

doi: 10.12029/gc20200305

丁建华, 张勇, 李立兴, 李厚民. 2020. 中国钛矿成矿地质特征与资源潜力评价[J]. 中国地质, 47(3): 627–644.

Ding Jianhua, Zhang Yong, Li Lixing, Li Houmin. 2020. Metallogenic geological characteristics and titanium resources potential in China[J]. Geology in China, 47(3):627–644 (in Chinese with English abstract).

中国钛矿成矿地质特征与资源潜力评价

丁建华, 张勇, 李立兴, 李厚民

(中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要: 钛金属因其性能特殊和用途广泛而被称之为“第三金属”。中国钛矿资源丰富, 占世界总资源储量的 24.46%, 但多为含钛量偏低的原生矿, 高品位优质钛矿的需求只能通过进口来满足, 导致中国钛的对外依存度偏高, 为此, 需要进一步总结规律, 分析潜力, 为今后地质找矿工作提供借鉴。本文根据中国钛矿的成矿特征, 将钛矿划分为岩浆型、变质型、风化型和(第四纪)沉积型 4 种类型。其中, 岩浆型矿床主要为岩浆分异作用形成的钛铁矿–磁铁矿(钛磁铁矿), 分布较广, 主要集中于攀西地区近 SN 向基性–超基性岩带和华北地台北缘近 EW 向基性–超基性岩带; 变质型矿床与区域变质作用关系密切, 较为重要的是榴辉岩(榴闪岩)型金红石矿床, 主要受控于高压/超高压变质带; 风化型矿床受控于富 Ti 原岩和高温多雨的气候环境, 多产于湿热的云南和广西; 滨海沉积型矿床则沿海分布, 主要分布在海南岛的东岸。本次钛矿资源潜力评价工作在全面总结全国钛矿成矿规律的基础上, 圈定 111 个 3 级预测区并估算资源潜力, 包括 A 类预测区 22 个, B 类预测区 27 个, C 类预测区 62 个; 笔者最后优选了 12 个预测区并进行了详细评价, 建议做为今后钛矿的找矿部署优先考虑的重点远景区。

关键词: 钛矿; 成矿规律; 资源潜力评价; 中国

中图分类号: P618.47 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2020)03–0627–18

Metallogenic geological characteristics and titanium resources potential in China

DING Jianhua, ZHANG Yong, LI Lixing, LI Houmin

(Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: Titanium is known as “the third metal” for its special characteristics and wide range of uses. China is rich in titanium resources, which account for 24.46% of the world's total reserves. As most of China's titanium resources are low-grade primary ores, China has to import high-grade and high-quality ores to meet its demand. Hence, further geological metallogenic studies of titanium resource potential are urgently needed so as to provide a reference for future geological prospecting work. In this paper, Ti deposits are classified into 4 types, i.e., magmatic type, metamorphic type, weathering type and (Quaternary) sedimentary type. The magmatic type Ti deposits were formed by magmatic differentiation and are widely distributed. The most important ore deposits are mainly concentrated in Panxi ultrabasic rock belt and northern margin of the North China platform basic–ultrabasic rock belt. Metamorphic type Ti deposits are closely related to regional metamorphism. The important ore deposits are eclogite type (garnet–

收稿日期: 2020–02–05; 改回日期: 2020–04–13

基金项目: 中国地质调查局项目“全国矿产资源潜力动态评价(2019–2021)”(DD0190193)资助。

作者简介: 丁建华, 女, 1969 年生, 博士, 教授级高级工程师, 矿产普查与勘探专业, 主要从事矿产资源潜力评价研究;

E-mail: dingzhazhan@163.com。

amphibolite type) rutile deposits, which are controlled by HP/UHP metamorphic zones. Weathering Ti deposits are controlled by Ti-rich original rock and hot rainy weather and are mostly distributed in Yunnan and Guangxi. Littoral sedimentary placer deposits are distributed along the east coast, especially in the east coast of Hainan Island. During the prediction of this type of Ti resources, the authors delineated 111 prospective areas and predicted the resource potential according to comprehensive summary of titanium resource ore-forming regularities. These prospective areas include 22 class A ones, 27 class B ones and 62 class C ones. Finally, the authors sorted out 12 prospecting areas with better metallogenic geological conditions for the future prospecting work.

Key words: titanium; metallogenic regularity; mineral resource potential prognosis; China

About the first author: DING Jianhua, female, born in 1969, doctor, senior engineer, engages in regional geological survey; E-mail: dingzhanzhan@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project "Dynamic Assessment of Mineral Resources in China (2019—2020)" (No. DD0190193).

1 引 言

钛(Ti)金属因具有重量轻、强度高、耐腐蚀、耐高温、耐高压等性能,被广泛应用于航空航天、化工工业、航海、合金管材以及医学领域等,因其性能特殊和用途广泛,被称之为“第三金属”(曹谏非, 1996)。钛矿物种类繁多,地壳中含钛1%以上的矿物有80多种(吴贤等, 2006),工业利用的主要是金红石和钛铁矿,其次为锐钛矿、板钛矿和白钛石,其他还有红钛铁矿、钛磁铁矿、钛铁晶石、镁钛矿、红锰钛矿、钙钛矿、假板钛矿、钙铈钛矿、黑钛石、榍石等。

据美国地质调查局(USGS)“Mineral Commodity Summaries 2019”(U.S. Geological Survey, 2019)统计,世界钛矿资源量总计为20亿t(TiO_2),主要分布于澳大利亚(储量占比29.68%),其次为中国(24.46%)、印度(9.83%)、南非(7.59%)、肯尼亚(7.13%)等。钛矿资源中钛铁矿占了资源总量的89%,其余为金红石和锐钛矿。

金红石和锐钛矿几乎由纯的 TiO_2 组成的,是生产高端钛材的优质原材料。由于中国金红石在全国钛矿资源中仅占3%,导致钛矿资源的利用一直处于“低端钛矿供大于求,高端钛矿依赖于进口”的状态。近年来,随着市场对高端钛材需求的不断增加,中国优质钛矿原材料的对外依存度也不断增加。为了摸清全国钛矿的潜在资源的状况,项目组开展了钛矿的资源潜力分析与评价,旨在为科学部署找矿评价工作,乃至缓解优质钛矿资源危机提供参考。

2 中国钛矿资源特点

2.1 矿产地与分布

中国现已发现钛矿产地(矿床、矿点、矿化点)430余处(含伴生矿),分布在27个省(市、自治区)(图1),其中探明储量的333处,包括大型及大型以上59处(表1)。

根据《中国矿产资源报告2018》(中国自然资源部, 2019),中国共有25个省(市、自治区)有钛矿的查明资源储量(图2),共计(TiO_2)8.26亿t。仅四川一个省,查明储量占了全国总量的近76%,类型主要为岩浆型钛磁铁矿。其次为云南、山东和河北,查明储量分别占全国总量的13.97%、12.06%和10.25%。

2.2 中国钛矿的资源禀赋

中国钛资源储量虽然很丰富,但由于资源禀赋不太好,实际可利用的较少。

(1)钛铁矿多,金红石矿少。相比于 TiO_2 含量53%的钛铁矿,金红石就是较纯的 TiO_2 , TiO_2 的含量在95%以上,可利用性更高。中国钛铁矿型资源占到国内总量的97.34%,金红石型钛矿资源则严重不足,仅占2.66%。

(2)原生矿多,砂矿少。砂矿由于是松散堆积、埋藏浅、不需破碎加工而具有更大的经济意义。在中国已探明的钛资源中,金红石砂矿仅占金红石资源的14%,钛铁矿砂矿在钛铁矿资源中的占比更是少到3%。

(3)贫矿多,富矿少。与国外相比,中国钛矿资源的品位普遍偏低。以加拿大为例,产于魁北克省的乌尔宾钛矿床, TiO_2 的品位达35%,其含钛低的钽

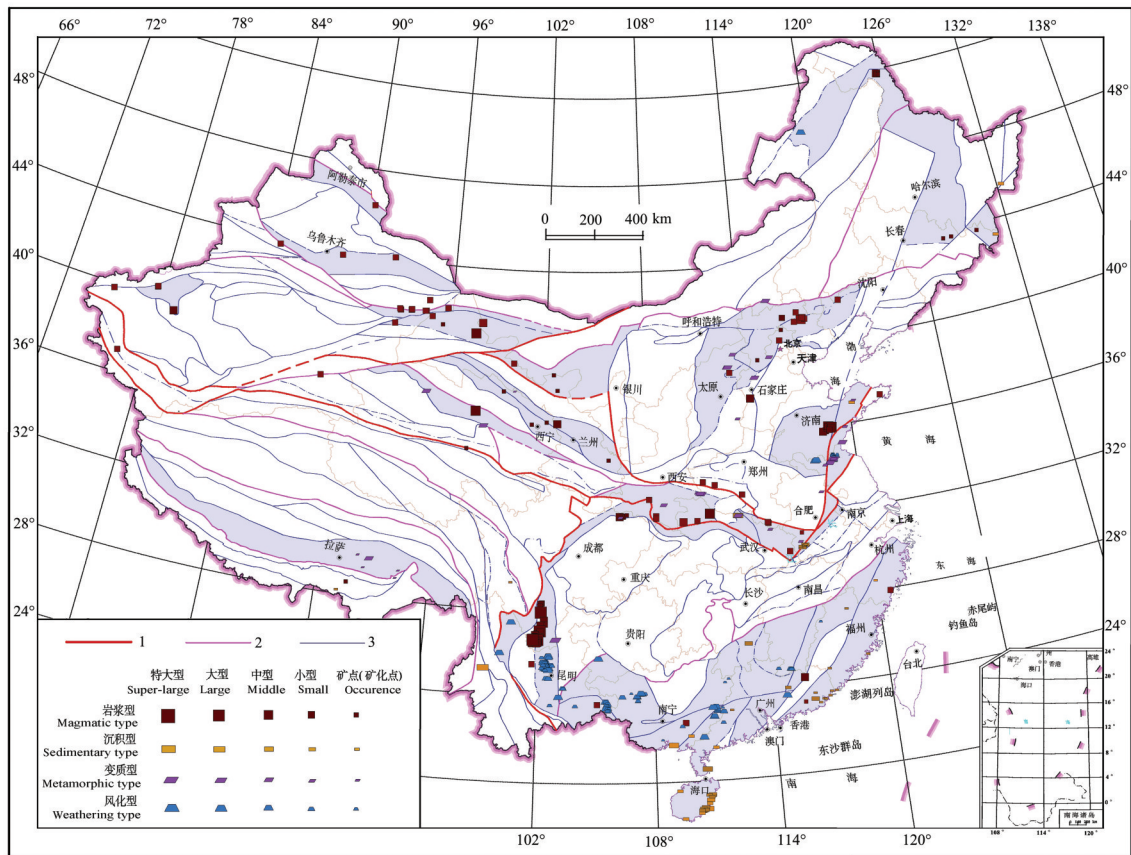


图1 中国钛矿床分布图

1—成矿域界线;2—成矿省界线;3—Ⅲ级成矿区(带)界线

Fig.1 Distribution of Ti deposits in China

1—Metallogenic domain; 2—Metallogenic province; 3—Metallogenic belt

钛磁铁矿的平均品位也达10%;又如,美国散弗德湖钛磁铁矿的品位为9.5%~30%,特雷尔里奇海滨砂矿的品位为20%;俄罗斯钛铁矿的品位一般也在5%~15%。而中国钛铁矿平均品位一般为5%~10%;金红石平均品位一般为1%~5%,多在1%~2%。

(4)无单一钛矿,共伴生矿(物)种类多。中国至今尚未发现单一的钛矿矿床,均为多金属共生矿。钒钛磁铁矿除含有大量的铁、钛、钒以外,尚伴生有极其丰富的钴、镍、铜、铬、镓、锰、铌、钽、钨、硒、碲、硫等元素,金红石矿常常伴生有钛铁矿、透闪石、锆英石、磷灰石、石榴子石以及铌、钽等稀有元素等矿产。虽然这些共伴生矿种有相当大的综合利用价值,然而,矿物的分选难度大,回收率低,生产成本低,资源综合利用率太低。

综上所述,中国钛资源总的特点为储量、分布广,多为含钛量偏低的原生矿,均伴生有众多的伴生矿种,加之受中国钛矿提纯技术制约,综合利

用率很低,生产出来的钛精矿品位不能满足需要,因此,高品位优质钛矿的需求只能通过进口来满足,导致中国的钛矿资源的对外依存度高达40%。

3 中国钛矿的成矿规律

3.1 矿床类型与产出特征

不同学者对钛矿床的成因类型提出过不同的划分方案,但相差不大,如斯米尔诺夫等根据成因将钛矿划分为岩浆型冲积-坡积型、海滨砂矿型、火山沉积型、风化型和变质型;沃尔弗松等划分为岩浆型、砂矿型、火山沉积型、风化壳型和变质型;刘兰笙等(1996)划分为岩浆型、变质型、风化型和砂矿型。由于砂矿从成因类型上划分,应隶属于第四纪沉积矿产,本次预测工作将钛矿床类型划分为岩浆型矿床、风化型矿床、变质型矿床和沉积型矿床4类。

3.1.1 岩浆型钛矿床

岩浆型钛矿床是中国最重要的钛矿类型,此类

表1 全国钛矿大型及以上矿床

Table 1 Large and superlarge Ti deposits in China

序号	矿产地名称	市县	主矿种	规模	矿床类型	成矿时代	平均品位
1	米易白马	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	超大型	岩浆型	晚二叠世	4.95%
2	攀枝花	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	超大型	岩浆型	晚二叠世	10.52%
3	红格	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	超大型	岩浆型	晚二叠世	10.56%
4	太和	四川凉山州	钒钛磁铁矿	超大型	岩浆型	晚二叠世	5%
5	干红沟	四川凉山州	金红石	超大型	变质型	中元古代	4.38%
6	蒋马	江苏新沂市	金红石	超大型	变质型	三叠纪	2.25%
7	板桥	云南隆阳区	钛铁矿	超大型	沉积型	新近纪	12.04 kg/m ³
8	会理白草	四川凉山州	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	11.80%
9	会理秀水河	四川凉山州	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	11.11%
10	潘家田	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	10.86%
11	安宁村	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	9.29%
12	务本	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	5.28%
14	中干沟	四川攀枝花市	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	晚二叠世	12.14%
15	霞岚	广东兴宁市	钒钛磁铁矿	大型	岩浆型	早侏罗世	6.08%
16	腊坪	云南洱源县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	55.55 kg/m ³
17	东村	云南富民县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	75.06 kg/m ³
18	大营	云南富民县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	9.36 kg/m ³
19	牛场	云南富宁县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	62.5 kg/m ³
20	玉莫	云南广南县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	50.09kg/m ³
21	盘江	云南建水县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	114.25kg/m ³
22	干海子	云南禄劝县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	56.76 kg/m ³
23	团街	云南禄劝县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	44.52 kg/m ³
24	洒普山	云南禄劝县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	55 kg/m ³
25	培德	云南宁蒗县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	97.5 kg/m ³
26	清水塘	云南五华区	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	48.31 kg/m ³
27	马头山(朱古矿段)	江苏铜山县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	80.69 kg/m ³
28	坡贯	广西巴马县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	43.4 kg/m ³
29	糯洞	广西岑溪市	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	31.25 kg/m ³
30	官井	广西合浦县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	21.69 kg/m ³
31	塘村	广西藤县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	42.62 kg/m ³
32	东胜	广西藤县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	32.97 kg/m ³
33	平定	广东化州市	钛磁铁矿	大型	风化型	第四纪	31.5 kg/m ³
34	柳尾	广东徐闻县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	5.3 kg/m ³
35	临江	广东紫金县	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	36.08 kg/m ³
36	银洞山	湖北丹江口市	钛磁铁矿	大型	岩浆型	侏罗-白垩纪	5.69%
37	梅子箐	云南武定县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	66.98 kg/m ³
38	郝湖	江苏新沂市	金红石	大型	变质型	三叠纪	2.81 kg/m ³
39	红土田	云南武定县	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	61.79 kg/m ³
40	毛北	江苏东海县	金红石	大型	变质型	三叠纪	3.39%
41	小焦	江苏新沂市	金红石	大型	变质型	三叠纪	2.81%
42	燕子埠(茅寺矿段)	江苏邳州市	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	97.08 kg/m ³
43	大阜山	湖北枣阳市	金红石	大型	变质型	三叠纪	2.32%
44	鱼卡镇	青海大柴旦镇	金红石	大型	变质型	早古生代	2.58%
45	高特拉蒙	青海德林哈市	钛磷矿	大型	岩浆型	晚古生代	5.22%
46	丁叉叉山南坡	青海乌兰县	金红石	大型	变质型	早古生代	1.43%
47	洪塘-羊廷寺	山西代县	钛铁矿	大型	岩浆型	太古代	1.97%
48	碾子沟	山西代县	金红石	大型	变质型	中元古代	1.92%
49	磨石山	内蒙古正蓝旗	锐钛矿	大型	变质型	中元古代	6.91%
50	嘎罗索	内蒙陈巴尔虎旗	钛铁矿	大型	风化型	第四纪	42.38 kg/m ³
51	青山-新庙	陕西商南县	金红石	大型	变质型	二叠纪	1.91%
52	柏树岗-五间房	河南方城县	金红石	大型	变质型	中元古代	2.22%
53	官山	山东日照市	金红石	大型	变质型	古元古代	1.72%
54	色如朗	西藏工布江达县	金红石	大型	变质型	始新统	-
55	红柳疙瘩	甘肃肃北县	钛铁矿	大型	岩浆型	志留纪	6.49%
56	沙子镇	贵州晴隆县	锐钛矿	大型	风化型	第四纪	4.39%
57	保定海	海南万宁市	钛铁矿	大型	沉积型	第四纪	33.5 kg/m ³
58	杨砂侯-南孝墓	河北曲阳县	金红石	大型	变质型	中元古代	5.23%
59	杨庄	山东临沂莒县	金红石	大型	变质型	古元古代	1.47%

矿床的查明钛资源储量占了全国总量的88.3%。

岩浆型钛矿是由岩浆分异作用形成的钛铁矿-磁铁矿(钛磁铁矿),在空间与成因上主要与基性岩关系密切,少数与碱性杂岩有关,矿体直接产于岩体内。岩浆型钛矿的成矿母岩为镁铁质、超镁铁质岩,其岩浆来自上地幔,因此,矿床绝大多数产于隆起区边缘的深断裂带所派生的次级断裂及其附近,且在区域上往往呈线状分布。如:中国最重要的钒钛磁铁矿成矿带攀西成矿带,EW长300 km,东西宽10~15 km(张成江等,2009;邢长明等,2012;武斌等,2012),带内自北向南分布着太和、白马、攀枝花、红格4个大矿区、26个矿床或矿段。又如华北陆块北缘的赤城—承德—北票EW向基性岩、超基性岩带(王国灿等,1992;陈安国等,1996),东西长约200 km,南北宽10~30 km,带内有大庙、高寺台、大洼、龙潭沟、马营等矿床(点)20余处。

岩浆型钛矿床在各个时代均有成矿,集中于二叠纪及中元古代两个时期。主要分布于四川攀西及河北大庙等地,如四川攀枝花、红格钒钛磁铁矿。

形成岩浆型钛矿的侵入体主要是基性—超基性杂岩体,如:辉长岩杂岩体、非造山碱性辉长岩体、橄榄辉长岩体等;其次是斜长岩杂岩体;一些辉石角闪石岩体、角闪石岩体等,可以形成超贫的钛铁矿。成矿岩体一般具有很好的分异,可形成多个岩相带。成矿作用主要为结晶分异作用和岩浆熔离作用(张招崇等,2014)。

如攀枝花式钒钛磁铁矿,成矿侵入体为辉长岩杂岩体,成矿岩体分异良好、韵律结构发育,自上而下可分为5个岩带:中细粒角闪辉长岩带、上部中细粒辉长岩带、中部暗色中粒辉长岩带、下部中粗粒辉长岩带以及底部边缘细粒辉长岩带,每个韵律层自下而上其基性程度逐渐降低,含矿层(体)分别赋存在各分异次级韵律层的下部,矿体也是层状岩体的组成部分。成矿作用表现为起源于上地幔(Zhang et al., 2009)的富铁钛的玄武质母岩浆(Hou et al., 2012; Song et al., 2013)多次脉动式侵入补充,每次都因分异作用而产生底部为钒钛磁铁矿上部为基性岩浆的侵入旋回(宋谢炎等,2018)。分异作用愈彻底,含矿组分就愈富集。

再如大庙式钒钛磁铁矿,成矿岩体为斜长岩杂岩体,杂岩体又可分为斜长岩带、苏长岩带和纹长二

长岩带,矿化类型有两种,一种为产于矿化苏长岩中浸染状矿石,占查明铁矿石量的约70%;另一种为产于钠黝帘石化的斜长岩体中的铁矿脉和透镜体,矿体与斜长岩接触界线截然,这类矿化占了查明铁矿石量的30%(Li et al., 2014)。成矿作用表现为两种,一种是岩浆结晶分异作用产生的浸染状矿化,一种为岩浆熔离作用形成的铁矿浆沿裂隙侵入到已固结的斜长岩中。

3.1.2 风化(壳)型钛矿床

风化型钛矿床是由于风化作用使得原生钛矿床的矿石结构发生松散,导致部分脉石矿物发生变化,矿石矿物钛铁矿、金红石作为风化残余物留在原地而成矿,中国该类矿床的查明资源储量占比为6.5%。此类矿床的特点是:矿床多产在那些含矿岩体顶部的风化壳中,矿床分布范围与岩体风化壳范围基本一致,地域分布十分明显,往往几个矿床在同一地质构造单元内成群分布形成矿集区;矿体呈层状、似层状,产状与地形起伏变化一致,有平缓坡度的地形更利于本类矿床的形成;矿床的规模、品位、面积、厚度,与其红土化的彻底程度密切相关,地表红土化愈彻底,有用矿物解离愈好,残留岩屑也愈少;成矿明显受时代控制,中国的风化壳型钛矿床均为第四纪风化作用的产物;此类矿床矿物成分与原生矿床基本相同,但因好采易选而具有良好的可利用性。典型矿床如:江苏的燕子埠、马头山钛铁矿,广西的糯洞、东胜钛铁矿,江苏东海的金红石矿等。

3.1.3 变质型钛矿床

变质型钛矿床的矿物成分以及TiO₂含量的高低受变质原岩的成分以及变质程度的高低影响很大,在高级变质的榴辉岩相中,钛的氧化物只以金红石形式存在,在中高级变质的麻粒岩相、角闪岩相中,会出现金红石与钛铁矿等共生,有的矿床会出现锐钛矿;在中低级变质的绿片岩相,Ti更集中于黑云母和榴石中。变质型钛矿床(尤其是金红石矿)的形成往往与高压/超高压的变质作用有关,这类变质作用主要发生在造山带以及汇聚板块边缘的边缘。元素Ti的化学性质比较惰性,在交代和变质作用中迁移很少,即使在高级变质作用过程中,其迁移活动的数量也有限,往往只表现为就近重新组合生成新矿物或产生矿物相变,因此,变质

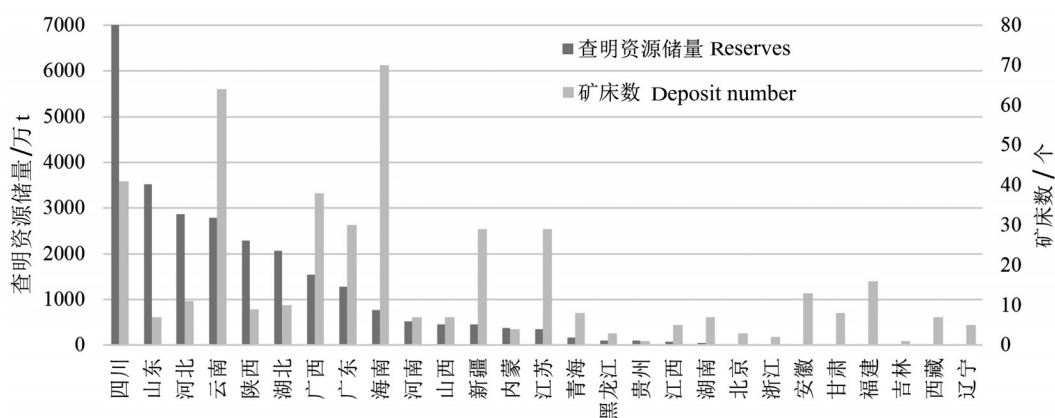


图2 中国钛资源分省分布图

Fig. 2 Distribution of Ti resources in different provinces

型钛矿的Ti的主要来源是来自原岩。因此,赵一鸣等(2008)根据原岩及其变质程度的不同,进一步将此类矿床细分为榴辉岩型、角闪岩型、变质(粉)砂岩型和变质铝硅酸盐岩型4个亚类型。榴辉岩型如产于苏鲁造山带的江苏毛北、小焦等金红石矿,角闪岩型如山西代县碾子沟、陕西商南新庙等金红石矿;变质(粉)砂岩型也称沉积变质型,如内蒙正蓝旗磨石山锐钛矿;变质铝硅酸盐岩型钛矿床的原岩常为火山岩,此类矿床如山西左泉中庄、陕西安康大河、河北涞水龙安等金红石矿。中国此类矿床的查明资源储量占比为2.9%。

3.1.4 沉积型钛矿床

沉积型钛矿床均为第四纪沉积型砂矿。在中国主要以滨海沉积型为主,该类矿床主要分布在东南沿海一带,尤其是海南省的东海岸,滨(浅)海沉积型砂矿的分布范围一般从岸线到距离海岸5~10 km的范围,是海砂的主要富集区,水下则延伸至70 m等深线或更深处,连续沉积面积从数十到数百平方千米,典型矿床如:海南保定海钛铁矿、广东柳尾钛铁矿。其次为河流冲积类砂矿,此类矿床的形成需要具备以下几个基本条件:①有钛源区,即有原生岩矿的产出区;②从矿源区出发具有放射状的排水系统;③排水盆地源头有来自源岩的沉积物,只要满足上述3个条件,在各种地质环境下均有可能形成;矿体多呈似层状、透镜状,产状水平,埋深较浅,通常1~8 m,矿物成分主要为石英、黏土矿物、斜长石、黑云母、独居石、钛铁矿、锆英石、石榴石、榍石、镁钛矿及岩屑等等;典型矿床如:云南板桥钛铁矿、安徽刘羊

河金红石砂矿、黑龙江金银库钛铁砂矿等。

从全球范围的统计数据看,本类矿产是钛矿产的重要类型,然而中国的河流冲积型钛矿储量并不是很大,仅占了全国查明资源储量的2.3%。

3.2 钛矿的时间分布规律

中国钛矿的在各个时期均有成矿(图3),其中最主要的成矿期为二叠纪,矿产地数占比为13%,但查明资源储量却占了总量的86.48%,矿床主要为岩浆型钒钛磁铁矿,且大型—超大型矿床较多,位于峨眉山大火成岩省中部著名的攀西钒钛磁铁矿带即属于这一成矿期;其次为元古宙,矿床数占比为5.88%,查明资源量占比为6.71%,矿床类型即有岩浆型钛磁铁矿,如河北大庙钒钛磁铁矿,也有变质型金红石矿,如河北杨砂侯金红石矿。图中还可以看出,产于第四纪的矿床数很多,约占了总数的63%,然而,储量仅占了查明资源储量的4.68%,产于这个时期的钛矿主要为风化壳型和砂矿型。

3.3 钛矿的空间分布规律

中国钛矿的原生矿主要集中分布于扬子陆块西缘、华北陆块北缘,以及大别—苏鲁、南秦岭、藏南等地区。

与铁镁质基性岩有关的岩浆型钒钛磁铁矿主要与切壳的深大断裂有关,如:著名的攀西钒钛磁铁矿带,即产于康滇隆起区的一系列南北走向的深断裂带;河北大庙地区的钒钛磁铁矿床,产于华北陆块北缘的内蒙古隆起区,受控于崇礼—隆化深大断裂;山东沂水地区的钒钛磁铁矿床,则产于胶东(古元古代)陆缘裂谷胶北陆缘岩浆带。

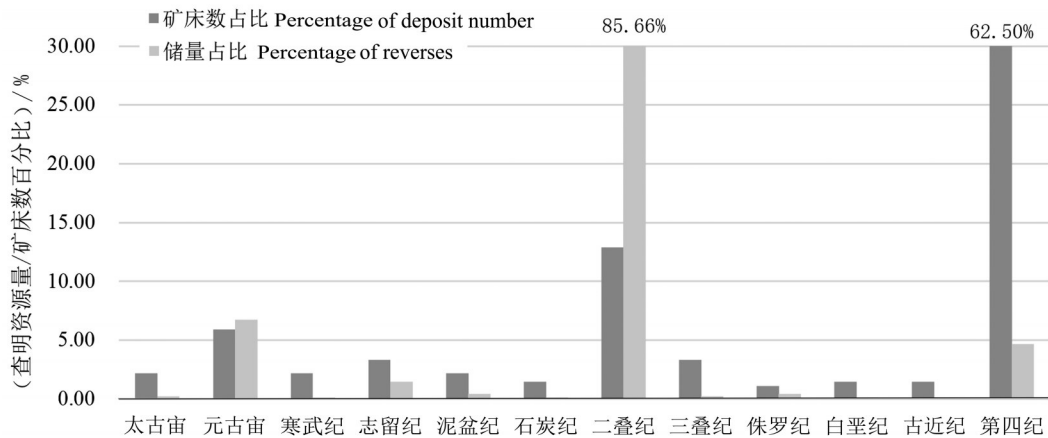


图3 中国钛矿不同时期成矿的矿床数量和储量分布
Fig.3 Statistics of ore-forming ages of Ti deposits

与区域变质作用有关的变质型钛矿主要分布于有古老基底地层出露的地区,如华北地块及其边缘,如:山西的碾子沟金红石矿、内蒙古的磨石山锐钛矿等;在秦岭造山带也有分布,如:陕西商南的青山一新庙金红石矿、河南方城柏树岗金红石矿等;另外在辽东—鲁东一带也有产出,如山东藏各庄金红石矿、辽宁宽甸金红石矿等。

还有一部分变质型钛矿(主要是金红石矿)与高压变质作用关系密切,多分布于造山带及汇聚板块边缘。根据杨经绥等(2009)的研究,中国境内存在着11条高压/超高压变质带(图4),笔者统计发现,这11条超高压变质带几乎均与金红石变质作用成矿有关:①新疆西南天山超高压变质带;②甘肃北山高压变质带;③北阿尔金—北祁连高压变质带,发现了青海小鱼儿沟金红石矿点;④南阿尔金—柴北缘超高压变质带,产有青海鱼卡镇金红石矿、甘肃丁义叉金红石矿;⑤冀北高压变质带,产出矿床如冀北龙关石墨(金红石)矿;⑥北秦岭超高压变质带,如湖北大阜山金红石矿、悟仙山金红石矿等;⑦苏鲁高压/超高压变质带,产有江苏小焦金红石矿、山东官庄金红石矿等;⑧大别高压/超高压变质带,带内有河南杨冲金红石矿、安徽碧溪岭金红石矿等;⑨西藏羌塘高压变质带;⑩西藏松多(超)高压变质带,产有色如朗金红石矿;⑪雅鲁藏布江东构造结南迎巴瓦(超)高压变质带。

风化型钛矿受含矿原岩和高温多雨气候控制,主要分布于中国西南的云南、桂西等地,如云南富宁

牛场钛铁矿、广西梧州糯洞钛铁矿、广东化州平定钛磁铁矿等;其次在苏北、内蒙古等地也有分布,如:江苏徐州的燕子埠、马头山,内蒙古陈巴尔虎旗的嘎罗索等,均为大型的风化壳残坡积型钛铁矿。

沉积型铁矿中,滨海沉积型砂矿主要分布在沿海地带的海南、广东、广西、福建,尤其是海南,沿岛一周均有砂矿床分布,又以琼东的砂矿品质好、规模大;河流冲积型钛砂矿的位置则与原生矿床和现代水系有关,多分布于原生矿下游的冲积扇和阶地,如:云南保山的板桥大型钛铁矿、湖南耒阳上堡金红石矿、广西玉林马其岗钛铁矿、山东平度郑家金红石矿、吉林珲春黄松甸子钛铁矿等。

根据徐志刚等(2008)的成矿区带划分方案,钛矿的成矿区带如图1和表2所示。

4 中国钛矿资源潜力评价

4.1 预测模型

根据不同类型矿床的产出特征,分别总结了4种钛矿床类型的区域预测要素,建立了区域预测模型,见表3~表6。

4.2 预测方法

4.2.1 定位预测

圈定预测区时,分别根据地各类矿床类型的预测要素,提取预测图层,包括:矿产地、基性—超基性岩体、地层、深大断裂、地球化学异常区、重砂异常区等,并对类型的不同预测要素按重要性进行分类(必要要素、重要要素和次要要素),对各预测图

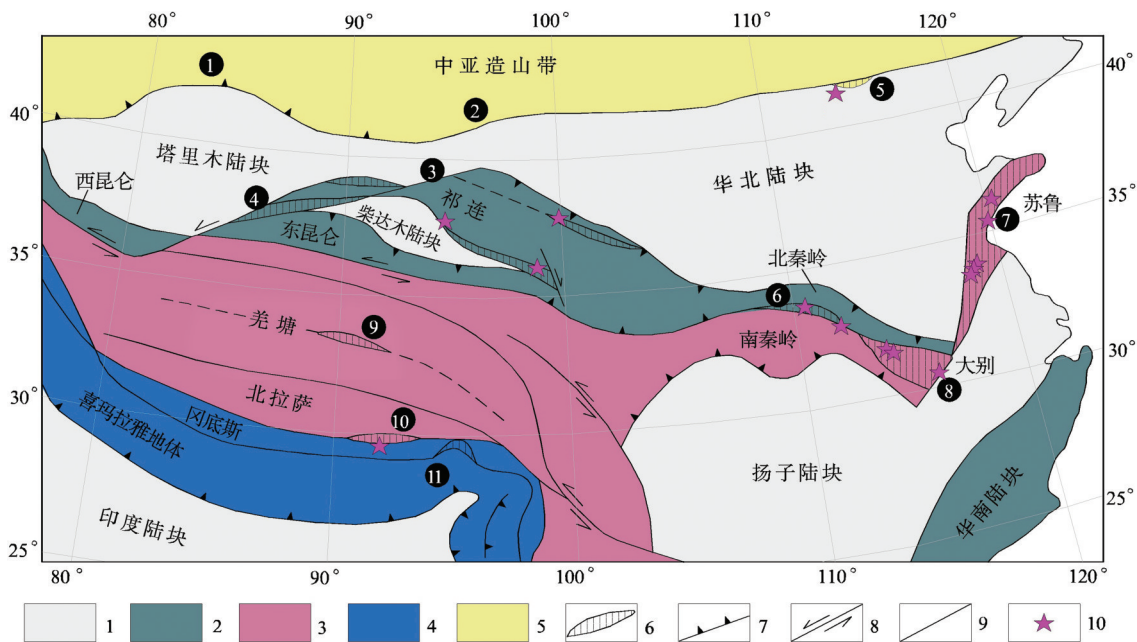


图4 中国主要造山带高压/超高压变质带及金红石矿床(据杨经绥等,2009修改)

1—克拉通;2—早古生代造山带;3—古特提斯造山带;4—新特提斯造山带;5—中亚造山带;6—俯冲/折返杂岩带;7—逆冲断裂;8—走滑断裂;9—缝合带或断裂;10—变质型(榴辉岩或榴闪岩)金红石矿床;①—新疆西南天山超高压变质带;②—甘肃北山高压变质带;③—北祁连—北阿尔金高压变质带;④—柴北缘—南阿尔金超高压变质带;⑤—冀北高压变质带;⑥—北秦岭超高压变质带;⑦—苏鲁高压/超高压变质带;⑧—大别高压/超高压变质带;⑨—西藏羌塘高压变质带;⑩—西藏松多(超)高压变质带;⑪—雅鲁藏布江东构造结南迎巴瓦(超)高压变质带

Fig.4 Distribution of HP-UHP metamorphic belts and rutile deposits(after Yang Jingsui et al., 2009)

1-Craton; 2-Early Paleozoic orogenic belt; 3-Paleo-Tethys orogenic belt; 4-Neo-Tethys orogenic belt; 5-Central Asian orogenic belt; 6-Subduction/exhumation complex zone; 7-Thrust fault; 8-Strike-slip fault; 9-Structure belt or fault; 10-Metamorphic rutile deposit; ①-Southwest Tianshan UHPM belt in Xinjiang; ②-Beishan HPM belt in Gansu; ③-North Qilian-North Altun HPM belt; ④-North Qaidam-South Altun UHPM belt; ⑤-Jibe HPM belt in Hebei; ⑥-North Qinling UHPM belt; ⑦-Sulu HP-UHP belt; ⑧-Dabie HP-UHPM belt; ⑨-Tibet Qiangtang HPM belt; ⑩-Tibet Sumdo (U)HPM belt; ⑪-Namche Barwa (U)HP belt, East Himalayan syntaxis

层进行叠加分析,同时运用特征分析法运算出不同块体的特征值,根据综合预测要素与典型模型区的符合程度,筛选并圈定出不同钛矿类型的预测区。

4.2.2 定量预测

定量预测以体积法为主,根据构造背景不同,每个找矿带选择一个勘查相对成熟的区做为模型区,用以计算含矿系数,运用证据权法估算预测区与模型区之间的相似性,获得相似系数,根据相似类比原理来推算其他预测区资源潜力,同时运用品位-吨位模型法来估算每个找矿带的潜在资源总量,将两类结果进行校验和调整,最终得出每个预测区的预测资源量值。

其中,预测深度的确定依据,一个是已知矿床的矿体埋深,另一个是地球物理数据的反演结果,如:岩浆型钒钛磁铁矿床的矿体特征常表现为产于岩体下部、多层成矿等,攀西地区岩浆型钒钛磁铁

矿带内地球物理反演结果显示,区内赋矿岩盆的埋深为980~2120 m,为此,将该类型矿产的预测深度定为2000 m;又如,风化壳型矿床,中国已知矿床数据中,矿体埋深最大的是云南玉莫钛铁矿的93 m,国外同类型矿床如巴西的Tapira矿床,风化残余物的厚度可达200 m(Turner, 1986),据此,本次预测将该类型矿床的预测深度定为200 m。

4.2.3 可利用性分析

潜在资源的可利用性分析,主要是基于目前区域内已知矿床的资源禀赋、选冶技术条件、环境约束情况等,定性分析预测区内潜在资源一旦转换为查明资源时,能够被利用的可能性。可利用资源量的确定原则包括:

(1) 与功能区的叠合程度。如:与国家级自然保护区重叠的预测区,定为暂时不可利用。

(2) 已知矿床的预测深度或国内国际同类矿床

表2 中国钛矿主要成矿区带及其代表性矿床

Table 2 Main Ti metallogenic belts and representative deposits in China

成矿域	成矿省	III级成矿区带	代表性钛矿床	主要矿床类型
I-1 古亚洲成矿域	II-2 准噶尔成矿省	III-6 准噶尔南缘成矿带	新疆锅底山、阿克喀巴克东、乌兰沙特南、新地沟	岩浆型
		III-12-1 卡瓦布拉克—星星峡—旱山成矿亚带	新疆尾亚、尾亚东、雅西库东、库姆塔格沙垅西、路白山	
	II-4 塔里木成矿省	III-13-1 柯坪成矿亚区 III-14-1 公婆泉(甘蒙北山南部)成矿亚带	新疆普昌、瓦吉里塔格、皮羌 甘肃红柳疙瘩、小红山、花西滩	岩浆型
I-2 秦祁昆成矿域	II-5 阿尔金—祁连成矿省	III-21 阿尔金成矿带 III-22 中祁连成矿带	青海大滩、小鱼儿沟、高家峡 岗敦休玛、浪麻台掌、河达南山	岩浆型、变质型
	II-6 昆仑成矿省	III-24 柴达木北缘成矿带	鱼卡镇、高特拉蒙、丁义又南坡、王家琪、那日托	岩浆型、变质型
I-3 特提斯成矿域	II-9 喀拉昆仑—三江成矿省	III-39 保山(地块)成矿带	板桥、卓潘、忙蚌	岩浆型、沉积型(砂矿)
	II-10 冈底斯—腾冲成矿省	III-43 拉萨地块(冈底斯岩浆弧)成矿带	错拉、色如朗、粗麦、来果桥、布久乡	变质型
I-4 滨太平洋成矿域	II-12 大兴安岭成矿省	III-47-2 陈巴尔虎旗—根河成矿亚带	嘎罗索	风化型
		III-48-1 多宝山—黑河成矿亚带	北西里、跃铁山、兴隆沟	岩浆型
	II-13 吉黑成矿省	III-52 小兴安岭—张广才岭(造山带)成矿带	南城子、宣羊砬子、青林子	岩浆型、沉积型(砂矿)
		III-18 阿拉善(隆起)成矿带	板打沟、板凳沟、野苕里、大口子	岩浆型
		III-57 华北陆块北缘东段成矿带	黑山、大庙东沟、乌龙素沟、平顶山、昌平上庄、姜家沟	变质型、岩浆型
	II-14 华北陆块成矿省	III-61 山西(断隆)成矿带	洪塘、羊廷寺、碾子沟、黑山沟、桐峪、北山峪、西头	岩浆型、变质型
		III-64 鲁西(含淮北)断隆成矿带	马头山、燕子埠、上峪、肖家沟、秦家庄	岩浆型、变质型、沉积型
		III-65 胶东(次级隆起)成矿带	郑家、南墅	变质型、沉积型
	II-7 秦岭—大别成矿省	III-66-2 南秦岭成矿亚带	大阜山、覃家门、金花寨、银洞山	变质型、沉积型
		III-67 桐柏—大别成矿亚带	河南河西湾、湖北大悟仙山、石鼓冲、江苏毛北、阿湖、山东官山	岩浆型、变质型、沉积型
II-15 扬子成矿省	III-69-3 滁河成矿亚带	安徽刘羊河、黄铺古井、江苏卧儿岗	沉积型	
	III-73-1 龙门山—大巴山(陆缘拗陷)成矿带	四川椿树坪、朱家坡、江家塘、水田坪	岩浆型、变质型	
	III-75-1 盐源—丽江(陆缘拗陷)成矿亚带	云南培德、腊坪	风化型	
	III-76-1 康滇成矿亚带	四川米易、太和、攀枝花、红格, 云南干海子、清水塘、酒普山等	岩浆型、风化型	
	III-80 浙闽粤沿海成矿带	浙江仙岩、福建盘屿、蛟塘, 广东涂洋、林招、宫口、红山、石坑寮、潭西等	沉积型、岩浆型	
II-16 华南成矿省	III-81 浙中—武夷山(隆起)成矿带	福建马元、贵源, 广东霞岚等	岩浆型、风化型、沉积型	
	III-83 南岭成矿带	湖南上堡, 江西大峰脑、赤水, 广西得源、里松盆地	风化型、沉积型	
	III-84 粤中(拗陷)成矿带	广东临江、坂潭河、玄潭河	风化型、沉积型	
	III-85 粤西—桂东南成矿带	广西糯洞、白梅, 广东平定、云致、柳尾	风化型、沉积型	
	III-87 钦州(残海)成矿带	广西官井、东山、潭村、兴旺等	岩浆型、风化型、沉积型	
	III-88 桂西—黔西南—滇东南北部(右江海槽)成矿带	广西龙卧、坡贯、巴月、民安、百伟、六算, 贵州沙子镇等	风化型	
	III-89 滇东南南部成矿带	云南铁拱石坡、麻渣里、牛场、新华坡桑等	风化型、岩浆型	
III-90 海南成矿区	海南保定海、沙老、南港、长安、兴隆、龙山、马岭等	沉积型		

表3 岩浆型钒钛磁铁矿矿床预测要素

Table 3 Prognostic model of magmatic type Ti deposits

预测要素	要素特征描述	要素类别
控岩(矿)构造	大地构造运动在挤压之后的拉张阶段形成的深大断裂(或裂谷)	必要
岩体规模产状	岩体规模要大,且分异良好,韵律结构发育,主要为辉长或闪长岩相	必要
地球物理异常	航磁、地磁异常规模较大、强度大、形态规则	必要
岩体特征	岩浆型钛矿与低硅高钛的基性-超基性岩浆的分异作用关系密切	重要
岩体侵位围岩	最好为碳酸盐岩	重要
岩体产出时代	除喜马拉雅期外的任何一个时期。在华北及东北地区,重点关注前寒武纪和燕山期的基性-超基性岩,西北的阿尔泰、天山、西昆仑重点关注华力西期,在秦祁昆成矿带,重点关注加里东期	重要
岩石化学特征	岩石属铁质基性岩、富铁质超基性岩,镁铁比值(m/f)一般为0.18~1.19,有利于钒钛磁铁矿成矿	次要
化探异常	Fe、Co、Nb、P、Ti、V、Y组合。	次要

表4 变质型钛铁矿、金红石矿床预测要素

Table 4 Prognostic model of metamorphic type Ti deposits

预测要素	要素特征描述	要素类别
大地构造位置	古板块的缝合部位,蚀变带与基性-超基性变质岩的叠加处,即基性变质岩与后期构造热液活动叠加、基性(变质)岩与蚀变岩共同出露处。尤其是秦岭造山带东段、华北地块南缘、扬子地块西北缘及华南造山带	必要
控岩(矿)构造	区域深大断裂并有超基性岩侵入处,与之相伴的褶皱构造的轴部以及两翼是成矿的有利部位	必要
地层	成矿有关地层多为新太古代、元古宙的区域深变质岩系,少量为晚古生代地层。各个时代的地层均遭受了不同程度的变质作用	必要
岩浆岩	热液变质型金红石矿床与低硅、低钛低铁的基性-超基性岩和高硅低钛低铁的中酸性岩关系密切,对于原岩为岩浆岩的矿床为必要条件	必要
变质作用	中高级区域变质作用和超高压变质带的高温高压或低温高压变质作用	必要
地球物理异常	富钛矿石具有较高密度、弱磁性、高极化率、较低电阻的物性特征,因此,物探的磁法和重力,均显示有强-中等的带状异常	重要
化探异常	具有区域性的金红石化探异常靶区	重要

表5 风化型钛矿床预测要素

Table 5 Prognostic model of weathering type Ti deposits

预测要素	要素特征描述	要素类别
大地构造位置	属古板块或断块接触带,超岩石圈深大断裂密集发育,是形成岩浆岩的有利通道;区内构造运动频繁,岩浆岩类型复杂,表明岩浆活动强烈,与之相关的成矿活动强烈	必要
原岩	区域上有大面积的含钛的基性-超基性岩体存在	必要
成矿构造	区域内构造运动和外来地质作用明显,深大切壳断裂是岩浆侵入的通道,小断裂有利于后期热液上升,促进基性-超基性岩蚀变,原岩裂隙、节理发育,有利于提高风化淋滤程度,促进成矿富集	必要
地球物理异常	富钛磁铁矿矿石具有较高的密度和磁性,因此,物探的磁法和重力异常是良好的找矿标志	重要
地形地貌	风化壳往往发育在岩体出露范围内宽大而平坦的剥蚀面或阶地上;在含钛基性侵入岩体附近的小溪缓流处常常形成钛铁矿、磁铁矿的漂砂,而钛铁矿和含钛磁铁矿以其特有的黑色和金属光泽,极易引人注目,成为直接的找矿标志	重要
气候条件	高温多雨气候带、地下水丰富地区	重要

表6 沉积型钛矿床(砂矿)预测要素
Table 6 Prognostic model of Quaternary sedimentary Ti deposits (placers)

预测要素	要素特征描述	要素类别
大地构造位置	滨(浅)海沉积型砂矿的分布范围一般从岸线到距离海岸5~10 km的范围;河流冲积型主要分布于现代水系冲积形成的河谷阶地和河漫滩	必要
含钛原岩	河流上游有大面积的含钛的岩体存在	必要
重砂异常	锆石英、金红石、锐钛矿、白钛矿、独居石、钛铁矿、磁铁矿等的重砂矿物组合异常	重要
地球物理	风化壳中的钛铁矿往往与含钛磁铁矿紧密伴生,且为正相关关系,磁异常的出现也是很好的找矿标志	

的开采深度。如,对于岩浆型矿产,西部地区暂定为800 m以上为可利用,东部地区暂定为1200 m以上可利用;对于风化壳型矿床,一般矿体的埋深为几米至几十米,有的达100~200 m,个别沿裂隙带风化的,深度可以1500 m以上(袁见齐等,1985),据储量库中资料显示,中国境内风化壳型矿床的最大埋深为93 m(广西玉莫钛铁矿),因此,将该种类型钛矿预测深度100 m以浅的预测资源量定为暂时可利用。

(3) 区内已知矿床的选矿工艺。如:内蒙磨石山

沉积变质型锐钛矿,由于含钛矿物嵌布粒度过细,难以与其他矿物充分分离(周桂英等,2013),虽然也有试验表明,可以得到回收率50%以上的锐钛精矿(TiO₂达80%)(王裕先,2009),然而也因成本过高,而导致此类矿床在目前的选矿技术条件下暂时无法利用。

4.3 预测结果

本次钛矿潜力评价共圈定3级预测区111个(图5),其中,A类预测区22个,B类预测区27个,C类预

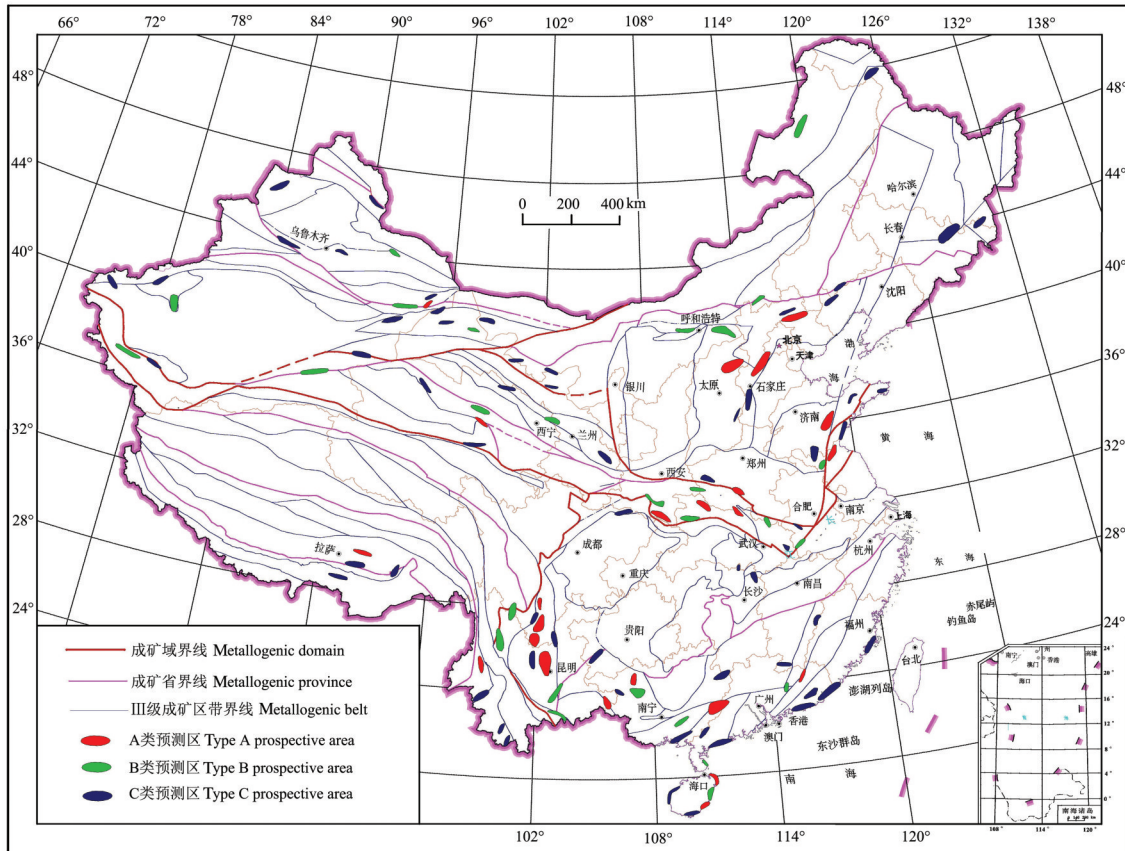


图5 中国钛矿预测区分布图
Fig.5 Distribution of Ti prospecting areas

测区 62 个。共预测了 2000 m 以浅未查明资源量 TiO_2 23.25 亿 t。其中原生钛矿 21.81 亿 t, 砂矿 2.77 亿 t (已按 52% 折算成 TiO_2 的量)。

4.3.1 不同矿床类型的预测结果

本次预测中, 岩浆岩型仍然是最主要的矿床类型, 共有 57 个预测区, 其次为变质型和(第四纪)沉积型, 各 19 个, 风化(壳)型 16 个。从预测资源量看(图 6), 岩浆型钛矿床的潜在资源量占了 82%, 其次为变质型, 占 7%, 风化型占了 6%, 沉积型砂矿折算成 TiO_2 后, 预测资源量占了 3%。

4.3.2 “优质钛”资源的预测结果

金红石的结构式为 TiO_2 , 含 Ti 为 60%; 钛铁矿的结构式为 FeTiO_3 , 含 Ti 为 31.6%。因此, 金红石被称为“优质钛”, 在中国钛矿的查明资源储量中只占 2.66%。综合分析本次评价成果, 也是这种趋势, 按预测区的个数统计, 金红石为主攻矿种的仅占 15%, 预测的资源量 1.36 亿 t, 也仅占预测资源总量的 5.85%。

4.3.3 潜在钛资源的可利用性分析

根据钛矿资源可利用性评价的原则, 本次预测的潜在资源量中, 目前技术经济及环保政策条件下, 暂时可利用的量为 15.2 亿 t, 占总预测量的 68.37%。

4.3.4 重点远景区

根据预测结果, 优选了不同类型的、成矿条件较好的、资源潜力较大的 12 个预测区, 作为将来的找矿勘查部署中优先重点关注的地区。这 12 个预测区的预测的资源量占了总预测资源量的 70% 以上。

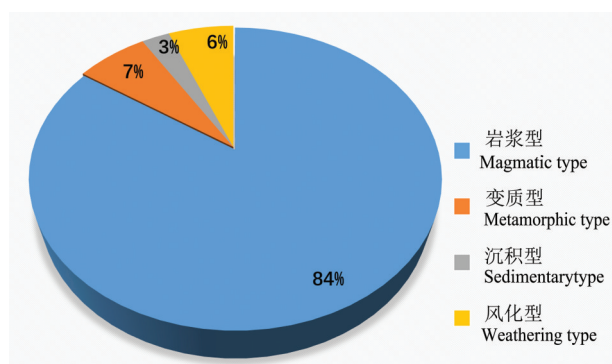


图 6 不同类型矿床预测资源量分布图

Fig.6 Statistical distribution of potential resources of different Ti deposit types

(1) 红格预测区

地理位置位于四川省攀枝花市。大地构造位置位于扬子地块西缘的康滇(晚古生代)隆起的南部, 受近 SN 向展布的安宁河、金河深大断裂的控制, 成矿与长轴 SN 向展布的红格基性—超基性杂岩体有关, 含矿岩石类型主要为辉长岩。主攻类型为岩浆型钛铁矿。

区内已有近 20 处钒钛磁铁矿矿床, 如: 红格、朱家包包超大型矿床, 白草、秀水河、潘家田、安宁村、务本、中干沟等大型矿床, 一碗水、湾子田、新庄、黑谷田、马鞍山、普隆等中型矿床, 半山、萝卜地等小型矿床, 以及德胜东村、彭家梁子、白沙坡、新桥等钒钛磁铁矿矿点。区内已有查明资源储量 4.96 亿 t。

预测区含矿岩体呈顺层侵入震旦系上统灯影组白云质灰岩地层中, 最新深部钻孔资料显示其总体为岩盆状产出, 目前的探矿深度为 780 m, 据葛藤菲等(2015)地球物理反演推测, 区内岩体埋深 0.98~2.12 km。区内已出露有大大小小的岩体 30 余个, 据王赛昕等(2017)研究, 区内第四系下仍然覆盖有含矿辉长岩体。结合已知矿床主矿层位于辉长岩下部, 矿层稳定、规模大, 且分布连续的特点, 预测该区还蕴藏有较大的钒钛磁铁矿的找矿潜力。

(2) 米易预测区

地理位置位于四川省米易县和德昌县, 地处攀枝花市以北。大地构造位置位于扬子地块西缘的康滇(晚古生代)隆起的中部, 处于 SN 向展布的安宁河断裂与格达断裂之间。区内成矿岩体为华力西早期基性—超基性状辉长岩体。主攻类型为岩浆型钛铁矿。

区内已有白马超大型矿床, 该矿床包括了夏家坪、及及坪、田家村、青杠坪和马槟榔等五个矿段, 南北长 24 km, 面积 100 km^2 余。除此之外, 预测区内还有棕树湾大型矿床, 大象坪、巴洞、新街、中梁子等中型矿床, 以及铜厂坪、麻陇等小型矿床。目前区内最大控矿深度 1080 m, 已有查明资源储量 5 628.85 万 t。

近年来区内部署了较多的找矿工作, 如 2011 年白马矿区即成为国家第一批整装勘查铁矿区, 通过整装勘查, 新增矿石量 14.9 亿 t, 预测矿石量 20 亿 t (舒畅等, 2015); 2010—2012 年四川省煤田地质局一三五队对棕树湾开展整装勘查, 将该矿床的规模

扩大成大型(刘策等,2015)。种种进展表明,该区仍然具有相当大的资源潜力。

(3)太和预测区

地理位置位于四川西昌市—冕宁县,大地构造位置位于扬子地块西缘的康滇(晚古生代)隆起的北部,处于攀枝花基性—超基性岩带上,即攀西钒钛磁铁矿成矿带的北部。主攻类型为岩浆型钛铁矿。

区内已有太和超大型钒钛磁铁矿床,太和岩体是攀查西地区四大岩体之一,仅被钻孔控制的部分长2600 m,宽1750 m,厚1420 m(魏宇等,2012)。区内还有峰子崖中型矿床一处,以及杨秀、半边山、杨河等小型矿床数处,目前,全区已有查明资源储量6990.18万t。

根据预测区岩体规模大、结晶分异良好的特征,结合区内已知太和矿区矿体主要分布在岩体下部,且表现为“由浅到深,单矿层厚度由薄变厚,多个矿层合并为单一厚大矿层”的特点(魏宇等,2014),预测该区深部还有较大的资源潜力。2010—2011年,本区内设立国家级整装勘查区,当时就曾预测该整装勘查区深部还有7~8亿t的矿石量,表明区内资源潜力丰富。

(4)黑山预测区

预测区地理位置位于河北承德市境内,大地构造位置位于华北陆块北缘的燕山褶断带,处于赤峰—承德—北票EW向基性岩、超基性岩带中部。主攻类型为岩浆型钛铁矿。

该岩带东西长约200 km,南北宽10~30 km,带内已发现大小基性超基性岩体143个,目前已发现的与钒钛磁铁矿有关著名的岩体包括大庙—黑山基性岩体、头沟基性岩体、岗子基性岩体、铁马超基性岩体、官地超基性岩体等。大庙—黑山岩体和头沟岩体均位于本预测区内。其中大庙—黑山杂岩体,东西长约40 km,南北宽约9 km(李立兴等,2010);头沟岩体东西长6 km,南北宽3 km。

预测区内已有黑山大型钛矿一处,有大庙、高寺台、大洼、龙潭沟、马营、头沟、乌龙素沟、铁马吐沟等中型矿床8处,还有铁马土沟、罗锅子沟等小型矿床、矿点10余处。已有查明资源储量(TiO_2)3406.31万t。

根据区内已有的黑山钒钛磁铁矿的特征分析,赋矿岩体中的矿床表现为岩浆晚期浅部矿床的特

点(陈正乐等,2014),说明岩体剥蚀程度不深,深部还应该有很好的找矿空间。而区域上,尤其是东部地区,表现为地层推覆或不整合于杂岩体之上,也说明了深部仍然具有较大的找矿潜力。

(5)东村预测区

预测区地理位置位于滇中地区昆明西山区—禄劝县一带,大地构造位置位于扬子地块西缘的康滇(晚古生代)隆起的南部,处于普渡河钛铁矿带。主攻类型为风化壳型钛铁矿(锐钛矿、金红石)和坡积、洪积、冲积型钛铁矿砂矿。

区内岩浆活动强烈,产出有大面积的早华力西晚期—印支期的基性—超基性岩体群,风化岩石的原岩为辉绿辉长岩。预测区属亚热带季风气候,干湿两季分明,雨季温热多雨,长期的物理风化与化学风化作用的交替出现,导致区内含钛丰富的铁镁质岩石风化形成风化壳型钛铁矿。

区内已有红土风化壳型钛铁矿床37处,其中大型矿床就有8处,包括:梅子箐、洒普山、干海子、团街、清水塘、东村、大营、红土田等。已有查明矿产资源(TiO_2)1651.37万t,具有矿床连片、埋藏浅、直接裸露地表、矿物组合简单、分选性能良好(沈强华等,2003;李星海等,2012)等特点。

预测区内开发利用的钛矿主要为风化壳型,目前的探矿深度为166 m,该区与攀枝花钒钛磁铁矿同处一个构造带,具有与之相似的成矿地质条件,在预测区西部就产生有岩浆型钒钛磁铁矿,如牟定安益钒钛磁铁矿,因此,本区除了浅表的风化壳型钛矿床外,还需要关注深部的原生矿。

(6)上峪预测区

预测区地理位置位于山东沂水县—莒县一带,大地构造位置位于胶东(元古宙)陆缘裂谷胶北陆缘岩浆带。该岩浆带形成于中元古代初期,华北陆块与扬子陆块挤压后地壳伸展减薄,沿裂解带形成幔源岩浆杂岩和基性岩墙群,即该区内钛铁矿(金红石矿)的母岩,钛铁矿的成矿岩性主要为辉石角闪石岩(邓觉梅等,2016),金红石矿则直接产在榴辉岩中(马建胜等,2018)。

预测区内已有上峪、肖家沟大型矿床两处,还有儒林、秦家庄中型矿床两处,还有官庄、常庄、官庄、宿山、坑头山、马家峪等小形矿床、矿点10余处,矿床的品位一般在5%~9%。区内已有查明资源储

量(TiO_2)3769.81万t,已知的矿体的最大埋藏深度为778m。

预测区内主攻类型为岩浆型钛铁矿和金红石矿。

(7)银洞山预测区

预测区地理位置位于湖北省丹江口市,大地构造位置位于秦岭—大别造山带的武当—随南逆推带中。预测区侵入岩有新元古代南华纪基性岩,古生代超基性岩、基性岩、碱性岩,以及白垩纪中酸性岩等,与成矿有关的是加里东期侵位的银洞山杂岩体(孙三才等,2006)。区内已知矿床为银洞山大型钒钛磁铁矿床,钛主要以单矿物的形式出现,含钛矿物为钛铁矿、白钛石,其次钛磁铁矿 TiO_2 含量一般为5.0%~8.0%,最高可达11.7%,品位变化系数不大(王进进等,2016),目前矿床的探矿深度为210m,已探明储量(TiO_2)1414.48万t。

全国重要矿产资源潜力评价时,在本区预测了钛矿储量6.5亿t。本次预测认为该预测区尤其是深部仍然具有较大的资源潜力。

(8)大柞木沟预测区

预测区地理位置位于陕西省紫阳县一带,大地构造位置位于南秦岭北大巴山造山带。区内出露的主要是古生代地层,局部出露中—新元古代浅变质岩系(郧西群和耀岭河群),区内古生代地层中发育一系列呈NW—SE向展布的超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩,超基性—基性岩岩墙规模较大,宽十米到百余米、长数百米到数千米不等,岩性以辉绿岩、辉长辉绿岩为主,系早古生代多次岩浆活动的产物(李夫杰等,2011)。

区内已有官元大型钒钛磁铁矿1处,大柞木沟中型钒钛磁铁矿1处,寨子梁、安沟等小型及矿点多处,已查明钛矿资源储量(TiO_2)1146.21万t。

预测区有着很好的形成岩浆型钒钛磁铁矿的成矿条件,且区内已知矿床的矿体的最大埋深为410m,因此,无论是已知矿床的深部还是外围,均还有较大的找矿潜力。

(9)霞岚预测区

预测区地理位置位于广东兴宁市,大地构造位置位于华南褶皱系南缘,武夷隆起与永梅拗陷带交接部位。受河源大断裂控制,区内发育有一系列燕山期基性—超基性杂岩体,包括霞岚、澄清、永和、长安、双头等(孙强辉等,2002),其中,霞岚岩体体积

最小,但分异最好。

区内已有大型霞岚钒钛磁铁矿床一处,勘查深度935m,区内已有查明资源储量(TiO_2)934.76万t。全国重要矿产资源潜力评价时,曾在该地区根据地球物理异常预测矿石量2.9亿t。本次预测估算该区可能还存较大的潜在资源量,主攻类型为风化壳型和岩浆型,尤其以岩浆型为主。

(10)白坪坡预测区

预测区地理位置位于海南省文昌市东部沿岸浅水海域,大地构造位置位于华南褶皱系五指山褶皱带。区域内地层发育不全,除局部地区有古生代地层小规模或零星出露外,第四系广泛分布。区域内属于岩浆活动频繁地带,不同时代的岩浆岩大面积分布,富含钛铁矿、金红石等矿物。该区气候高温多雨、潮湿炎热,基岩易于风化,沿海形成了大面积的含钛铁矿、金红石的风化壳,经过高温和海水的进一步破坏和搬运,在潮间带形成了砂矿沉积。

预测区内已有大大小小的砂矿床近40处,其中,大型矿床如:鹿马岭—东坡、铺前、昌烈村、木兰头东等,中型矿床如:白岭、坡口市村、木兰头西等。区内已有查明资源储量(矿物)631.54万t。

海南岛陆上本身就是一个巨大的Ti、Zr高背景区,区内广泛分布有Ti、Zr高值异常,且面积大、幅值高、浓集中心明显,具备丰富的砂矿物质基础。从预测区内的已知砂矿床特征可知,从海岸向海,钛铁矿的品位、厚度随着水深的增加而增加,在水深18~20m处出现高点,随后快速减小(林明坤等,2016)。据此,结合区域成矿地质特征,本区还存在较大的资源潜力。

根据《海南省矿产资源总体规划(2016—2020年)》要求,海南省从2017年起,停止审批新设非国家战略性矿产勘查项目,同时严格控制钼、锆英石、钛铁矿、萤石、石英砂、饰面石材、高岭土等矿产的开采总量。然而,作为资源储备,适当的找矿勘查工作还在很有必要继续进行。

(11)大阜山预测区

预测区地理位置位于湖北枣阳市境内,大地构造位置位于武当—桐柏—大别造山带的武当—随南逆推带中。该带是中国重要的原生金红石成矿带(邱啸飞等,2014)。成矿带内金红石矿床分布受控于区域内的主体构造线方向,呈近EW向展布,与

成矿有关的榴辉岩、榴闪岩体在成矿区带内成群成带分布,该带上已有大阜山、碧溪岭、邢家园、七里坪、大悟仙山、小悟仙山等多个大、中型金红石矿床。

预测区内矿床主要为中—新元古代的高钛碱性侵入岩(辉长岩)在经历了中高级变质作用后,含钛矿物分解转换形成的金红石矿,因此,往往矿体即为岩体。区内已有大阜山大型金红石矿床1处,朱家店小型金红石矿1处,另有金红石砂矿多处。已知矿床的矿石品位平均2.3%左右,最高达6%。

该区的预测类型主要是与超高压变质作用有关的变质型金红石矿,兼顾冲积型砂矿。预测区内已知矿床的探矿深度为128 m,结合综合信息,该区潜力很好。

(12) 杨砂侯预测区

预测区地理位置位于冀西曲阳县—涞水县一带,大地构造位置位于太行山造山带中段山西断隆西缘。区内矿床主要赋存在元古代地层中。预测区南部主要为区域变质型金红石矿,含矿建造为一套变质程度达低绿片岩相的区域变质岩,原岩为早古生代滹沱群滨海相碎屑岩—泥质岩—碳酸盐岩沉积。该套地层分布及延伸较稳定,资源储量较大;预测区北部则主要为岩浆热液蚀变型金红石矿,含矿建造为蚀变的超基性岩脉,岩脉为燕山晚期岩浆活动的产物,成群分布(齐新国等,2009)。

区内已有杨砂侯大型金红石矿1处,悟空寺—龙安中型金红石矿1处,宋各庄、中水东等小型矿床多处,区内已知矿床金红石品位2.6%~3.01%,目前最大控制深度150 m,已有查明资源储量69万t。

预测区位于一条有多个浓集中心的钛地球化学异常带上,成矿地质条件较好,潜力较大。

5 讨论及建议

中国钛矿资源虽然储量大、分布广,本次预测综合研究后,提出四川红格、米易、太和、河北黑山等12个重点远景区。然而,中国钛矿的资源禀赋不好,其中原生钛铁矿占比约97%,受提纯技术制约,产品很难用于海棉钛和优质钛白粉的生产。具有较高工业价值的钛矿主要为钛铁砂矿和金红石矿,其中,钛铁砂矿主要分布在沿海的两广及海南,受环境保护政策影响,沿海地区最后一个砂矿权已于2019年5月到期并停采。高品位优质钛矿的严重不

足,导致中国的钛矿资源的对外依存度高达40%。因此,笔者重点对“优质钛矿”尤其是变质型金红石矿进行了预测,预测认为,在未来的钛矿找矿工作中,一方面应继续在秦岭成矿带东部、桐柏—大别成矿带和山西断隆成矿带已知矿床的深部尤其是外围部署勘查工作,进一步扩大找矿成果,同时应加大力度在具有相似成矿条件的几条高压—超高压变质带部署找矿评价工作,尤其是已有矿床发现或矿化显示的北祁连—北阿尔金高压变质带、柴北缘—南阿尔金超高压变质带和西藏松多(超)高压变质带。

对于残坡积型砂矿,建议重点在康滇成矿带南部和右江成矿带东部寻找。对于滨海沉积型砂矿,主要在广东、广西沿海地带以及海南成矿区沿海地带寻找。据资料显示,中国自20世纪60年代以来,几乎停止了关于滨海砂矿的勘查,已探明的钛铁砂矿经过多年不断的大量开采,储量已不容乐观。虽然现在由于环境保护的原因,已有钛铁砂矿资源不能再开采,然而,为了摸清资源家底,保障资源安全,对滨海地区尤其是浅海大陆架砂矿的找矿评价工作还是有必要进行的。

致谢:文章完成过程中得到了陈郑辉、娄德波、叶会寿、刘建楠、王岩、姚佛军等同事的帮助,王保良研究员、王登红研究员、杨岳清研究员以及本文的审稿人等,均对文章提出了宝贵的修改意见,笔者在此表示衷心的感谢。同时还要感谢本文的编辑王学明老师的辛勤工作。

References

- Cao Jianfei. 1996. Titanium sources and their tapping and utilization [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18(2): 127–135 (in Chinese with English abstract).
- Chen Anguo, Wang Jizhong, Peng Gang. 1996. Geological characteristics of ultrabasic rocks in North Hebei Province [J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 19(3/4): 314–319 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Chen Bailin, Li Houmin, Du Weihe, Li Lixing, Han Fengbin, Wang Yong, Sun Yue, Wu Yu. 2014. Geological characteristics of the Damiao iron deposit, North China craton and ore—prospecting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 88(12): 2339–2350 (in Chinese with English abstract).
- Deng Juemei, Yin Yujing, Yu Mingguang, Sun Bin, Cheng Wei. 2016. Types distribution and main geological characteristics of titanium deposit in Shandong Province [J]. *Shandong Land Resources*, 32(3): 35–37 (in Chinese with English abstract).

- Ge Tengfei, Fan Zhengguo, Huang Xuzhao, Zhang Yongjun, He Jingzi, Li Jiaojiao, Zhou Daoqing, Liu Qiankun. 2015. Deep metallogenic potential and prospecting direction of the Panzhihua V-Ti-magnetite deposit determined from aeromagnetic data analysis [J]. *Geology and Exploration*, 51(6): 1041-1048 (in Chinese with English abstract).
- Hou Tong, Zhang Zhaochong, Franco Pirajno. 2012. A new metallogenic model of the Panzhihua giant V-Ti iron oxide deposit in the Emeishan large province: Based on high-Mg olivine-bearing wehrlites and new field evidence [J]. *International Geology Review*, 54(15): 1721-1745.
- Li Fujie, Yang Jun. 2011. Tectonic meaning of mafic dyke swarms in Zhenba eastern area in Shannan [J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 24(2): 238-243 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Li Lixing, Zhang Zhaochong, Santosh M, Liu Mingjun, Cui Yanhe, Yang Xiuqing, Chen Jing, Yao Tong. 2014. Alteration of the Damiao anorthosite complex in the northern North China Craton: Implications for high-grade iron mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, (3), 574-588.
- Li Lixing, Li Houmin, Chen Zhengle, Wang Denghong, Chen Weishi. 2010. Hydrothermal mineralization and fluid inclusion study on the Heishan iron deposit, Chengde County, Hebei Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 858-870 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinghai, Wen Zhuozhang. 2012. Status and development situation of titanium resources in Yunnan [J]. *Land and Resources Information*, (10): 25-29 (in Chinese with English abstract).
- Lin Mingkun, Lin Shanshan, Pan Yanjun, Qi Wentao, Li Yi. 2016. Analysis of mineral characteristics and metallogenic conditions of zirconium and titanium placer in shallow sea area of eastern Hainan Province [J]. *West-China Exploration Engineering*, 28(11): 141-143 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ce, Dai Jingru, Wu Yonggui, Zhu Yonggui. 2015. Geological features and prospecting for the Zongshuwan vanadic titanomagnetite deposit in Miyi, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 35(4): 492-495 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lansheng, Xie Liangzhen, Li Yongsun, Zhang Yuxu. 1996. Atlas of Ferrous and Nonferrous Minerals in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-88 (in Chinese).
- Ma Jiansheng, Yang Weihong. 2018. Geological features and prospecting of titanium deposit in Yanma Area, Junan, Shandong [J]. *China Metal Bulletin*, (11): 267,259 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2019. China Mineral Resources 2019 [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-8.
- Qi Xinguo. 2009. Geological characteristics and utilization prospects of rutile deposit in Hebei [J]. *China Non-Metallic Mining Industry Herald*, (z1): 18-20, 22 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaofei, Peng Sanguo, Gong Yinjie, Zhu Jiang. 2014. Metallogenic regularities and prospecting potential of the rutile deposits in the Wudang-Tongbai-Dabie Metallogenic Belt [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 155-161 (in Chinese with English abstract).
- Shen Qianghua, Zhang Zonghua. 2003. Distribution and evaluation of titanium resources in Kunming area [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 28(5): 17-19, 23 (in Chinese with English abstract).
- Shu Chang, Sun Liang, Xiang Zhilei. 2015. Analysis of deep extension characteristics of Baima V-Ti-magnetite in Miyi County [J]. *Super Science*, (2): 209-209, 210 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Qi Huawen, Hu Ruizhong, Chen Liemeng, Yu Songyue, Zhang Jiafei. 2013. Formation of thick stratiform Fe-Ti oxide layers in layered intrusion and frequent replenishment of fractionated mafic magma: Evidence from the Panzhihua intrusion, SW China[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14(3): 712-732.
- Song Xieyan, Chen Liemeng, Yu Songyue, Tao Yan, She Yuwei, Luan Yan, Zhang Xiaoqi, He Hailong. 2018. Geological features and genesis of the V-Ti magnetite deposits in the Emeishan large igneous Province' SW China [J]. *Bulletin of Mineralogy' Petrology and Geochemistry*, 37(6): 1003-1019 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qianghui, Yang Zhuliang, Chen Rong, Li Qinghuan, Xing Guangfu. 2002. Metallogenic geology of the Xialan-Yonghe vanadic titanomagnetite deposit belt in Xingning of Guangdong Province [J]. *Resources Survey & Environment*, 23(4): 266-271 (in Chinese with English abstract).
- Sun Sancai, Cai Zhiyong, Rao Bangliang, Yang Bin, Zhang Qinglin, Ma Cuiping. 2006. Characteristics and genetics of Yindongshan massif of Wudang block [J]. *Resources Environment & Engineering*, 20(3): 232-237 (in Chinese with English abstract).
- Turner R. 1986. Brazilian titanium [J]. *Engineering and Mining Journal*, 187(1): 40-42.
- U.S. Geological Survey. 2019. Mineral commodity summaries 2019. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>: 174-177.
- Wang Guocan, Tan Yingjia, Wang Fangzheng. 1992. Multiphase thrusting of the Chongli-Chicheng regional fracture of North Hebei Province and tectonic factors of inner mongolian axis upwarping [J]. *Earth Science*, 17(6): 621-630 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinjin, Yang Tao, Li Shiheng. 2016. Geological features and mineralization of Yindongshan iron ore deposit in Danjiangkou area, Northwest of Hubei Province [J]. *Value Engineering*, 35(21): 156-158 (in Chinese with English abstract).
- Wang Saixin, Yan Tingjie, Zuo Huancheng. 2017. Effects of high-precision magnetic survey exploring vanadic titanomagnetite in

- peripheral Panzhihua area [J]. Geological Science and Technology Information, 36(3): 255–261 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuxian. 2009. Preliminary experimental study on beneficiation of anatase in Yangtizishan–Moshishan, Inner Mongolia [C]// Proceedings of the 9th China Mineral Processing Conference: 84–86 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yu, Bai Wanling, Li Songjian, Guo Yaowen, Xia Shiping, Chen Genghu, Liu Wei, Li Zuohua, Zhang Xuming. 2012. Geological characteristics and prospecting prospects of Taihe V–Ti–magnetite deposit in Xichang, Sichuan Province [J]. Acta Geologica Sichuan, (B09): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yu, Guo Yaowen, Liu Wei, Zhang Xuming, Fan Yu. 2014. Geological features and genesis for the Taihe vanadic titanomagnetite deposit [J]. Acta Geologica Sichuan, 34(3): 368–372 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bin, Can Junxing, Tang Yuqiang, Zou Jun, Yu Zhou. 2012. Geological features of the vanadium–titanium magnetite deposit in the Hongge Area and its geophysical prospecting [J]. Geology and Prospecting, 48(1): 140–147 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xian, Zhang Jian. 2006. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China [J]. Titanium Industry Progress, 23(6): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Xing Changming, Wang Yan, Zhang Mingjie. 2012. Volatile and C–H–O isotopic compositions of giant Fe–Ti–V oxide deposits in the Panxi region and their implications for the sources of volatiles and the origin of Fe–Ti oxide ores [J]. Science China: Earth Sciences, 42(11): 1701–1715 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Li Houmin, Chen Zhenghui. 2008. Division of Mineralization Zones in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–138 (in Chinese).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Liu Fulai, Wu Cailai. 2009. Tectonic setting of main high– and ultrahigh–pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(7): 1529–1560 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Zhu Shangqing, Zhai Yusheng. 1985. Geology of Ore Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 184–205 (in Chinese).
- Zhang Chengjiang, Liu Jiaduo, Liu Xianfan, Li Youguo, Yang Zhengxi. 2009. Metallization systems in the Panzhihua–Xichang area of Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(4): 387–394 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Saunders Andrew D., Ai Yu, Li Ying, Zhao Li. 2009. Petrogenetic modeling of three mafic–ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints [J]. Lithos, 113(3/4): 369–392
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, Li Jianwei, Zhang Zuoheng, Song Xieyan. 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(5): 1189–1204 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming. 2008. Genetic types, distribution and main geological characteristics of rutile deposits [J]. Mineral Deposits, 27(4): 520–531 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guiying, Li Wenjuan, Qu Wei, Song Yongsheng. 2013. Comparative Study on different flow frame of titanium ore in Inner Mongolia [C]// Proceedings of the 6th Working Meeting of the Rare Metal Metallurgy Academic Committee and Academic Exchange: 335–342 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹谏非. 1996. 钛矿资源及期开发利用 [J]. 化工矿产地质, 18(2): 127–135.
- 陈安国, 王吉中, 彭岗. 1996. 冀北超基性岩地质特征 [J]. 河北地质学院学报, 19(3/4): 314–319.
- 陈正乐, 陈柏林, 李厚民, 杜维河, 李立兴, 韩凤彬, 王永, 孙岳, 吴玉. 2014. 河北承德大庙铁矿床地质构造特征与找矿预测 [J]. 岩石学报, 88(12): 2339–2350.
- 邓觉梅, 尹玉静, 于明光, 孙斌, 程伟. 2016. 山东省钛矿床的类型分布及其主要地质特征 [J]. 山东国土资源, 32(3): 35–37.
- 葛藤菲, 范正国, 黄旭钊, 张永军, 何敬梓, 李皎皎, 周道卿, 刘前坤. 2015. 攀枝花钒钛磁铁矿深部成矿潜力及找矿方向的航磁资料研究 [J]. 地质与勘探, 51(6): 1041–1048.
- 李夫杰, 杨骏. 2011. 陕南镇巴东部地区基性岩墙群的构造意义 [J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 24(2): 238–243.
- 李立兴, 李厚民, 陈正乐, 王登红, 陈伟十. 2010. 河北承德黑山铁矿床热液成矿特征及流体包裹体研究 [J]. 岩石学报, 26(3): 858–870.
- 林明坤, 林川善, 潘燕俊, 齐文涛, 李一. 2016. 海南省东部浅海锆钛砂矿物特征及成矿条件浅析 [J]. 西部探矿工程, 28(11): 141–143.
- 刘策, 戴敬儒, 吴永贵, 朱永贵. 2015. 四川米易县棕树湾钒钛磁铁矿地质特征及找矿 [J]. 四川地质学报, 35(4): 492–495.
- 刘兰笙, 谢良珍, 李永森, 章雨旭. 1996. 中国黑色有色金属矿产图集 [M]. 北京: 地质出版社, 1–88.
- 李星海, 闻均章. 2012. 云南钛资源状况与开发形势 [J]. 国土资源情报, (10): 25–29.
- 马建胜, 杨伟红. 2018. 山东莒南演马地区地质特征及钛矿找矿方向 [J]. 中国金属通报, (11): 267, 259.
- 齐新国. 2009. 河北省金红石矿床地质特征及开发利用前景 [J]. 中国非金属矿工业导刊, (z1): 18–20, 22.
- 邱啸飞, 彭三国, 龚银杰, 朱江. 2014. 武当—桐柏—大别成矿带金红石矿床成矿规律与找矿前景初探 [J]. 华南地质与矿产, (2): 155–161.
- 沈强华, 张宗华. 2003. 昆明地区钛资源分布及评价 [J]. 昆明理工大学学报(理工版), 28(5): 17–19, 23.
- 舒畅, 孙亮, 项志磊. 2015. 米易县白马钒钛磁铁矿深部延伸特征浅析 [J]. 大科技, (2): 209–209, 210.
- 宋谢炎, 陈列猛, 于宋月, 陶琰, 余宇伟, 栾燕, 张晓琪, 何海龙. 2018. 峨

- 眉大火成岩省钒钛磁铁矿矿床地质特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(6): 1003-1019.
- 孙强辉,杨祝良,陈荣,李庆环,邢光福. 2002. 广东省兴宁市霞岚—永和钒钛磁铁矿带成矿地质特征[J]. 资源调查与环境, 23(4): 266-271.
- 孙三才,蔡志勇,饶邦良,杨斌,张清林,马翠萍. 2006. 武当地块银洞山岩体特征及成因探讨[J]. 资源环境与工程, 20(3): 232-237.
- 王国灿,谭应佳,王方正. 1992. 冀北崇礼—赤城断裂的多相逆冲——兼论内蒙地轴隆升的构造制约因素[J]. 地球科学, 17(6): 621-630.
- 王进进,杨涛,李世恒. 2016. 鄂西北地区丹江口银洞山铁矿床地质特征及成矿作用[J]. 价值工程, 35(21): 156-158.
- 王赛昕,颜廷杰,左焕成. 2017. 高精度磁测在攀枝花外围寻找钒钛磁铁矿的效果[J]. 地质科技情报, 36(3): 255-261.
- 王裕先. 2009. 内蒙羊蹄子山—磨石山锐钛矿选矿初步试验研究[C]. 第九届中国选矿大会论文集: 84-86.
- 魏宇,柏万灵,李松键,郭耀文,夏世平,陈庚户,吕杜,柳维,李作华,张旭明. 2012. 四川省西昌市太和钒钛磁铁矿矿区地质特征及找矿远景[J]. 四川地质学报, (B09): 44-50.
- 魏宇,郭耀文,柳维,张旭明,范宇. 2014. 西昌太和钒钛磁铁矿矿体特征及成因[J]. 四川地质学报, 34(3): 368-372.
- 武斌,曹俊兴,唐玉强,邹俊,余舟. 2012. 红格地区钒钛磁铁矿地质特征及地球物理找矿的探讨[J]. 地质与勘探, 48(1): 140-147.
- 吴贤,张健. 2006. 中国的钛资源分布及特点[J]. 钛工业进展, 23(6): 8-13.
- 邢长明,王焰,张铭杰. 2012. 攀西地区超大型钒钛磁铁矿矿床挥发份组成及其C-H-O稳定同位素研究:对挥发份来源和矿石成因的约束[J]. 中国科学, 42(11): 1701-1715.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,李厚民,陈郑辉. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版社, 1-138.
- 杨经绥,许志琴,张建新,张泽明,刘福来,吴才来. 2009. 中国主要高压—超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. 岩石学报, 25(7): 1529-1560.
- 袁见齐,朱上庆,翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京:地质出版社, 184-205.
- 张成江,刘家铎,刘显凡,李佑国,阳正熙. 2009. 攀西地区金属成矿系统[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(4): 387-394.
- 张招崇,侯通,李厚民,李建威,张作衡,宋谢炎. 2014. 岩浆—热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1189-1204.
- 赵一鸣. 2008. 金红石矿床的类型、分布及其主要地质特征[J]. 矿床地质, 27(4): 520-531.
- 周桂英,李文娟,屈伟,宋永胜. 2013. 内蒙某含钛矿石不同流程结构对比试验研究[C]//第六届稀有金属冶金学术委员会全体委员工作会议暨全国稀有金属学术交流会议论文集: 335-342.