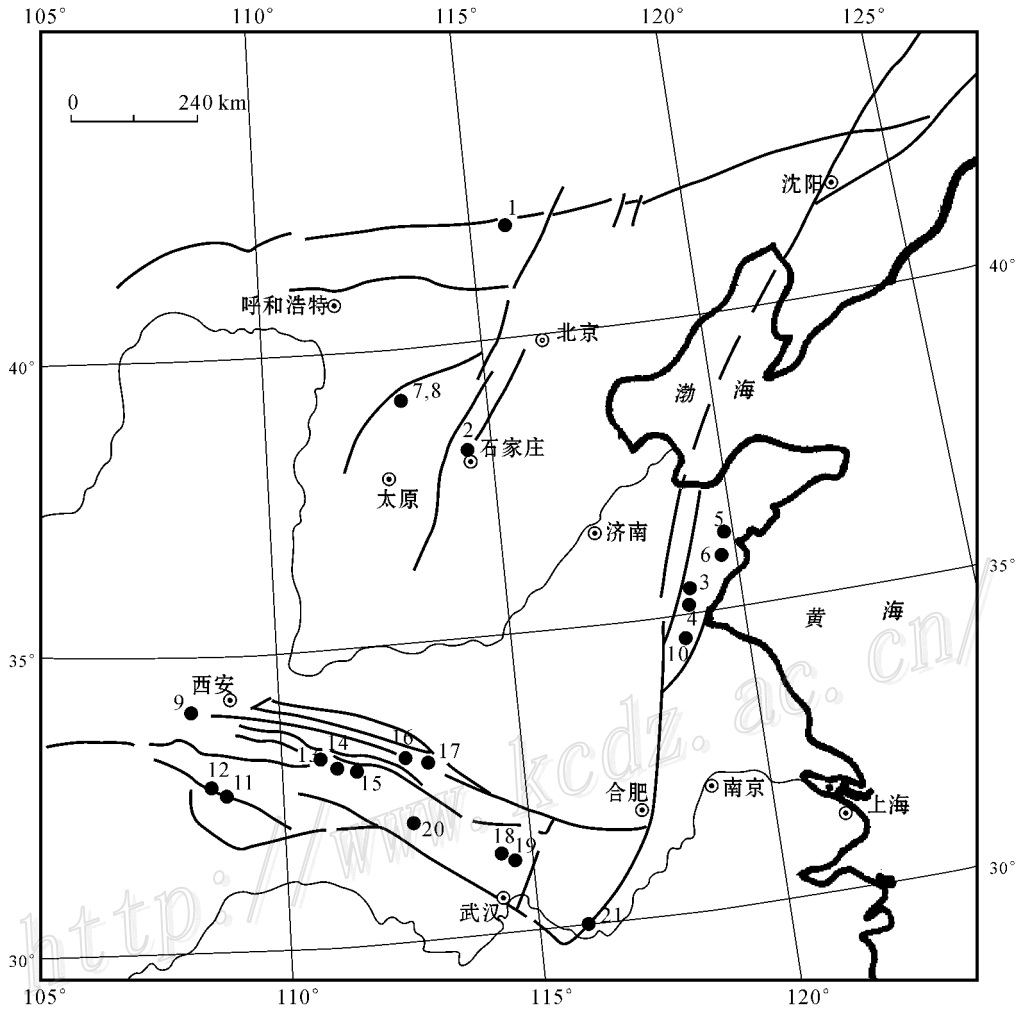


图2 华北陆块及周边主要金红石(锐钛矿)矿床分布略图

1—内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山;2—河北行唐县牛下口;3—山东莒南县西砚柱;4—山东莒南县杨庄;5—山东诸城市上崔家沟;6—山东日照市虎山;7—山西代县洪塘-羊廷寺;8—山西代县碾子沟;9—陕西卢县大石沟;10—江苏东海;11—陕西安康县大河;12—陕西安康县熊山沟;13—陕西南商县青山-新庙;14—河南西峡县八庙水峡矿段;15—河南西峡县八庙寨子沟矿段;16—河南方城县柏树岗;17—河南方城县五间房;18—河南新县杨冲;19—河南新县红显边;20—湖北枣阳市大阜山;21—安徽岳西、潜山、太湖地区

Fig.2 Distribution of major rutile (anatase) ore deposits in North China massif and its adjacent regions

1—Yangtizishan-Moshishan of Zhenglanqi County in Inner Mongolia; 2—Niouxiakou of Tangxian County in Hebei Province; 3—Xiguanzhu of Junan County in Shandong Province; 4—Yangzhuang of Junan County in Shandong Province; 5—Shangcuijiagou of Zhucheng City in Shandong Province; 6—Hushan of Rizhao City in Shandong Province; 7—Hongtang-Yangtingsi of Daixian County in Shanxi Province; 8—Nianzigou of Daixian County in Shanxi Province; 9—Dashigou of Huxian County in Shaanxi Province; 10—Donghai in Jiangsu Province; 11—Dahe of Ankang County in Shaanxi Province; 12—Xiongshangou of Ankang County in Shaanxi Province; 13—Qingshan-Xinmiao of Shangnan County in Shaanxi Province; 14—Bamia-shuixia ore block of Xixia County in Henan Province; 15—Bamiaio-Zhaizigou ore block of Xixia County in Henan Province; 16—Baishugang of Fangcheng County in Henan Province; 17—Wujianfang of Fangcheng County in Henan Province; 18—Yangchong of Xinxian County in Henan Province; 19—Hongxianbian of Xinxian County in Henan Province; 20—Dafushan of Zaoyang City in Hubei Province; 21—Yuexi-Qianshan-Taihu district in Anhui Province

布,明显受秦岭造山带构造的控制;② 郯-庐断裂以东苏鲁超高压变质带中的金红石矿床成矿带,大致呈北北东向展布,主要为榴辉岩型矿床;③ 太行山-正蓝旗成矿带:已知成型矿床相对较少,主要有河北涞中水东、山西代县碾子沟和内蒙古羊蹄子山-磨

石山。该成矿带工作程度相对较低,有一定找矿潜力。

不难看出,华北地台范围内的金红石矿床大多产于前寒武纪老变质岩地层中,而且似乎与深大断裂有一定空间关系。

3 总 结

(1) 世界重要金红石矿床可分为四大类别(变质的、与侵入岩有关的、第四纪沉积的和风化的)和 12 个类型,其中以第四纪海滨砂矿型最重要,榴辉岩型、碱性岩风化型和河流沉积砂矿床次之,碱性辉石岩中的钙钛矿、角闪岩型和斑岩铜(钼)矿伴生的金红石矿床经济潜力很大。

(2) 重要金红石矿床多分布在古老地盾区及其边缘或褶皱带中的变质岩地体中。

(3) 已知金红石富矿($TiO_2 > 3\%$)大多产于榴辉岩型矿床和与侵入岩有关的接触交代带,后者属热液交代的产物,但在深度风化的碱性辉石岩和变质(粉)砂岩型矿床中,却也有以锐钛矿为主的富矿产出。

(4) 在中国,找金红石的对象目前是以榴辉岩型和角闪岩型为主,但总的看,上述两类矿床矿石品位偏低,富矿不多,不易开发利用。因此,建议今后对海滨沉积型砂矿、与侵入岩有关的热液型矿床、碱性岩型矿床以及变质(粉)砂岩型锐钛矿矿床等也应加以重视,因为前一类不仅规模大,且易采易选;而在后三类矿床中,富矿占有相当大的比重。

References

Bergeron M. 1972. Quebec Iron and Titanium corporation ore deposit at Lac Tio, Quebec [C]. International Geological Congress, Excursion guidebook. B09, 8p.

Bray R E and Wilson J C. 1975. Guidebook to Bingham mining district: Society of Economic Geologists [M]. 156p.

Cheng Z X. 1990. Basic characteristics of the Donghai eclogite type rutile deposit in Jiangsu province [J]. Mineral Deposits, 9(1):86-90 (in Chinese with English abstract).

Clerici C, Mancini A, Mancini R, Morandini A, Occeila E and Protolo C. 1981. Recovery of rutile from an eclogite rocks [A]. In: Laskowki J, ed. Mineral processing [C]. New York: Elsevier 2, pt. B:1803-1827.

Cortosogno L, Ernst W G, Galli M, Messiga B, Pedemonte G M and Piccardo G B. 1977. Chemical petrology of eclogite lenses in serpentinite [J]. Gurppo di Voltri. Ligurian Alps: Journal of Geology, 85: 255-277.

Czamanske G K, Force E R and Moore W J. 1981. Some geologic and potential resources aspects of rutile in porphyry copper deposits [J]. Econ. Geol., 76: 2240-2245.

Deer W A, Howie R A and Zussmann J. 1962. Rock-forming minerals. V. 5, Non-silicates [M]. Longmans. 1-371.

Ding T P, Jiang S Y, Wan D F, Li Y H, Li J C, Song H B, Liu Z J and

Yao X M. 1994. Geochemistry of silicon isotopes [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-102 (in Chinese with English abstract).

Emslie R F. 1978. Anorthosite massifs, rapakivi granites, and late Proterozoic rifting of North America [J]. Precambrian Research, 7: 61-98.

Erickson R L and Blade L V. 1963. Geochemistry and petrology of the alkalic igneous complex at Magnet Oveo, Arkansas [J]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 425. 95p.

Fockema P D. 1986. The heavy mineral deposits north of Richards Bay [A]. In: Anhaensser C R, ed. Mineral deposits of southern Africa [M]. Johannesburg: Geological Society of South Africa. 2301-2307.

Force E R and Lynd L E. 1984. Titanium-mineral resources of the United States: Definition and documentation [J]. U. S. Geological Survey Bulletin, 1558-B. 11p.

Force E R. 1991. Geology of titanium-mineral deposits [J]. Geol. Soc. Am. Special Paper, 259: 1-112.

Green J C. 1956. Geology of the Storkollen-Blankenburg area, Kragero, Norway [J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 36: 89-140.

Griffin W L and Mork M B E. 1981. Eclogites and basal gneisses in western Norway, Excursion B [M]. Oslo: Geologisk Museum. 88p.

Haggerty S E. 1976a. Oxidation of opaque mineral oxide in basalt [A]. In: Rumble D III, ed. Oxide minerals [M]. Mineralogical Society of America Short Course Notes. 3: 1-100.

Haggerty S E. 1976b. Opaque mineral oxides in terrestrial igneous rocks [A]. In: Rumble D III, ed. Oxide minerals [M]. Mineralogical Society of America Short Course Notes. 3: 101-300.

Hebert E and Gauthier M. 2007. Unconventional rutile deposits in the Quebec Appalachians: Product of hypogene enrichment during low-grade metamorphism [J]. Econ. Geol., 102: 319-326.

Herz N and Force E R. 1987. Geology and mineral deposits of the Rose-land district of central Virginia [M]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1361. 56p.

Jia X M, Li S R, Yue L Q and Zhang B. 2006. Geological features and economic significance of rutile deposit in Nianzigou, Shaanxi [J]. Geology and Prospecting, 42(6): 42-46 (in Chinese with English abstract).

Krause H, Gierth E and Schott W. 1986. Fe-Ti deposits in the South Rogaland igneous complex, with special reference to the Ana-Sira anorthosite massif [J]. Norges Geologiske Undersokelse Bulletin, 402: 25-38.

Mallik T K, Vasudevan V, Verghese P A and Machado T. 1987. The black sand placer deposits of Kerala Beach, southwest India [J]. Marine Geology, 77: 129-150.

Mancini A, Mancini R and Martinotti G. 1979. Valorization of new titanium resource: Titaniferous eclogites [A]. Istanbul: Proceedings IV-15. 10th World Mining Congress. 19p.

Marsh S P, and Sheridan D M. 1976. Rutile in Precambrian silimanite-quartz gneiss and related rocks, east-central Front Range, Colorado [J]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 959-G, 17p.

Mckellar J B. 1975. The eastern Australia rutile province [A]. In: Knight C L, ed. Economic geology of Australia and Papua New Guinea [M]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 5, 1055-1061.

Ortega-Gutierrez F. 1981. Metamorphic belts of southern Mexico and

- their tectonic significance [J]. *Geofisica International*, 20-3 : 177-202.
- Paulson E G. 1964. Mineralogy and origin of the titaniferous deposit at Pluma Hidalgo, Oaxaca, Mexico [J]. *Econ. Geol.*, 59 : 753-767.
- Qiu J S, Wang R C, Jiang S Y, Hu J, Zhang X L and Ni P. 2006. Geochemical comparison between high-Ti and low-Ti eclogites from the main hole of the Chinese Continental Drill Project and its implications for rutile mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7) : 1875-1882 (in Chinese with English abstract).
- Schmidt R G. 1985. High-alumina hydrothermal systems in volcanic rocks and their significance to mineral prospecting in the Carolina slate belt [J]. *U. S. Geological Survey Bulletin*, 1562. 59p.
- Shen Y H. 1986. Geology and mineral resources of the Shanxi Province [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 247p (in Chinese).
- Smirnov V I, Ginzburg A I, Grigoriev V M and Yakovlev G F. 1983. Studies of Mineral deposits [M]. Moscow : Mir Publishers. 50-55.
- Sullivan G V and Llewellyn T O. 1981. Occurrence and recovery of rutile from western copper mill tailings [M]. Society of Mining Engineers Preprint. 81-33, 7p.
- Thompson J V. 1987. Titanium resource in Colorado equals all other U. S. deposits [J]. *Engineering and Mining Journal*, 188 : 37-30.
- Turner R. 1986. Brazilian titanium [J]. *Engineering and Mining Journal*, 187 : 40-42.
- Ulbrich H H G J and Gomes C B. 1981. Alkaline rocks from continental Brazil [J]. *Earth Science Review*, 17 : 135-154.
- Wang D Z, Zhang Z M, Shen K and Zhao X D. 2006. Origin of Ti-rich eclogite and rutile deposit in the Donghai area of the southern Sulu UHP metamorphic belt, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(7) : 839 : 849 (in Chinese with English abstract).
- Wang P, Pan Z L and Weng L B. 1982. Systematic mineralogy (Vol. 1) [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-66 (in Chinese).
- Xia X H, Yan F and Zhao Y H. 2007. Genetic type and its deposit characters of rutile minerals in China [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 29(3) : 185-192 (in Chinese with English abstract).
- Xu S K. 2001. Genetic types of rutile deposits and metallogenic belts of China [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(1) : 11-18 (in Chinese with English abstract).
- Xu S K, Li B Y, Chen J Z, Shang H W, Chen Y H, Cheng S H and Liu Z S. 1997. Relation of metamorphic regime of the Bamiao-Qingshan rutile deposit [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 19(2) : 93-98. (in Chinese with English abstract).
- Yan Z Y. 1991. Geology and classification of ore types of the Bamiao rutile deposit, Xixia district [J]. *Henan Geology*, 9(1) : 1-8 (in Chinese).
- Yu J J, Chen Z Y, Wang P A, Li X F, Huang J P and Wang H. 2006. Trace elements geochemistry of eclogites in the northern Jiangsu province, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7) : 1883-1890 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B H, Liu Y S, Zong K Q and Gao S. 2006. Geochemical behavior of trace elements during retrograde metamorphism of eclogites : Study on the retrograde eclogites from the CCSD main hole [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7) : 1833-1844.
- Zhang Y B. 1996. Rock types of rutile-bearing layers in Xixia district, Henan, with constraint on their genetic conditions [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18(1) : 39-46 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M and Wu L S. 2004. Metallogeny of the major ore deposits in China [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 13-62 (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).

附中文参考文献

- 程振香. 1990. 江苏东海榴辉岩型金红石矿床基本特征 [J]. *矿床地质*, 9(1) : 86-90.
- 丁悌平, 蒋少涌, 万德芳, 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 刘志坚, 姚晓梅. 1994. 硅同位素地球化学 [M]. 北京 : 地质出版社. 1-102.
- 贾琇明, 李胜荣, 岳来群, 张彪. 2006. 山西代县碾子沟金红石矿床地质特征及经济意义研究 [J]. *地质与勘探*, 42(6) : 42-46.
- 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 胡建, 张晓琳, 倪培. 2006. 中国大陆科学钻探主孔高钛与低钛榴辉岩地球化学特征对比及其金红石成矿的指示意义 [J]. *岩石学报*, 22(7) : 1875-1882.
- 沈永和. 1986. 山西省地质矿产资源 [M]. 北京 : 地质出版社. 247页.
- 王大志, 张泽明, 沈昆, 赵旭东. 2006. 南苏鲁超高压变质带东海地区富钛榴辉岩 [J]. *地质通报*, 25(7) : 839-849.
- 王濮, 潘兆麟, 翁玲宝等. 1982. 系统矿物学(上册) [M]. 北京 : 地质出版社. 1-666.
- 夏学惠, 闫飞, 赵玉梅. 2007. 中国金红石矿床地质及成因类型 [J]. *化工矿产地质*, 29(3) : 185-192.
- 徐少康. 2001. 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, 李博钧, 程建祖, 商和文, 陈义海, 陈淑华, 刘振山. 1997. 八庙-青山金红石矿床变质条件与成矿的关系研究 [J]. *化工矿产地质*, 19(2) : 93-98.
- 阎中英. 1991. 西峡八庙金红石地质特征及矿石自然类型划分 [J]. *河南地质*, 9(1) : 1-8.
- 余金杰, 陈振宇, 王平安, 李晓峰, 黄建平, 王辉. 2006. 苏北榴辉岩中金红石的微量元素地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 22(7) : 1883-1890.
- 张斌辉, 刘勇胜, 宗克清, 高山. 2006. 榴辉岩退变质过程中的微量元素地球化学行为 : 对 CCSD 主孔退变质榴辉岩的研究 [J]. *岩石学报*, 22(7) : 1833-1844.
- 张银波. 1996. 河南省西峡地区金红石含矿层岩石组合特征及其形成环境 [J]. *化工矿产地质*, 18(1) : 39-46.
- 赵一鸣, 吴良士. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律 [M]. 北京 : 地质出版社. 13-62.
- 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.