

doi: 10.12029/gc20230526003

丁建华, 张勇, 李立兴, 叶会寿, 李厚民, 付雪瑞. 2025. 中国钒矿成矿地质特征与资源潜力评价[J]. 中国地质, 52(1): 22–42.

Ding Jianhua, Zhang Yong, Li Lixing, Ye Huishou, Li Houmin, Fu Xuerui. 2025. Geological characteristics and resource potential of vanadium deposits in China[J]. Geology in China, 52(1): 22–42(in Chinese with English abstract).

中国钒矿成矿地质特征与资源潜力评价

丁建华^{1,2}, 张勇¹, 李立兴¹, 叶会寿¹, 李厚民¹, 付雪瑞³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100094; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:【研究目的】钒金属因其独特的物理和化学性能而用途广泛, 在经济社会发展中起着越来越重要的作用。中国是钒资源大国, 无论是总资源量还是产量、消费量均排列全球第一, 对中国钒矿资源进行成矿规律总结和潜力分析具有重要的理论和现实意义。【研究方法】本文在系统梳理和全面总结全国钒矿成矿规律的基础上, 开展了钒矿资源潜力评价。【研究结果】与黑色岩系有关的沉积型钒矿是中国查明资源量占比最多的钒矿类型, 主要集中于扬子地块南北缘、秦岭—大别造山带以及塔里木地块北缘, 海侵、生物有机质、热水流体共同作用下沉积的黑色岩系地层是寻找该类型矿床最重要的找矿要素。其次为与基性—超基性杂岩有关的钒钛磁铁矿型钒矿, 主要分布于攀西裂谷、华北地台北缘及天山一带, 成矿主要与深大断裂有关, 带状分布的构造—岩浆岩带是寻找该类型矿床最重要的要素。潜在资源预测共圈定了 213 个预测区, 包括 A 类预测区 32 个, B 类预测区 85 个, C 类预测区 96 个。【结论】综合考虑中国钒矿资源在全球供需链中的位置, 以及中国钒矿品位较低、共伴生矿多、矿物组成复杂的特点, 结合资源综合利用水平较低、资源浪费较大的现状, 建议为巩固和培养中国钒资源优势, 对岩浆型钒钛磁铁矿应加大找矿投入, 保证已有钒产业基地产能需求; 对沉积型钒矿, 应加强选冶技术研发, 提高综合回收率; 同时应加强高档钒产品的开发, 提高对钒矿资源的高效、高端开发利用。

关键词: 钒矿; 沉积黑色岩系型; 岩浆钒钛磁铁矿型; 成矿规律; 资源潜力; 矿产勘查工程; 中国

创新点: (1) 指出中国钒矿有两种类型, 一类是沉积黑色岩系型, 另一类是与基性超基性岩有关的钒钛磁铁矿型; (2) 圈定预测区 213 个, A 类预测区 32 个, B 类预测区 85 个, C 类预测区 96 个。

中图分类号: P618.61 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0022-21

Geological characteristics and resource potential of vanadium deposits in China

DING Jianhua^{1,2}, ZHANG Yong¹, LI Lixing¹, YE Huishou¹, LI Houmin¹, FU Xuerui³

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. SinoProbe Laboratory, Beijing 100094, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Vanadium is widely used in multiple fields due to its unique physical and chemical properties, playing an increasingly important role in economic development, and its demand is increasing. China is one of the countries with the largest amount of vanadium ore resources, ranking first in the world in terms of total resources, mineral product production, and consumption. It is of theoretical and practical significance to summarize the metallogenic regularity and assess the potential of vanadium. **[Methods]** We

收稿日期: 2023-05-26; 改回日期: 2023-08-22

基金项目: 科技基础资源调查专项(2022FY101705)、中国地质调查项目(DD20230305)联合资助。

作者简介: 丁建华, 女, 1969 年生, 正高级工程师, 主要从事矿产资源潜力评价研究; E-mail: dingzhazhan@163.com。

evaluated the potential of vanadium resources in China based on systematically summarizing the metallogenic regularity and mineralization patterns of vanadium deposits. **[Results]** The sedimentary vanadium deposits related to the black rock series are the type of vanadium deposits with the highest proportion of identified resources in China. This type of deposits mainly distributes in the northern edges and southeastern part of the Yangtze block, the Qinling–Dabie orogenic belt, and the northern edge of the Tarim block. The black strata deposited under the influence of marine invasion, biological organic matter, and hot water are the most important elements for searching for this type of deposit. The next important deposit type is vanadium titanium magnetite type related to basic ultrabasic rocks. The mineralization mainly related to deep and large faults. The banded structure igneous rock belt is the most important element for searching for this type of deposit. We delineated 213 prediction areas, including 32 in class A, 85 in class B and 96 in class C. **[Conclusions]** The characteristics of vanadium resources in China are abundant resources, low grade, abundant co associated minerals, and complex mineral composition. The low level of mineral processing and smelting technology leads to a low level of comprehensive utilization of vanadium resources and significant waste of resources. To consolidate and cultivate the advantages of vanadium resources in China, we suggest as follows: (1) Increase the investment in the exploration of magmatic–type V–deposits to ensure the production capacity demand of the existing V–industrial base. (2) Strengthen the research and development of sedimentary–type V ore processing and metallurgical technology, and the scientific and technological research and development of high–grade vanadium products. (3) Improve the efficient and high–end development and utilization of vanadium resources.

Key words: vanadium; sedimentary black rock type; magmatic vanadium–titanium magnetite type; metallogenic regularities; mineral resource potential; mineral exploration engineering; China

Highlights: (1) There are two types of vanadium deposits in China, one is sedimentary black shale type and the other is vanadium–titanium magnetite type related to basic ultrabasic rocks. (2) 213 prediction areas were delineated, including 32 category A prediction areas, 85 category B prediction areas and 96 category C prediction areas.

About the first author: DING Jianhua, female, born in 1969, senior engineer, mainly engaged in research on potential evaluation of mineral resources; E–mail: dingzhazhan@163.com.

Fund support: Supported by the projects of Science & Technology Fundamental Resources Investigation Program (No.2022FY101705) and China Geology Survey (No.DD20230305).

1 引言

钒(Vanadium), 银白色金属, 有延展性, 质坚硬, 无磁性, 熔点很高, 耐盐酸和硫酸, 耐水腐蚀, 如此众多优异的物理性能和化学性能使得钒用途广泛, 使用范围涵盖了航空航天、化学、电池、颜料、玻璃、光学、医药等众多领域, 且在航空钛合金等某些领域, 目前钒是不可替代的。近年来随着全球能源格局的变革, 绿色能源已成为可持续发展战略的重要保障, 作为稳定储能产业必需的钒资源, 越来越受到重视。

钒在地壳中的丰度为 0.02%, 排在元素地壳丰度的第 13 位, 地球的钒矿资源非常丰富, 但钒在自然界分布非常分散, 常以含钒矿物或类质同象的形式存在, 作为共伴生矿种产出。Goldberg(1992)将钒矿床类型划分为岩浆型(钒赋存在钒钛磁铁矿中)、同生沉积型(钒赋存在与碳和烃类有密切关系

的沉积物中)、后生变质型(钒赋存在构造泥化带的黏土中)以及表生钒矿(钒赋存在地表多金属氧化带中), 其中尤以岩浆型钒钛磁铁矿最为重要, 是钒产品最主要的来源。据统计全球钒矿的储量主要分布于中国、澳大利亚、俄罗斯、南非、巴西、美国、芬兰、加拿大等国, 产品则主要来源于中国、俄罗斯、南非、巴西 4 个国家。中国是全球钒储量(占比 40%)、产量(占比 66%)及消费量(占比 47%)的第一大国。为摸清全国钒矿的潜在资源状况, 笔者团队系统梳理了全国钒矿产资源现状及资源勘查成果, 深入总结了我国钒矿的成矿规律, 并在此基础上开展了全国钒矿资源的潜力分析与评价, 以期合理利用与布局中国钒矿资源提供参考。

2 中国钒矿资源特点

2.1 矿产地与分布

根据公开资料整理, 中国现已发现钒矿床、矿

点、矿化点 470 余处(主要为伴生矿),其中有查明资源量的 351 处,包括大型($V_2O_5 > 100$ 万 t)及以上矿床 17 处(表 1),中型(V_2O_5 10~100 万 t)矿床 97 处。

根据《中国矿产资源报告》2019、2022(中华人民共和国自然资源部, 2019, 2022),我国共有 23 个省(市、自治区)有钒矿的查明资源量(图 1),主要分布于四川和湖南,其次位于贵州、湖北、河南和陕西,这 6 个省的查明资源量约占全国的 80%。统计数据显示,近 10 年来中国钒矿的累计查明资源量

一直保持稳定的小幅增长趋势。

2.2 中国钒矿资源禀赋

综合分析表明,中国钒矿资源具有矿床类型简单、独立矿床少、共伴生矿种多、品位较低、资源量大且分布集中等特点。

2.2.1 独立矿床很少

在地壳中,钒是比较常见的元素,含量约占地壳构成的 0.02%,比铜、锡、锌、镍的含量都多,且相对容易获取;钒的价态多样,在自然界主要以+3 价和+5 价存在,其中 V^{3+} 的离子半径与 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 非

表 1 全国钒矿大型及以上矿床一览

Table 1 Large and super large V-deposits in China

序号	矿产地名称	地理位置	矿种	规模	品位 (V_2O_5)	矿床类型	成矿时代	赋矿地层/岩体
1	红格	四川攀枝花市	铁钛钒	超大型	0.24~0.25	岩浆型	晚二叠世 (337±1.5) Ma	辉长岩
2	扎布其	内蒙古西乌珠穆沁旗	铁铜钒	大型	0.25 (邓泽文, 2012)	岩浆型	(337±1.5) Ma (邓泽文, 2012)	辉长岩、辉石闪长岩
3	太和	四川西昌市	铁钛钒	大型	0.24	岩浆型	260 Ma (She et al., 2014)	辉长岩
4	攀枝花及外围	四川攀枝花市	铁钛钒	大型	0.1~0.32	岩浆型	晚二叠世	辉长岩
5	安宁潘家田	四川攀枝花米易县	铁钛钒钴	大型	0.23	岩浆型	晚二叠世	辉长岩
6	白马及外围	四川攀枝花米易县	铁钛钒	大型	0.19~0.28	岩浆型	晚二叠世	辉长岩
7	赵案庄	河南舞钢市	铁钒钛钴磷	大型	0.80	岩浆型	古元古代 (张阔等, 2016)	橄榄岩
8	鲁冲—铁溪	湖南会同县	钒石煤	大型	0.79	沉积型	早寒武世	牛蹄塘组
9	岩头寨	湖南古丈县	钒石煤	大型	0.41	沉积型	早寒武世	牛蹄塘组
10	大丰	广西上林县	钒石煤银	大型	1.102 (雷英凭等, 2005)	沉积型	早泥盆世	塘丁组
11	新开塘	湖南岳阳县	钒石煤	大型	0.41	沉积型	早寒武世	牛蹄塘组
12	石槽沟	河南淅川县	钒	大型	1.11	沉积型	早寒武世	水沟口组
13	大桥—上集	河南内乡县—淅川县	钒	大型	0.63~0.89	沉积型	早寒武世	水沟口组
14	方山口	甘肃敦煌县	钒磷铀	大型	1.02 (赵省民等, 2002)	沉积型	早寒武世	双鹰山组
15	注溪	贵州岑巩县	钒	大型	0.86	沉积型	震旦纪—寒武纪	留茶坡组、九门冲组
16	中村—银花	陕西山阳县	钒	大型	0.58~1.17 (李玫和张复新, 2009)	沉积型	早寒武世	水沟口组
17	千家坪	陕西商南县	钒	大型	0.94~1.05 (徐林刚等, 2022)	沉积型	早寒武世	水沟口组

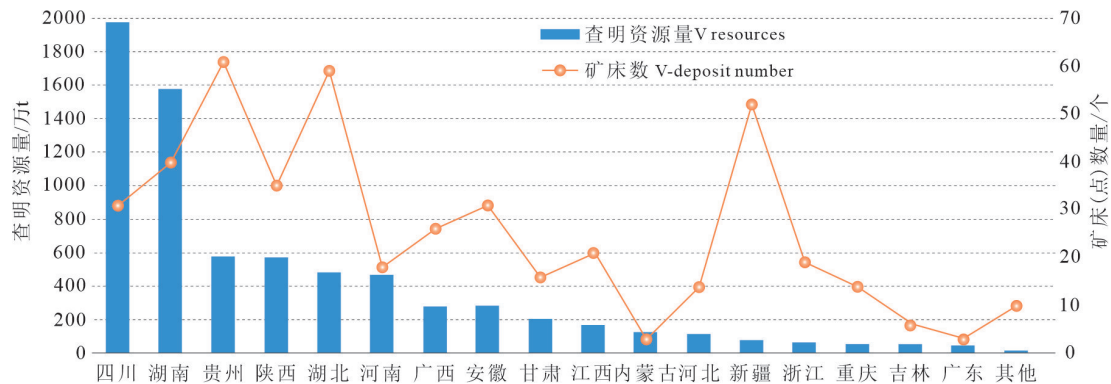


图 1 中国钒矿查明资源分省分布图

Fig.1 Distribution of V resources in different provinces

常接近,常以类质同象替代铁和铝的方式进入矿物晶格,铁和铝在自然界中的分布甚广,导致了钒的分布过于分散,很难形成以独立钒矿物为主的钒矿床,基本均是以类质同象形式产于钒钛磁铁矿床,或以含钒矿物产于磷块岩矿(含钒磷酸盐)、含铀砂岩(铀钾钒矿),或呈吸附状产于铝土矿以及含炭质的岩石如石煤中。

2.2.2 矿床类型简单

钒矿床的成因类型简单,主要包括岩浆型、沉积型、沉积变质型及风化型等。中国最主要的钒矿床有两类,一类是与基性—超基性杂岩有关的岩浆型(钒钛磁铁矿),其查明资源量占了全国总量的 35.94%,另一类是与黑色岩系有关的沉积型(俗称石煤型),占比 59.99%。其他类型,如产于砂岩型铀氧化带的伴生钒矿,与风化壳型铝土矿伴生的钒矿等,仅占了很小的比例,为 4.07%。

2.2.3 开发利用石煤型钒矿是中国的特色

世界上产于岩浆型钒钛磁铁矿中的钒资源量占全球总量的 67%,其余的产于磷块岩、原油及沥青砂等矿床中。钒矿产品有 98% 来源于钒钛磁铁矿,其余来自石油、铀矿、磷矿的副产品。不同于其他国家,中国钒矿资源是以黑色岩系有关的沉积型为主,其次才是钒钛磁铁矿型,有 78% 钒矿产品出自钒钛磁铁矿,其余来自石煤型钒矿。

中国石煤型钒矿资源量巨大,是提取钒的主要原料之一,而且可能是目前少有的开发利用这种类型钒矿的国家。然而,由于这种类型钒矿矿物组成复杂,选冶和提纯技术水平制约了资源综合利用水平,造成的资源浪费较大。

国外此种类型的钒矿也很多,如美国曾对怀俄明州西部和爱达荷州东南部的二叠系 Phosphoria 组上部黑色页岩中的钒矿进行评价,页岩中 V_2O_5 含量平均 0.9%,估算资源量约为 4100 万 t(Mckelvey et al., 1986),由于产品价格、环境保护等因素,美国将其作为暂不能利用的次经济资源进行储备,数据并没有纳入资源量统计中。可以想见,如果将这种类型的资源全部纳入统计,中国的资源量第一的优势可能并不存在。

2.2.4 品位不高

目前已发现含钒的矿物有百余种,但具有开发意义的工业矿物种类并不多,绿硫钒矿、钒云母、钒

铅矿、钒钾铀矿、钒铜铅矿等矿物中 V_2O_5 含量虽然较高,达 18%~29%,但自然界量很少,难以聚集成矿。而钒钛磁铁矿矿物中的钒含量虽然很低,一般为 0.1%~0.2%,但资源量巨大,因此是钒资源的主要来源。

中国有 78% 的钒矿产品出自钒钛磁铁矿,然而与国外相比,中国钒钛磁铁矿床中的钒品位普遍偏低。如南非的布什维尔德(Bushveld)平均品位(V_2O_5)为 1.5%~2.0%,罗万(Rhovan)平均品位为 2.3%,马坡茨(Mapochs)平均品位为 1.4%~1.9%;芬兰的科伊特莱宁(Koitelainen)矿床品位为 2.0%~2.3%(中国地质矿产信息研究院, 1996);加拿大的派普斯通湖(Pipestone)矿床品位为 1.2%~1.6%;美国的桑福德山(Sanford)矿床品位为 0.45%。而中国岩浆型钒钛磁铁矿床的钒平均品位为 0.29%,如著名的攀西地区的钒钛磁铁矿,钒的平均品位仅为 0.10%~0.32%,不足边界品位(坑采 0.5%~0.6%,露采 0.4%~0.5%)的一半。

2.2.5 资源量分布集中

中国有 23 个省(自治区)有查明钒资源量,主要集中在分布于四川和湖南,占全国近 50%。另一方面,在 470 余个钒矿床中,17 个大型钒矿的查明资源量占了全国总量的 60% 以上。资源的集中分布有利于规模化开采。

2.3 中国钒矿供需情况

中国钒产量自 2012 年大幅增长以来,一直占全球钒产量的一半以上,而且一直处于供过于求的状态(高永璋, 2019)。从进出口数据分析(图 2),除了 2020 年受新冠疫情影响产生的较高幅的净进口外,中国的钒出口一直大于进口,属于产能过剩、对外依存度很小的矿种。

3 中国钒矿的成矿规律

3.1 矿床类型

钒的独立矿床很少,因此矿床类型随主矿种的类型而定。中国钒矿床的主要成因类型为岩浆型和沉积型,另有少量与玢岩型铁矿有关的火山岩型、与石墨矿伴生的沉积变质型、与铝土矿相伴生的风化壳型,以及与钛铁砂矿伴生的滨海砂矿型等。其中,沉积型最为主要,查明资源量占全国总量的 59.99%;其次为岩浆型,查明资源量占比为

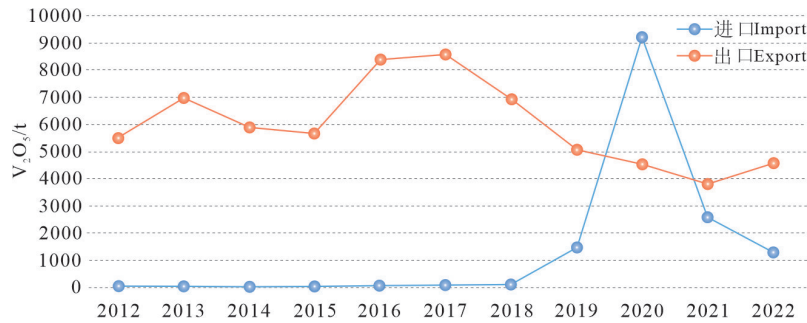


图2 中国近年来 V₂O₅ 进出口走势(根据公开数据整理)

Fig.2 Import and export trend of V₂O₅ in China (processing based on publicly available data)

35.94%, 其余的 4.07% 为火山岩型、风化壳型等其他类型。

3.1.1 沉积型钒矿床

沉积型钒矿包括了产于黑色岩系中的钒(Mo、Ni、Ba、Ag、U 等)多金属矿床、磷钒矿床, 以及产于杂色岩系中的钾钒铀矿等, 其中尤其以产于黑色岩系中钒多金属矿床最为重要, 该类型钒矿具有分布广、层位稳定、规模大的特点, 17 个大型超大型钒矿中该类型占了 10 个。

黑色岩系是含有较多的有机碳(一般 $\geq 1\%$)及硫化物的暗灰色—黑色的硅质岩、碳酸盐岩、泥质岩及相应变质岩石组合的总称, 在中国分布较广, 形成时代从元古代至新近纪均有(范德廉等, 2004), 几乎均赋存有钒矿资源。其中, 有经济价值的沉积型钒矿床主要产于扬子地块和秦岭—大别造山带中的下寒武统黑色页岩系(即广义的“石煤”)中。典型的矿床如河南内乡—淅川县的大桥—上集钒矿、湖南会同县的鲁冲—铁溪钒石煤矿、贵州岑溪县的注溪钒矿床等。矿化多呈带状分布, 矿体层状、似层状单层或多层产出, 产状与地层一致, 含矿层厚且稳定, 矿石类型包括炭质硅质岩型、炭质黏土岩型、炭质板岩型等, 矿石往往保存有原生沉积阶段的组构特征(纹层状、条带状)。钒元素主要以类质同象形式赋存于钒系云母的晶格中, 其次被黏土矿物、有机质所吸附。

沉积型钒矿床主要形成于同生沉积和早期成岩阶段, 成矿多与沉积转换时期的海侵有关, 发育于浅海台地、陆棚和边缘海斜坡盆地等浅水区域; 成矿环境为缺氧的弱还原环境; 有机质、黏土等对成矿元素的捕捉和吸附, 以及微生物自身的携带、热水流体中胶体物质吸附等, 均可促进钒元素的富

集; 成矿物质多渠道多来源, 也导致了成矿元素和伴生元素多样; 成矿作用表现为海水(Mao et al., 2002; Lehmann et al., 2007; Xu and Mao, 2021)、生物和海底热水(Jiang et al., 2007; Han et al., 2017)的多因复合(韩善楚, 2013), 在不同区域不同的沉积环境, 各因素起作用的程度不同; 成矿后变质作用对钒的影响较弱, 可以使钒部分活化流失, 但通常并不能产生钒的显著富集。

3.1.2 岩浆型钒矿床

岩浆型钒矿是指与岩浆型铁矿相伴生的钒矿床, 是中国钒矿的另一重要类型, 以攀枝花、承德等地的钒钛磁铁矿为代表。该类矿床成因上与不同地质时代的基性—超基性杂岩体有关, 钒与铁呈完全的正相关关系, 富集规律一致。然而, 此类矿床总体上钒的品位较低, 实际生产中是否综合利用往往受到价格及选冶成本的限制。

矿床大多数产于隆起区边缘的深断裂带及其附近, 因此, 矿床在区域上常呈线状分布, 一般规模较大, 沿走向可达几千米, 厚几米至几十米。如攀西成矿带(张成江等, 2009; 武斌等, 2012; 邢长明等, 2012)和华北陆块北缘的赤城—承德—北票 WE 向基性岩、超基性岩带(王国灿等, 1992; 陈安国等, 1996)是中国重要的两条岩浆型钒钛磁铁矿的成矿区带。

3.1.3 其他类型钒矿床

中国其他类型钒矿床主要包括火山岩型、沉积变质型、风化型、砂矿型等。火山岩型钒矿是指与火山—侵入岩有关的玢岩型磁铁矿相伴生的钒矿床, 主要产于在长江中下游地区一些断陷盆地中。如安徽马鞍山地区的铁矿、江苏南京梅山铁矿等, 成矿与中性—基性富钠质闪长玢岩有关, 从火山—

侵入活动中心向外, 往往形成矿浆型、高温气液充填交代型、接触交代型等多个成因类型组成的成矿系列。矿石矿物以含钒磁铁矿为主(李厚民等, 2012), 次为赤铁矿、镜铁矿等, 研究表明热液成因的磁铁矿 Ti、V 的含量均较岩浆成因的要低(Nadoll et al., 2014)。沉积变质型主要是指与沉积变质型石墨矿相伴生的钒矿, 如: 黑龙江柳毛石墨矿含 V_2O_5 达 30 万 t, 达中型规模(郝文丽等, 2008), 类似的还有四川广元的石墨(钒)矿、江西金溪峡山石墨(钒)矿(李汉玲, 1982^①)等。风化残坡积型, 主要是指与风化型铝土矿、钛磁铁矿相伴生的钒矿床, 如广西贵港市大岭铝土(铁镓钒)矿、广西田阳县六算钛铁(钒)矿等。另还有很少量与铅锌多金属矿、萤石矿相伴生的热液型, 以及砂矿型等。

3.2 沉积型钒矿的时空分布规律

3.2.1 空间分布规律

沉积型钒矿形成于缺氧的海相沉积环境, 其分布受到黑色岩系分布的控制。沉积型钒矿有关的成矿区带如图 3 和表 2。从图表可以看出来, 中国含钒矿地层包括了青白口系到二叠系间 8 个层系的多个含矿层位, 空间分布主要集中于扬子地块北缘、南缘以及秦岭—大别造山带, 涉及云南、四川、贵州、湖北、湖南、广东、广西、浙江、江西等省区, 特别是浙西北—皖南—赣西南—湖南至桂西北一线, 富钒的上寒武统黑色岩系层连绵 1600 多千米。此外, 在准噶尔盆地南缘及塔里木板块北缘也有少量分布。

3.2.2 时间分布规律

沉积型钒矿的成矿作用以沉积为主, 成矿时代

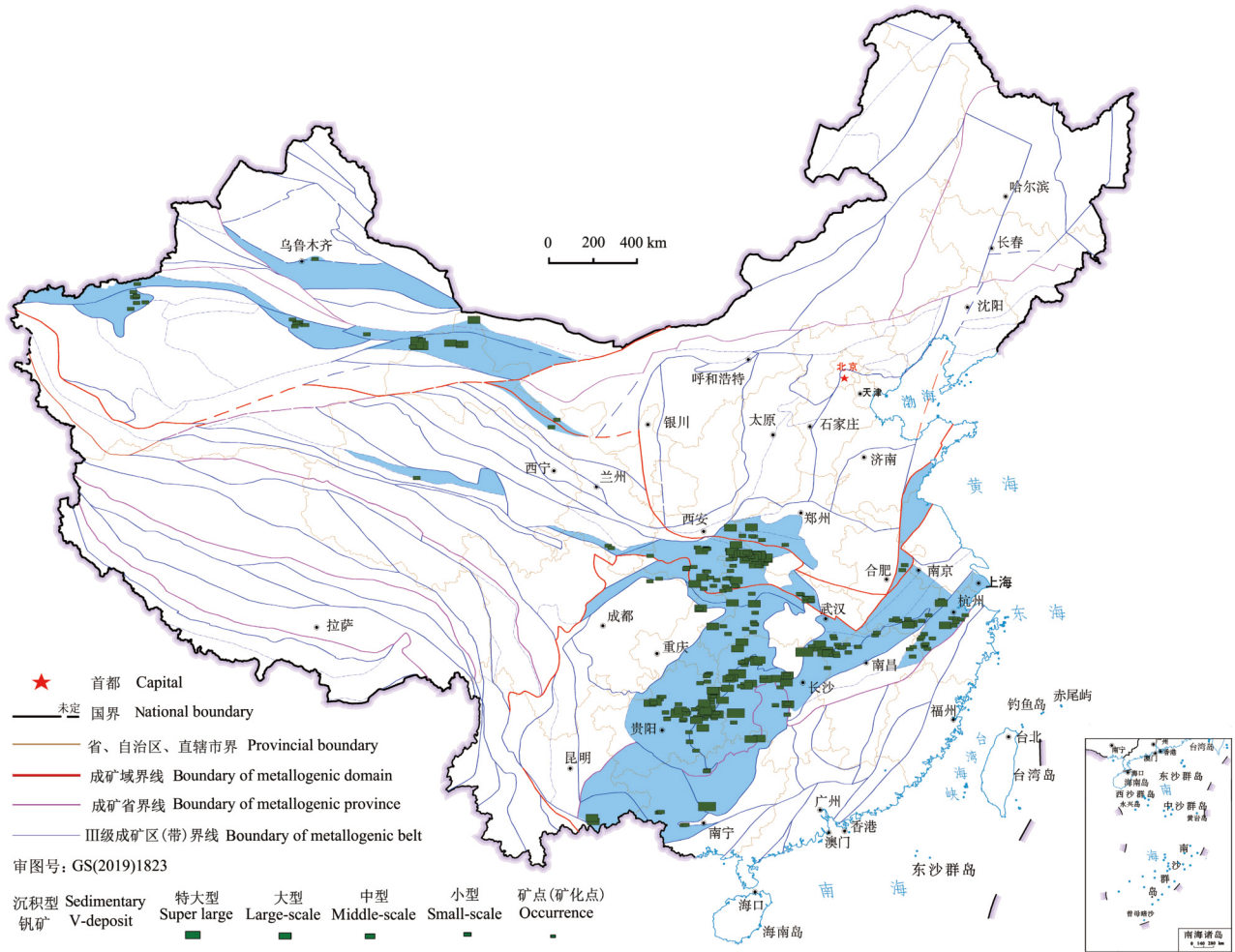


图 3 沉积型钒矿分布范围
 Fig.3 Distribution of mineralization sedimentary V-deposits

表 2 沉积型钒矿有关的成矿区带
Table 2 Mineralization zones of sedimentary V-deposits

成矿省	III级成矿区带*		主要含矿层位	典型矿床
	编号	名称		
准噶尔成矿省	III-6	准噶尔南缘CuMoAuWFeCrMn稀有硼石墨透闪石玉成矿带	上二叠统上芨芨槽子群	五工河磷钒矿
塔里木成矿省	III-12	III-12-④ 塔北缘阔克沙岭AuSbPbZnSnMn石膏铝土矿石墨硅成矿亚带	下寒武统玉尔吐斯组	拜力布拉克磷钒矿
	III-13	塔北缘(隆起) CuNiAuFeTiVPbZnRM-REE蛭石成矿带	下寒武统玉尔吐斯组	阿克布拉克北磷钒矿
	III-14	III-14-① 公婆泉FeMnCuAuPbZnWSnRbV-U-P成矿亚带	下寒武统西山布拉克组	喀温库杜克钒矿、西山布拉克磷钒矿
华北陆块成矿省	III-18	阿拉善(隆起) CuNiPtFeREE-P石墨芒硝盐类成矿带	震旦系烧火筒沟组	大沟井钒矿床、埃木柴沟磷钒矿
	III-63-②	III-63-② 三门峡—巩义铝土矿Fe煤石膏成矿亚带	下寒武统水沟口组	薛家庄钒矿
	III-63-③	III-63-③ 小秦岭—豫西AuMoWFePbZn硫铁矿萤石成矿亚带	新元古界栾川群煤窑沟组	黄土岭钒矿
秦岭-大别成矿省	III-28	III-28-③ 西秦岭迭部—武都Fe(菱铁矿) AuU成矿亚带	中志留统	庙儿沟钒矿
	III-66	III-66-① 北秦岭AuCuMoSb石墨蓝晶石红柱石金红石成矿亚带	下寒武统水沟口组	汪家店钒矿
		III-66-② 南秦岭AuPbZnFeHgSbRM-REE-V蓝石棉重晶石成矿亚带	下寒武统庄子沟组、庙湾组、鲁家坪组	石槽沟钒矿、青木沟钒矿、杨家堡钒矿
	III-67	III-67-② 苏鲁AuFe石墨成矿亚带	下寒武统荷塘组	罗家凹钒磷矿
下扬子成矿亚省	III-69-①	III-69-① 大冶—九江CuAuFePbZn(SrWMoSb)硫铁矿石膏成矿亚带	下寒武统	泉山口钒矿
	III-69-②	III-69-② 安庆—铜陵—繁昌CuFePbZbAgAu硫铁矿明矾石成矿亚带	下寒武统荷塘组	龙岭钒矿、金甫湾钒矿
	III-69-⑤	III-69-⑤ 幕阜山—九华山PbZnSnWMoNbTaV萤石成矿亚带	下寒武统牛蹄塘组	小源冲钒矿、崇阳石门钒矿
III-70	江南隆起东段AuAgPbZnWMnV萤石成矿带	下寒武统牛蹄塘组、荷塘组	安吉上市钒石煤矿、黟县石山钒石煤矿、通城狮古尖钒矿	
III-71	III-71-③ 玉山—杭州湾CuFeNbTa滑石硅灰石萤石成矿亚带	下寒武统荷塘组	建德安仁石煤矿、开化塘坞石煤矿	
III-73	III-73-① 龙门山—大巴山(陆缘拗陷) FeCuPbZnMnY-P-S重晶石铝硅成矿带	下寒武统水井沱组、箬竹寺组	保康县龙洞河钒矿、房县九道银钒矿	
III-77	III-77-① 滇东—川南—黔西PbZnFeREE-Mn磷硫铁矿钙芒硝煤层气成矿亚带	下震旦统陡山沱组、下寒武统牛蹄塘组、梅树村阶	兴山白果园银钒矿、永顺朗溪钒矿、金沙箐口钒矿	
III-78	江南隆起西段SnWAgSbFeMnCu重晶石滑石成矿带	下寒武统牛蹄塘组、梅树村阶	桃源王家坪钒石煤矿、古丈县岩头寨钒矿、鲁冲—铁溪钒石煤矿	
华南成矿省	III-86	湘中—桂中北(拗陷) SnPbZnWFeCuSbHgMn成矿带	下寒武统牛蹄塘组、下泥盆统塘丁组	新邵县棉花岭钒矿、双峰县新立钒矿、上林县大丰钒矿
	III-88	桂西—黔西南—滇东东北部(右江海槽) AuSbHgAgMn水晶石膏成矿带	下泥盆统塘丁组	德保县中列磷钒矿、崇左市先洋钒矿
	III-89	滇东南南部SnAgPbZnWSbHgMn成矿带	下寒武统浪木桥组	屏边县伍家寨钒矿

注: *成矿区带的编号及名称据徐志刚等(2008)。

亦与赋矿地层的成岩时代一致。中国沉积型钒矿的从新元古代到二叠纪均有成矿活动,其中尤以早寒武世最为重要,这一时期沉积的钒矿查明资源量占了总沉积型钒矿的87.84%。其次为泥盆纪和震旦纪晚期,资源量占比分别为4.35%和4.03%

(图4)。

近年来随着测年方法的不断丰富,沉积型钒矿床的成矿年龄也有了较可靠的数据。如Horan et al.(1994)对湘黔地区下寒武统黑色页岩中的硫化物层用Re-Os法厘定的同位素年龄为(560±30)Ma;

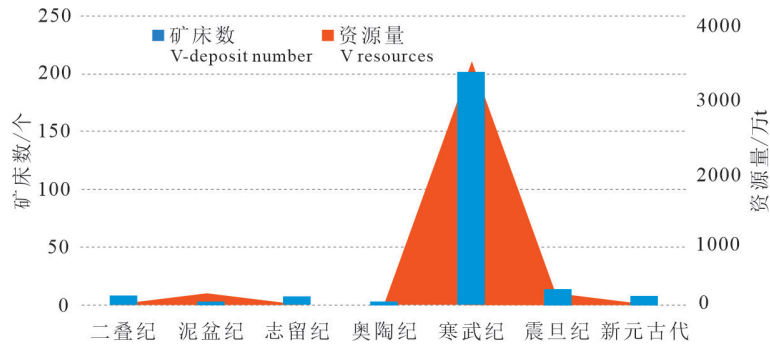


图 4 沉积型钒矿床的成矿时代及对应的资源量

Fig.4 Metallogenic age and corresponding resources of sedimentary V-deposits

李胜荣等(2002)获得黔北和湘西黑色岩系多金属矿矿石的 Re-Os 等时线年龄为 (542 ± 11) Ma; Mao et al.(2002)对华南寒武纪黑色页岩系多金属成矿带中的黔北黄家湾 Ni-Mo-PGE 矿床中水云母黄铁矿层进行了 Re-Os 同位素测年, 获得等时线年龄为 (541.3 ± 16) Ma; Jiang et al.(2003)对牛蹄塘组最底部火山灰层中的锆石进行了 U-Pb 定年, 得出结果为 (532.3 ± 0.7) Ma。这些研究数据精确地厘定了大洋缺氧事件, 有效地示踪了当时的成岩环境(杨競红等, 2005), 代表了同沉积钒矿的形成时间。

3.2.3 赋矿地层及成矿作用

沉积型钒矿产出的 8 个系级地层分别与我国不同区域不同地质历史上经历的缺氧事件相对应, 表 3 中列出了我国沉积型钒矿的含矿层位及相关岩性组合。不同的岩性组合对产出矿产的种类有着一定的影响, 如与 U-Mo-V、Ni-Mo-V 成矿有关岩石组合主要为含较多有机质的黏土质—硅质岩组合, 与 P-V、Mo-V、Ag-V 成矿有关的岩石组合多为炭质页岩—硅质—碳酸盐质岩石组合, 说明在 Ni、Mo、U 成矿过程中, 热水流体的作用可能更明显。

下寒武统分布最为广泛, 产出钒矿床也最多, 为了更清楚了解其他含钒层系中钒矿的产出情况, 将非寒武系中的钒矿展示到图 5 中。

产于栾川群中的钒矿主要分布于北秦岭褶皱带的河南卢氏—栾川—南召一带(李自民等, 2013; 马东峰等, 2016), 赋矿层位为栾川群煤窑沟组上段的炭质板岩及含炭质片岩, 如卢氏县假沙爬钒矿, 矿床形成于秦岭碰撞造山后伸展构造演化时期, 沉积环境属板内裂谷拉张海侵阶段的浅海陆架—局

限台地(胡国辉等, 2019), 钒元素主要呈吸附状态存在于黏土矿物中。

南华系中的钒矿多是以锰矿的伴生矿物出现, 主要见于重庆秀山、贵州铜仁以及湖南凤凰等地, 如贵州普觉锰钒矿, 伴生钒的查明资源量(V_2O_5)达 50 余万 t, 瓦屋乾溪锰钒矿中钒的查明资源量 19 万 t, 均达中型规模。矿床形成于新元古代拉张下沉时期的裂谷盆地, 成岩环境为贫氧—缺氧环境(王佳等, 2023)。

震旦系中的钒矿主要分布于上扬子地块北缘和南缘, 有利的岩石组合为碳质页岩—含碳质灰岩、黑色硅质岩、碳质黏土岩。上扬子北缘的钒矿主要赋存于陡山沱组, 如湖北宜昌的白果园银钒矿、金家沟银钒矿, 四川达州的隔档溪钒矿等。上扬子南缘钒矿主要赋存于灯影组、留茶坡组中, 如贵州黔东南的注溪钒矿、江古钒矿等。

下寒武统的黑色岩系具有全球等时性规模, 在我国境内分布也最为广泛, 从新疆塔北缘到秦岭—大别成矿带, 再到扬子地块均有分布, 尤以扬子地块最为广泛, 区带内沉积的下寒武统黑色岩系不仅厚度大, 而且层位稳定, 产出的大型钒矿床最多, 岩头寨、新开塘等大型钒矿均产于这一层系。塔里木地块北缘在早寒武世时为沉降海侵的时期(高振家等, 1993), 从西部柯坪地区(如黑山、书盖提布拉克等钒矿等)到中部库鲁克塔格地区(如且干布拉克达阪银钒矿)再到东部的北山地区(如方山口磷钒矿、大水钒矿等), 断续构成了一条长上千千米的钒成矿带, 有利的成矿环境为上升洋流广泛发育的陆棚斜坡相, 受次氧化条件控制(于炳松等, 2003)。南秦岭地区从寒武纪到志留纪处于造山后

表3 中国沉积型钒矿床的含矿地层及岩性组合分布

Table 3 Ore-bearing strata and lithological associations of sedimentary V-deposits in China

纪	世	含矿地层及岩性	成矿元素	矿床实例
二叠纪	P ₃	吴家坪组含炭硅质岩(含煤线)、炭质页岩、铝质黏土岩	钒钼	四川旺苍菜子沟钒钼矿
	P ₂	上茆茆槽子群黑色泥页岩 茅口组含炭硅质岩	磷钒(钍) 硒钒钒	新疆阜康五工河磷钒矿 湖北恩施双河硒(钒钒)矿
	P ₁ -P ₂	弧峰组炭质页岩	钒钼(石煤硒)	重庆巫溪田坝钒钼矿、云阳牛角洞钒钼矿; 湖北恩施干坝沟石煤钒钼矿、利川龙圈坝石煤钒钼矿
泥盆纪	D ₂	东岗岭组炭质泥岩、硅质岩	磷钒	广西德保县都安磷钒矿、涪陵磷钒矿
	D ₁	塘丁组炭质泥岩	钒石煤银	广西上林大丰钒矿、崇左先洋石煤钒矿
志留纪	S ₂ -S ₃	白水江群含炭硅质板岩	钒	甘肃康县迷坝钒矿、舟曲庙儿沟钒矿
	S ₁	大贵坪组炭质硅质板岩	石煤钒	湖北房县马虎岭石煤钒矿、湖北竹山钻探岩石煤钒矿、陕西平利县堰沟钒矿
奥陶纪	O ₃ -S ₁	斑鸠关组炭质硅质板岩	钒	陕西白河县木瓜坪钒矿
		哈拉巴依沟组含炭质泥质板岩	钒钼钨族	青海格尔木大干沟口钒钼矿
寒武纪	C ₁	玉尔吐斯组炭质泥页岩	钒磷钍	新疆柯坪沙依里克磷钒矿、黑山钒钼矿; 乌什县土斯甘布拉克磷钒矿
		西山布拉克组黑色硅质岩、含钒炭质页岩	磷钒银钍	新疆尉犁县窝伦塔格磷钒矿、且干布拉克银钒矿
		双鹰山组炭质板岩	钒磷钨族	甘肃敦煌塔水磷钒矿、方山口钒钼矿、肃北县七角井子钒钼矿, 新疆哈密平天山钒钼矿、大水钒矿
		水沟口组含炭质硅质泥质及碳酸盐岩	钒金	陕西山阳岩中村钒矿、夏家店金钒矿, 商南县千家坪钒矿, 西乡县竹园钒矿, 河南内乡上集钒矿、浙川石槽沟钒矿、庙嘴钒钼钒矿
		鲁家坪组	钒镍钨银	陕西岚皋县沙沟钒矿、略阳县沙坝坪钒钼矿、镇巴县陈家岭钒矿、重庆城口县北屏乡钒钼矿
		荷塘组	钒磷石煤磷钨钒	安徽黟县石山石煤钒矿、江西彭泽县李家山钒矿、浙江安吉县上市钒石煤矿
		牛蹄塘组	钒石煤磷钨钒钨钼银钨钼族	贵州瓮安县小河山钒钼矿、贵州镇远县中寨钒矿、湖北房县三甲垭钒钼矿、湖南古丈县岩头寨钒矿、湖南会同县鲁冲—铁溪钒石煤矿、重庆酉阳县梨子坪磷钒钼矿
		王音辅组	钒	江西武宁大坑钒矿、湖北崇阳县东山钒矿
		庄子沟组	钒银钨钨石煤重晶石	湖北郧县大柳钒钼矿、湖北丹江口市杨家堡石煤钒矿
		浪木桥组	钒	云南屏边县伍家寨钒矿
梅树村组	钒钨钨钨	贵州天柱县大河边钒矿		
九门冲组	钒钨钨	贵州施秉县新城钒钼矿、贵州江口县盘坡钒矿		
震旦纪	Z ₂	留茶坡组黑色硅质岩、炭质黏土岩	钒钨钨钨	贵州注溪钒矿、江古钒矿、罩子山钒矿
		灯影组	钒(铜)	陕西省岚皋县花坝钒(铜)矿、江西永修杨林山钒矿
		烧火筒组炭质千枚岩	钒	内蒙古阿拉善大沟井钒矿
南华纪	Nh ₂	莲沱组黑色页岩	钒钨	湖南娄底双江钒钨矿
		陡山沱组黑色页岩、含炭质白云岩	银钒钨钨	湖北兴山白果园银钒矿、湖北宜昌金家沟银钒矿
青白口纪	Qb ₂ -Nh ₁	大塘坡组	钨钒	贵州铜仁乾溪钨钒矿、重庆秀山大雁山钒钨钨矿
青白口纪	Qb ₂ -Nh ₁	栾川群煤窑沟组炭质板岩	钒(铁)	河南栾川黄土岭钒矿、河南卢氏县假沙爬钒矿、河南南召县秋树盘钒矿

注: *成矿区带的编号及名称据徐志刚等(2008)。

伸展阶段,早寒武世时期发育了富硅、炭质的巨厚陆缘裂谷沉积(徐林刚等, 2022),形成了中村、千家坪等一批钒矿。

与奥陶系有关的钒矿床主要分布在陕西、青海等地,根据目前资料,赋矿地层多为与下志留统未

分的地层(如陕西的斑鸠关组、青海的哈拉巴依组),故在此与志留系合并讨论。产于上奥陶统一下志留统中的钒矿主要分布于秦岭—大别成矿带,如甘肃甘南的庙儿沟钒矿、迷坝钒矿,陕西白河县木瓜坪钒矿(杨涛等, 2021),陕西安康的堰沟钒矿、

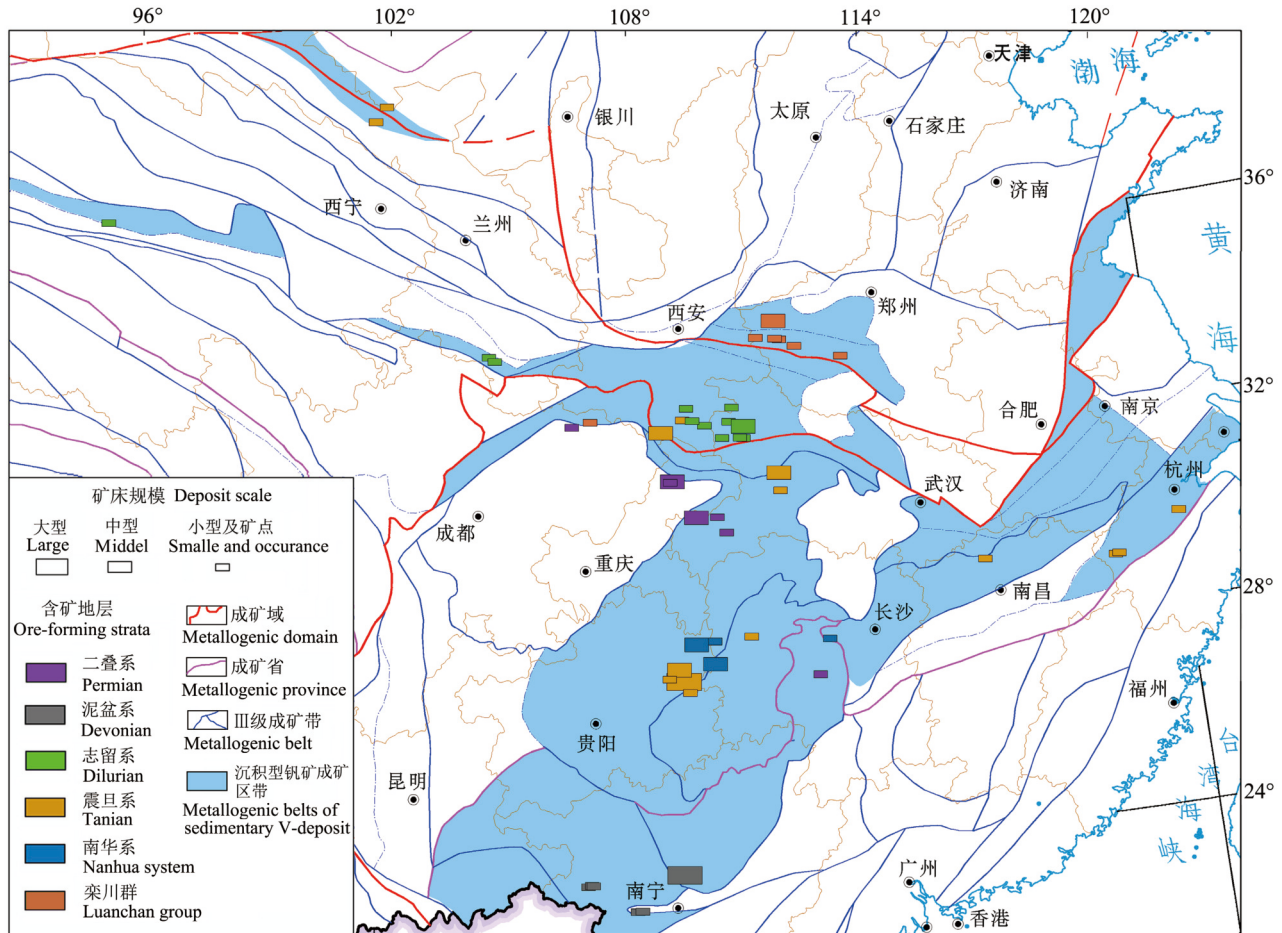


图 5 非寒武系不同层位的钒矿分布图

Fig. 5 Distribution of V-deposits in different stratigraphic layers (excluding Cambrian)

马尿坑钒矿, 湖北十堰的四棵树钒矿、三池钒矿等, 青海省东昆仑山南坡祁连县一带亦有分布(张勤山等, 2020)。含矿岩性主要为炭质板岩、炭硅质板岩、炭质粉砂岩等, 钒矿的规模均较小。

泥盆系中的钒矿主要见于广西中部, 与石煤矿共生, 如上林县大丰大型钒矿, 矿体产于下泥盆统塘丁组, 岩石组合为炭质泥岩、含炭硅质岩夹泥晶灰岩, 矿床查明资源量 208 万 t, 平均品位 1.1%。桂北地区在泥盆纪时处于自南向北的海侵(叶杰和范德廉, 2000)时期, 当地的气候条件为热带—亚热带低纬度区, 有利于生物的发育, 滞流的台间海槽导致了缺氧环境, 沉积了一套含钒的黑色岩系。到晚泥盆世, 海侵达到最大规模, 海水最深, 不利于钒矿沉积, 因此, 钒矿只见于该区下—中泥盆统。

二叠系中的钒矿主要分布于扬子地块北缘, 如湖北的恩施、重庆的巫溪以及四川的旺苍等地, 塔

里木板块北缘的新疆阜康地区也有产出。成矿多与 Mo、U、磷、石煤相伴生, 规模可达中型(如重庆田坝钒矿)。有利的岩石组合为含炭硅质岩(含煤线)、炭质页岩、铝质黏土岩。

3.3 岩浆型钒矿的时空分布规律

3.3.1 空间分布规律

与铁镁质基性—超基性岩有关的钒钛磁铁矿的形成主要与切壳的深大断裂有关, 如攀西钒钛磁铁矿带, 即产于康滇隆起内的攀西裂谷带; 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内的崇礼—隆化深大断裂带; 山东沂水地区的钒钛磁铁矿床, 产于胶东(古元古代)陆缘裂谷胶北陆缘岩浆带; 东天山地区的岩浆型钒钛磁铁矿的形成环境为晚古生代陆内裂谷(图 6, 表 4)。

从图表看, 岩浆型钒矿分布范围较广, 然而, 从矿床规模来看, 资源仍然主要集中在康滇隆起(攀枝

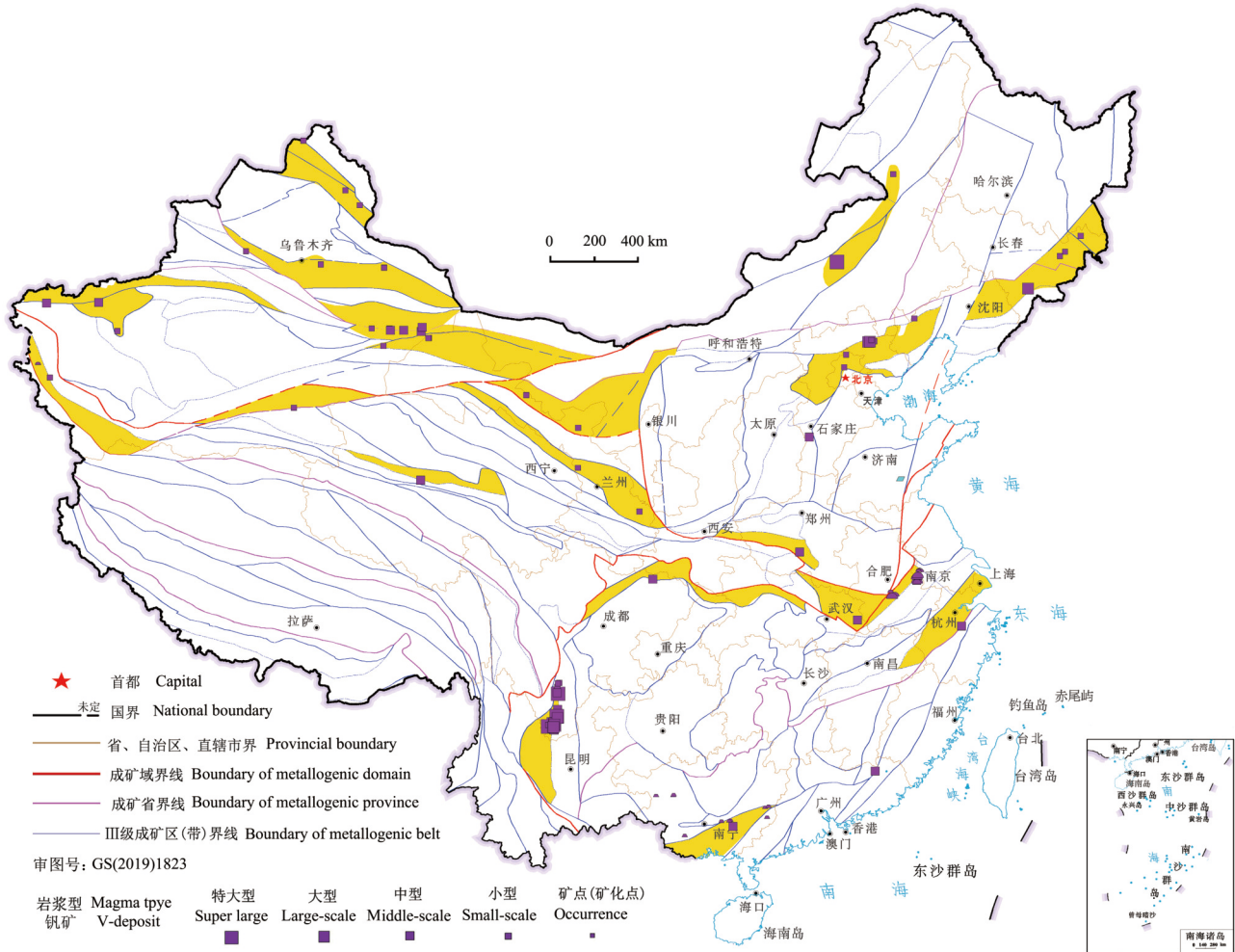


图6 岩浆型钒矿分布范围

Fig.6 Distribution of mineralization zones of magmatic V-deposits

花、西昌地区)及华北地块北缘(承德地区)。这两个区带内的岩浆型钒查明资源量占全国岩浆型钒矿总量的83%。

3.3.2 时间分布规律

中国岩浆型钒矿主要与各个时期的基性—超基性岩浆岩有关,从岩浆型钒矿的成矿时代统计图(图7)上可以看出,产于二叠纪的矿床最多,其次为石炭纪和元古宙,据资源量统计,最主要的成矿时代为二叠纪,其次为元古宙。

二叠纪钒矿资源量占了总岩浆型矿床的88.32%,主要来源于攀枝花地区,与印支期峨眉山大火成岩省有关,典型矿床为攀枝花钒钛磁铁矿;元古宙的钒资源量占了总岩浆型矿床的8.72%,主要来源于华北地台北缘的基性—超基性岩带,典型矿床为大庙钒钛磁铁矿,相关统计见图3。

产于石炭纪的岩浆型钒矿床主要位于新疆、青海一带,查明资源量较少,与其勘查程度低有关,目前没有更详尽的资料。

3.3.3 成矿岩体及成矿作用

形成岩浆型铁矿的侵入体为超镁铁质岩体,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,如攀枝花钒钛磁铁矿、震岚钒钛磁铁矿;其次是斜长岩杂岩体,如大庙钒钛磁铁矿;一些超贫铁矿的成矿岩体为辉石角闪石岩体、角闪石岩体和辉绿岩脉等(李厚民等,2012),如红山嘴超贫钒钛磁铁矿等。成矿的母岩浆主要来自上地幔,成矿作用主要为结晶分异作用和矿浆熔离作用(张招崇等,2014),成矿岩体往往分异良好、韵律结构发育,矿床直接产于各个韵律层的下部。分异作用愈彻底时,含矿组分愈富集。

表 4 岩浆型钒矿产出的成矿区带
Table 4 Mineralization zones of magmatic V-deposits

成矿省	III级成矿区带		成矿时代	代表性钒矿床
	编号	名称		
阿尔泰成矿省	III-2	南阿尔泰CuPbZnFeAu稀有白云母宝石成矿带		扎曼哈巴钒钛磁铁矿
	III-3	北准噶尔CuNiMoAu成矿带	早石炭世	哈旦孙钒钛磁铁矿
准噶尔成矿省	III-6	准噶尔南缘CuMoAuWFeCrMn稀有硼石墨透闪石玉成矿带	石炭纪	锅底山钒钛磁铁矿、吉木萨尔县新地沟
	III-8	III-8-① 觉罗塔格FeCuMoNiAuAg石膏硅灰石膨润土煤成矿带	石炭纪	苦水钒钛磁铁矿、雅西库东钒钛磁铁矿
	III-12	III-12-① 卡瓦布拉克—星星峡—早山FeTiAgPbZn白云母成矿亚带	二叠纪	库姆塔格钒钛磁铁矿、尾亚东钒钛磁铁矿
塔里木成矿省	III-12	III-12-④ 阔克沙岭AuSbPbZnAnMn石膏铝土矿石墨成矿亚带	石炭纪	沙里塔什北钒钛磁铁矿
	III-13	III-13-① 柯坪FeVTiPbZn磷石墨金刚石成矿亚带	二叠纪、泥盆纪	皮羌钒钛磁铁矿、普昌钒钛磁铁矿
	III-14	III-14-① 公婆泉(甘—蒙北山南部) FeMnCuPbZnWSn RbV-U-P成矿亚带	石炭纪	红柳河钒钛磁铁矿、羌县1485钒钛磁铁矿
阿尔金—祁连(造山带)成矿省	III-19	阿尔金AuCr石棉和田玉成矿带	二叠纪	若羌塔特拉克钒钛磁铁矿
	III-21	北祁连CuPbZnFeCrAuAg硫铁矿石石棉成矿带	奥陶纪?、志留纪	大滩钒钛磁铁矿、高家峡钒钛磁铁矿
昆仑(造山带)成矿省	III-26	III-26-② 东昆仑北部(断隆/岩浆弧) FePbZnCuCoW SnAu石棉成矿亚带	石炭纪	格尔木市大干沟钒钼矿
	III-27	III-27-① 西昆仑北部FeCuPbZnRM-REE硫铁矿水晶白云母宝石成矿亚带	二叠纪	叶明拉合钒钛磁铁矿
大兴安岭成矿省	III-49	白乃庙—锡林浩特 FeCuMoPbZnMnCr(Au)Ge煤天然碱芒硝成矿带	石炭纪	扎布其铜铁钒矿
	III-52	III-52-② 小兴安岭—张广才岭(造山带) FePbZnCu MoW成矿亚带	晚三叠世	汪清县南城子钒钛矿
吉黑成矿省	III-55	III-55-② 延边AuCuPbZnFeNiW成矿亚带	晚三叠世	宣羊砬子钒钛磁铁矿点、青林子钒钛磁铁矿点
	III-18	阿拉善(隆起) CuNiPtFeREE-P石墨芒硝盐类成矿带	志留纪	板打沟钒钛磁铁矿、永昌大口子铁矿
	III-56	III-56-① 铁岭—靖宇(次级隆起) FeAuCuNiPbZn成矿亚带	古元古代	五道羊岔铁钒钼矿
华北(陆块)成矿省	III-57	III-57-① 内蒙古隆起东段FeAuAgPbZnMoU磷煤膨润土成矿亚带	太古代	姜家沟钒钛磁铁矿
	III-57	III-57-② 燕辽(次级拗陷、拉张) CuMoPbZnAgAuFe Mn煤成矿亚带	中元古代	大庙钒钛铁矿、黑山钒钛铁矿
	III-63	III-63-③ 小秦岭—豫西AuMoWFePbZn硫铁矿萤石成矿亚带	古元古代	方城张行庄钒钛铁矿
秦岭大别成矿省	III-67	III-67-① 桐柏—大别AgAuCuZnMoFe金红石墨珍珠岩成矿亚带	中元古代	石鼓冲钒钛磁铁矿床、
下扬子成矿省	III-71	III-71-③ 关于山—杭州湾CuFeNbTa滑石硅灰石萤石成矿亚带	青白口纪	石角(青顶山)钒钛铁矿
上扬子成矿省	III-76	III-76-① 康滇FeCuVTiSnNiREE-Au蓝石棉成矿亚带	晚二叠世	攀枝花钒钛磁铁矿、米易白马
华南成矿省	III-87	钦州(残海) AuCuMn石膏成矿带	早白垩世	横县谭村铁钒钼矿

4 中国钒矿资源潜力评价

4.1 沉积型钒矿的成矿模式及预测模型

综合成矿规律分析,沉积型钒矿的形成与拉张背景下海侵、缺氧环境、有机质吸附以及微生物的活动、热水作用等有关,这些特点组成了沉积型钒

矿床独特的找矿标志。

在沉积型钒矿的预测要素中,关键要素之一是含矿地层。对于沉积型钒矿,海侵、丰富的有机质、缺氧、热水作用是公认的成矿控制因素,需要从这几方面去进一步细分地层的沉积相,甄别成矿有利性。以寒武系分布最为广泛的华南地区(图 8)为

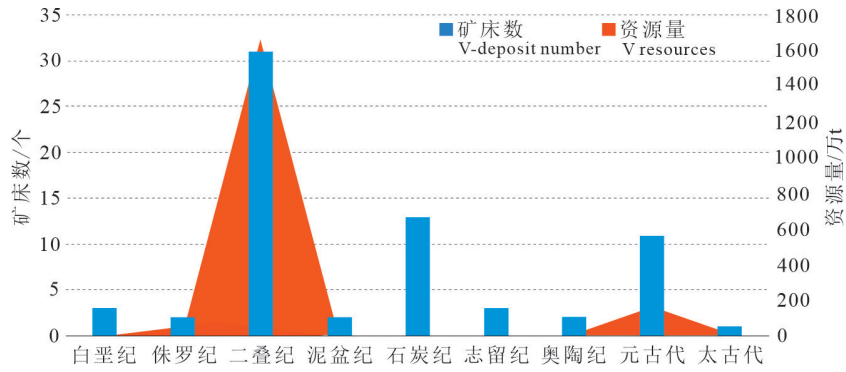


图7 岩浆型钒矿床的成矿时代及对应的资源量
Fig.7 Metallogenic age and corresponding resources of magmatic V-deposits

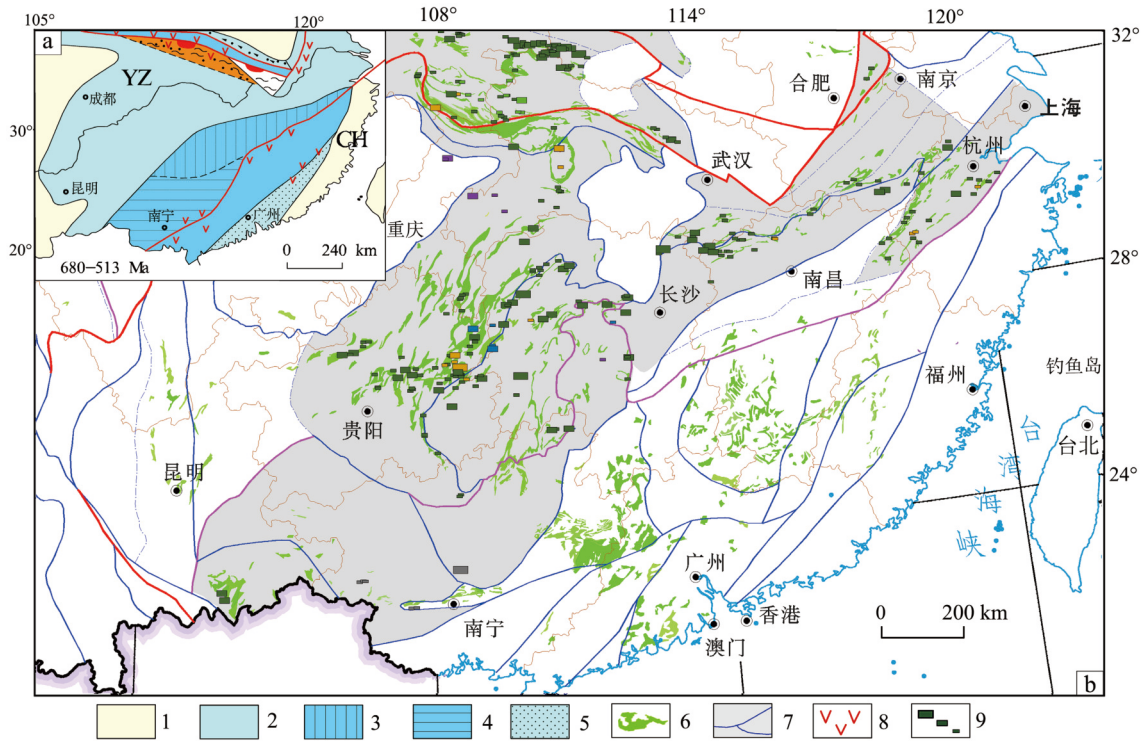


图8 华南晚震旦纪—早寒武世构造图(a, 万天丰, 2011)与华南寒武系地层、沉积型钒矿分布图(b)
1—古陆剥蚀区; 2—浅海凹陷、沉积带; 3—半深海硅质页岩; 4—半深海火山复理石沉积; 5—陆缘碎屑沉积区; 6—寒武系; 7—钒成矿区带及边界; 8—火山岩分布区; 9—沉积型钒矿

Fig.8 Late Sinian–Early Cambrian structural map of South China (a, after Wan Tianfeng, 2011) and distribution of Cambrian strata and sedimentary V-deposits in southern China (b)

1–Ancient land erosion area; 2–Shallow sea depression, sedimentary belt; 3–Semi-deep-sea siliceous shale; 4–Semi-deep sea volcanic flysch deposition; 5–Terrigenous clastic sedimentary area; 6–Cambrian; 7–V-metallogenic belt and boundary; 8–Volcanic rock distribution area; 9–Sedimentary V-deposit

例, 钒矿床主要产于西北部即扬子地块范围内, 东南部华夏地块内的寒武系中, 基本没有成规模的钒矿产出, 原因主要在于成矿环境与储存环境的差异。新元古代古华南洋闭合后, 扬子地块与华夏地块聚合成的古华南海陆, 受成冰期 Rodinia 超大陆

裂解构造应力影响, 再次扩张裂解, 整个华南在晚震旦纪—早寒武世为一个陆内海盆(张国伟等, 2013)。扬子地块当时的沉积环境处于浅海凹陷、陆缘斜坡盆地(图8a), 沉积组合以炭质页岩、炭质泥岩、硅质岩为主, 浅水环境比较适合海藻等浮游

生物生长,生物有机质为钒矿的富集和保存提供了有利条件。华夏地块的沉积环境较扬子地块更深,下沉和堆积迅速,碎屑沉积物明显增多,只在局部地区出现闭塞的滞水环境,沉积了有限的黑色岩系,如广东的大茅群(广东省地质矿产局,1988)和福建的林田群(福建省地质矿产局,1985)等,以碎屑岩沉积为主,有利成矿的黑色炭质页岩、炭质板岩只呈透镜状、结核状出现,在华夏地块内找到成规模的沉积型钒矿的可能性相对较小。

除了特定沉积环境下的有利的沉积地层外,有利的岩石组合也是预测该类型矿床的重要要素,如含较多有机质的黏土质—硅质岩组合,多与U—Mo—V成矿有关。炭质页岩—硅质—碳酸盐质岩石组合。多与P—V、Mo—V成矿有关。

以扬子地块早寒武世钒成矿为例,矿床的成矿模式可以描述为:在震旦纪与寒武纪转折期,存在一次较大范围的缺氧事件。这一时期,古华南大陆裂解形成的断陷盆地继续拉张裂陷,海平面迅速上升,受古构造控制作用,地形分割成水下隆起和凹陷,在凹陷部位形成局限性滞流的深水盆地,有利于有机质的堆积富集(吴朝东等,1999)。拉张作用导致局部性的火山喷溢作用和海底热流活动,从地球深部带来了部分V、Ni、Mo等成矿物质。环境的改变导致海水中的菌藻类大量死亡堆积,有机质降解的耗氧过程促进了缺氧环境的形成(叶杰和范德廉,2000),钒在缺氧环境下在有机质中优先被结合,形成了初始矿源层。成岩阶段,随着环境中物

理化学条件的改变,泥质黏土转变为伊利石(水云母),从生物体中释放出来的钒与黏土矿物吸附的钒便进入有机质参与成矿(图9)。总的来讲,沉积型钒矿的成矿作用是以沉积作用为主,局地会受火山作用影响,表现出生物与海底热水双重作用特征(施春华等,2013)。

沉积型钒矿的区域预测要素如表5。

4.2 岩浆型钒矿的成矿模式及预测模型

岩浆型钒矿的预测要素(表6)中,特定的基性—超基性杂岩体是必要条件。以攀枝花钒钛磁铁矿为例,矿床的成矿模式(宋谢炎和陈列锰,2012)可以描述为:在华力西期裂谷构造周期性扩张背景下,液态幔源岩浆上升到上地幔石榴子石稳定区,发生部分熔融,形成富Fe的岩浆;这种岩浆在地壳深处发生了较强烈的橄榄石和辉石分离结晶,由于V和Ti相对于这两种矿物均为不相容元素,因此大量富集在了残余岩浆中;分离结晶作用还使得残余岩浆的氧逸度增高,当残余岩浆上侵到当前的岩浆房中时,钛铁氧化物达到过饱和而发生结晶,并在重力作用下沉降,在岩浆房下部堆积成矿。如果构造环境为周期性扩张,岩浆会呈脉动式上侵补充,每一次的上侵,都会在底部沉淀一层比重大的钒钛磁铁矿,从而形成多层矿,这种矿床的规模往往较大。成矿过程中,V和Fe表现出完全的正相关性,Fe含量高的位置V的含量也高。成矿模式如图10。

4.3 关于共生矿产的预测

钒矿的独立矿床很少,大部分是以伴生的形式

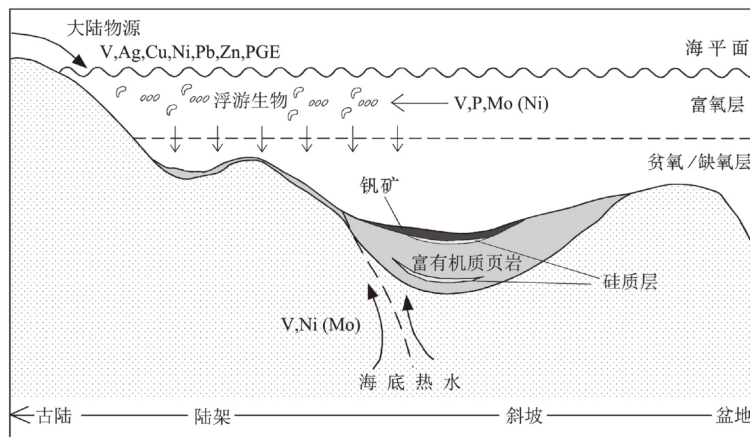


图9 沉积型钒多金属成矿模式图(据施春华等,2013;韩善楚,2013修改)

Fig.9 Metallogenetic model of sedimentary polymetallic V-polymetallic deposits (modified from Shi Chunhua et al., 2013; Han Shanchu, 2013)

表 5 沉积型钒矿床预测要素

Table 5 Prognosis model of sedimentary type V-deposits

预测要素	要素特征描述	分类
大地构造背景	大陆边缘和拉张活动环境, 以及由拉张断裂控制的裂陷槽, 且裂陷槽内地势起伏。具体的成矿环境包括: 离散裂谷、汇聚状态相伴随的离散裂谷、拗拉谷、孤立—半孤立的只有有限水循环的缺氧盆地等	必要
地层	地球缺氧环境下沉积形成的还原性黑色岩系。主要包括了: 新元古界下部的栾川群煤窑沟组(河南), 上南华统大塘坡组(贵州、重庆), 下震旦统陡山沱组(湖北)、莲沱组(湖南)烧火筒沟组(内蒙古), 上震旦统灯影组(陕西、江西)、留菜坡组(贵州), 含矿层位还包括上奥陶统一世留统的哈拉巴依沟组(青海)、斑鸠关组(陕西), 下世留统的大贵坪组(湖北、陕西), 中上志留统的白水江群(甘肃), 下泥盆统的塘丁组(广西)、中泥盆统东岗岭组(广西), 下中二叠统的弧峰组(河北、重庆)、茅口组(湖北), 以及上二叠统吴家坪组(四川)、上茂茆槽子群(新疆)。最重要的是下寒武统, 包括: 玉尔吐斯组(新疆)、西大山组(新疆)、西山布拉克组(新疆)、双鹰山组(甘肃)、水沟口组(陕西、河南)、鲁家坪组(陕西、重庆)、荷塘组(安徽、江西、浙江)、牛蹄塘组(湖南、贵州、重庆)、王音辅组(湖北、江西)、庄子沟组(湖北)、九门冲组(贵州)、梅树村组(贵州)、浪木桥组(云南)等	必要
岩石组合	含较多有机质的黏土质-硅质岩组合(多与U-Mo-V成矿有关), 炭质页岩-硅质-碳酸盐质岩石组合(多与P-V、Mo-V成矿有关)等	重要
地球化学特征	Mo-Ni-V-Co-U-Au-S多元素组合异常; 有机质含量高(有生物、微生物和有机组分的积极参与)	重要
共伴生矿产	通常与沉积的磷矿、重晶石矿、石煤矿在同一层位, 互为找矿标志	重要
古地理环境	低纬度地区, 古气候温热, 古大洋的浅海陆棚, 宁静闭塞的滞水盆地, 菌灰和藻类生物丰富	重要
矿产地	存在已知的钒矿床、矿点、矿化点, 互为找矿线索的沉积型镍、钼、磷、铀矿等	重要

表 6 岩浆型钒钛磁铁矿预测要素

Table 6 Prognosis model of magmatic type Fe-V-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), 如: 扬子地块西缘的盐源—丽江台缘拗陷、康滇隆起、华北地块北缘深大断裂、塔里木板块西北缘中生代裂谷、南天山褶皱带	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	岩浆型钒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

产出。在对以共伴生形式为主的矿产进行预测时, 应注意更深入全面地研究典型矿床, 尤其是被预测矿种与主矿种之间在成矿过程、成矿环境、物质来源等方面的相关性, 才能更有效地甄别有利成矿要素, 实现更精准的预测。

如在磷钒矿中, 磷和钒是作为共生组分产出, 两者成因上相关、空间上共存, 然而在纵向上常表现出磷矿层常位于钒矿层下方的分带特征(赵省民等, 2002; 李军等, 2019; 赵杰, 2022), 如方山口钒磷矿、平台山磷钒矿等, 在横向上两矿种的矿体分布范围常常不完全重合, 且在磷结核较多的层段, 钒品位往往较低, 表现出“异体共生”的特点。形成的原因可能是相同大沉积环境下因海平面震荡等因素引起的小环境的差异, 当海平面上升, 海水动力增加, 随着上升洋流带来的成矿物质在压力、温度

等发生变化时沉淀, 沉积了多结核的磷矿层; 当海平面下降, 形成局限的新鲜海水补给率低的海湾环境, 菌类、藻类生物的死亡腐化导致更加缺氧的还原环境, 沉积了钒矿层; 另外, 磷酸盐的沉积要求为弱碱性, 钒的沉积环境为偏酸性, 也是造成成矿分带的原因之一。

在镍钼钒矿床中, 镍钼矿层往往位于钒矿层的中上部。Algeo and Tribovillard(2009)研究认为V和U在沉积物中的富集代表着缺氧的弱还原环境, 如闭塞的浅海陆缘海盆, 而Ni和Mo成矿可能受海底喷流作用影响(毛景文等, 2001; 王立社, 2009; 游先军, 2010; 付勇等, 2021), 形成于H₂S丰富的强还原环境。虽然在找矿预测时, 这些伴生的矿种可以作为寻找沉积型钒的一种标志, 但在精确定位时, 还应该尽可能通过更详细的矿物组合、微量元素的差

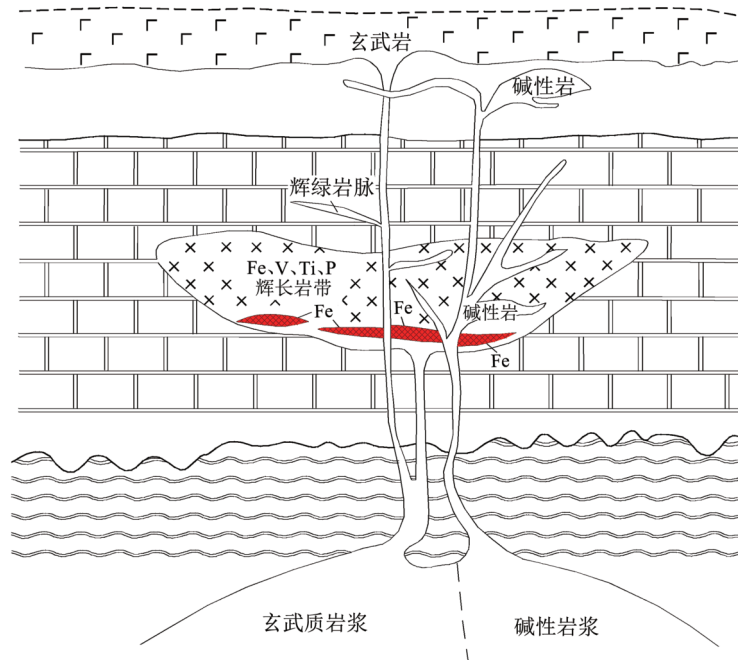


图 10 攀枝花矿床成矿模式图

Fig.10 Metallogenic model of Panzhihua magmatic Fe-V-Ti deposits

异等来细分成矿小环境。

在岩浆型钒钛磁铁矿中, V 是作为有益的伴生组分而存在, 由于 V^{3+} 与 Fe^{3+} 离子半径相近, 几乎完全以类质同象替代的形式均匀地分布于磁铁矿和钛磁铁矿的尖晶石型晶体结构中。研究表明(Song et al., 2009; 刘明培, 2009), V 与 Ti、Fe 之间呈完全的正相关关系, 在矿床中 Ti、Fe 丰富的矿段 V 必然也丰富。因此, 此类钒矿的预测区圈定可以与该类型铁矿的预测区完成一致, 甚至可以根据 Ti、Fe 预测量直接估算 V_2O_5 的预测量。

4.4 预测结果

根据地各类型矿床的预测要素提取预测图层, 对各预测图层进行空间分析, 通过与模型区的类比, 圈定出不同类型钒矿的预测区, 再运用证据权法等统计学方法对预测区进行优选分级。本次钒矿潜力评价共圈定预测区 213 个(图 11), 其中, A 类预测区 32 个, B 类预测区 85 个, C 类预测区 96 个。

以模型区的品位、吨位、矿体产出深度等数据为基础, 建立定量预测模型, 对预测区进行资源潜力估算。本次共预测了 2000 m 以浅未查明资源量 V_2O_5 2.37 亿 t。其中 72% 为沉积型钒矿, 为主导类型, 主要分布在贵州、湖南、陕西等省; 21% 为岩浆

型钒矿, 主要分布在四川、安徽、新疆等省(区)。

根据预测结果, 优选了不同类型、成矿条件较好、资源潜力较大、埋藏较浅的 A 类预测区, 作为未来的找矿勘查部署中首批重点关注的地区(表 7)。

5 结 论

(1) 中国钒矿资源禀赋特征为: 矿床类型相对简单; 共伴生组份多, 综合利用价值高, 但对选冶技术、成本要求也高; 资源丰富, 但矿床品位较低; 资源量分布集中, 四川、湖南、贵州、湖北、河南和陕西 6 省占了全国查明资源量 80% 以上。

(2) 中国钒矿矿床类型主要为与黑色岩系有关的沉积型和与基性—超基性岩有关的钒钛磁铁矿型, 少量与玢岩型铁矿有关的火山岩型、与石墨矿伴生的沉积变质型、与铝土矿相伴生的风化壳型。

(3) 本次钒矿潜力评价共圈定预测区 213 个, 预测显示中国陆域内仍然有较大的资源潜力。富含有机质的黑色岩系有关沉积型钒矿仍为主要类型, 最重要的潜力区带主要是位于扬子地台和秦岭褶皱带的下寒武统中, 找矿过程中应注意同时评价同类型镍、钼、钴、锰、磷、重晶石等矿产, 可互为找矿标志。其次为岩浆型钒钛磁铁矿, 重要的潜力区

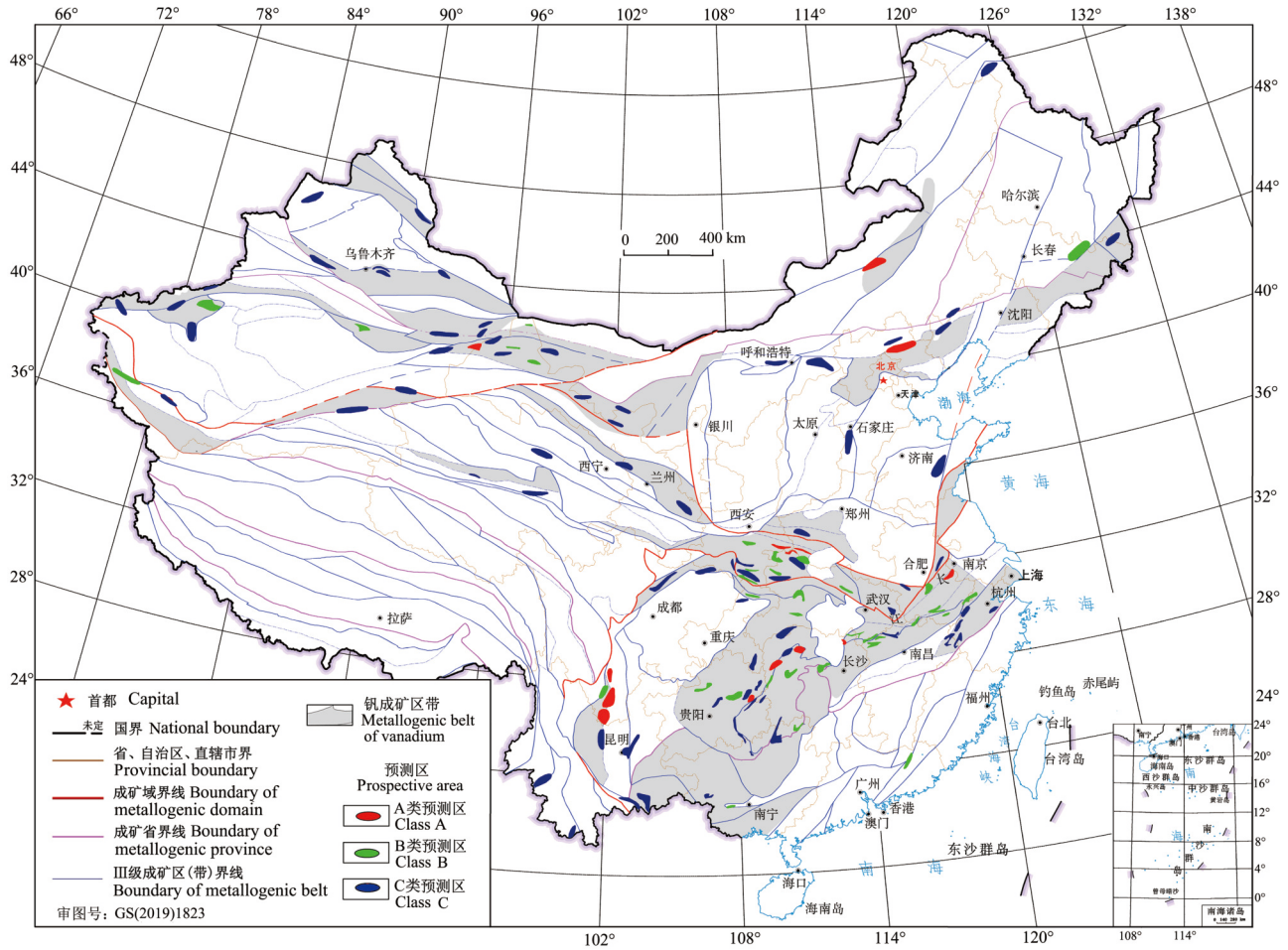


图 11 中国钒矿预测区分布图
Fig.11 Distribution of V prospecting areas

表 7 成矿条件良好的钒矿远景区

Table 7 Prospective V-deposit areas in favorable metallogenetic conditions

序号	名称	地理位置	预测深度/m	资源潜力/万t	类别	主攻类型	已有矿床	已有资源量/万t
1	攀枝花	四川攀枝花	1300	728.02	A	岩浆型	攀枝花、潘家田、安宁村、中干沟等	1454.03
2	太和	四川西昌太和	1300	281.17	A	岩浆型	太和、峰子崖、杨河	490.96
3	白马	四川米易	1800	230.12	A	岩浆型	白马、新街、巴洞	821.33
4	黑山	河北滦平—承德	1000	290.83	A	岩浆型	黑山、大庙、大庙东沟、乌龙素沟等	112.64
5	岩头寨	湖南古丈	1000	958.71	A	沉积型	岩头寨、古者	406.61
6	木老坪	贵州余庆	1680	844.12	A	沉积型	构皮滩	65.91
7	新开塘	湖南岳阳	1000	664.6	A	沉积型	新开塘、郭镇	205.27
8	鱼洞	陕西山阳	660	583.11	A	沉积型	千家坪、中村、夏家店、湘河等	263.73
9	芝麻	贵州遵义汇川区	1820	433.1	A	沉积型	常溪水	—
10	松林	贵州省红花岗区	1810	377.19	A	沉积型	冉村沟	4.68
11	何家壩	湖北郧县	530	328.09	A	沉积型	何家壩、大柳、青木沟、青马池等	120.79
12	走马坪	湖北鹤峰	730	310.95	A	沉积型	走马坪、朗溪	125.44
13	上集—大桥	河南浙川—内乡	1500	245.0841	A	沉积型	石槽沟、大桥—上集、西簧、李家湾等	149.11
14	钟家铺	湖南桃源	1000	217.99	A	沉积型	钟家铺、大浒、王家坪	133.92
15	平溪	贵州黄平	1180	1131.68	B	沉积型	翁岩	1.15
16	罗河	安徽庐江	1000	226.75	B	岩浆型	罗河、泥河、钟山、钒山	79.13
17	包耳坳	贵州施秉	1460	1325.04	C	沉积型	芭蕉坪	—
18	尖山	安徽马鞍山	1000	735.98	A	火山岩型	和尚桥、高村、白象山等	175.57

主要分布在四川的攀西、河北的大庙以及新疆的天山等地。

(4) 钒的应用前景广阔。目前中国仍是世界第一大钒资源国、生产国和消费国。然而受资源禀赋、选冶技术水平等影响, 钒资源综合利用水平较低, 资源浪费较大。要想使我国保持在国际钒资源市场的重要地位, 就需要从可持续发展的角度出发, 进一步强化矿产开发的科技支撑, 培养我国的钒资源优势, 建议: ①岩浆型钒矿仍然是钒矿产品的主要来源, 因此建议加大岩浆型钒钛磁铁矿的找矿投入, 尤其是对生产矿产深边部攻深找盲, 保证已有钒产业基地产能需求; ②沉积型钒矿资源量和潜力都很大, 建议加强选冶技术研发, 在成本经济的前提下, 提高综合回收率; ③加强对高纯度钒的分离提取技术攻关, 开发高端钒产品, 提高对钒资源的高效、高端开发利用。

致谢: 感谢审稿专家对文章提出了宝贵的修改意见, 感谢编辑老师的辛勤工作。

注释

①李汉玲. 1982. 江西省金溪县峡山石墨矿床伴生组分钒的综合评价与利用问题 [R]. 江西省矿产储量委员会, 1-11.

References

- Algeo T J, Tribouillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. *Chemical Geology*, 268(3/4): 211-225.
- 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).
- China Academy of Geology and Mineral Resources Information. 1996. Foreign Mineral Resources[M]. Beijing: Seismological Publishing House (in Chinese).
- Deng Zewen. 2012. Geological Characteristics and Genesis of Zhabuqi Iron Deposit of Ximeng, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jiling University, 1-68 (in Chinese with English abstract).
- Fan Delian, Zhang Tao, Ye Jie, et al. 2004. Black Rock Series and Related Mineral Deposits in China [M]. Beijing: Science Press, 1-421 (in Chinese).
- Fujian Geology and Mineral Resources Bureau. 1985. Regional Geological Records of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Fu Yong, Zhou Wenxi, Wang Huajian, Qiao Wenlang, Ye Yuntao, Jiang Ran, Wang Xiaomei, Su Jin, Li Di, Xia Peng. 2021. The

- relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 536-548 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongzhang. 2019. Vanadium resources and its supply and demand situation in Chian[J]. *China Mining Magazine*, 28(S2): 5-10 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhenjia, et al. 1993. Precambrian Geology, No. 6—Precambrian in Northern Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-171 (in Chinese).
- Goldberg I. 1992. International Strategic Minerals Inventory Summary Report—Vanadium.[M] Denver, U. S. GPO.
- Guangdong Geology and Mineral Resources Bureau. 1988. Regional Geological Records of Guangdong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hao Wenli, Sun Guibin, Wen Li. 2008. Discussion on the economic value and comprehensive development of vanadium mine associated with Liuniao graphite mine in Jixi city[J]. *Heilongjiang Land and Resources*, (5): 75 (in Chinese).
- Han Shanchu. 2013. Superimposed Biotic, Hydrothermal and Seawater Mineralization and Its Variations in Early Cambrian Black Shales of South China: Case Studies Based on Ni-Mo and Barite Deposits[D]. Nanjing: Nanjing University, 1-130 (in Chinese with English abstract).
- Han T, Fan H F, Zhu X Q, Wen H J, Zhao C H, Xiao F. 2017. Submarine hydrothermal contribution for the extreme element accumulation during the early Cambrian, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 297-308.
- Horan M, Morgan J W, Grauch R I, Coveney R M, Murowchick J B, Hulbert L J. 1994. Rhenium and osmium isotopes in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou provinces, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(1): 257-265.
- Hu Guohui, Zhang Shuanhong, Zhang Qiqi, Wang Shiyan. 2019. New geochronological constraints on the Dahongkou Formation of the Luanchuan Group and its implications on the Neoproterozoic tectonic evolution of the southern margin of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2503-2517 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, Feng H Z, Chen Y Q, Chen J H. 2003. Re-Os isotopes and PGE geochemistry of black shales and intercalated Ni-Mo polymetallic sulfide bed from the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China[J]. *Progress in Natural Science*, 13(10): 788-794.
- Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, Chen Y Q, Feng H Z, Zhao K D, Ni P. 2007. Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in Lower Cambrian black shales of South China: An Os isotope and PGE geochemical investigation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1/2): 217-228.
- Lei Yingping, Yu Jimiao, Shen Jianquan. 2005. Geological

- characteristics and ore-controlling factors of the Shanglin vanadium deposit in Guangxi[J]. Land and Resources of Southern China, (5): 18–20 (in Chinese).
- Lehmann B, Nägler T F, Holland H D, Wille M, Mao J W, Pan J Y, Ma D S, Dulski P. 2007. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater[J]. *Geology*, 35(5): 403–406.
- Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, Chen Jing, Yang Xiuqing, Liu Mingjun. 2012. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. *Geology in China*, 39(3): 559–580 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Gao Junbo, Wei Huairui, Cheng Shuyun, Wu Tong, Gao Lei, Yang Ruidong. 2019. Division and contrast of metallogenic sequence in the base of Cambrian black rock series in Guizhou Province[J]. *Geology and Exploration*, 55(2): 508–518 (in Chinese with English abstract).
- Li Mei, Zhang Fuxin. 2009. Characteristics of the Zhongcun–Yinhua vanadium deposit in black rock series, Shanyang County, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 36(5): 1009–1109 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengrong, Xiao Yiyun, Shen Junfeng, Sun Li, Liu Bo, Yan Baikun. 2002. Re–Os isotope constraints on the source and mineralization age of platinum group elements in the lower Cambrian of Guizhou, south China[J]. *Science China (Series D: Earth Science)*, 32(7): 568–575 (in Chinese).
- Li Zimin, Ma Dongfeng, Feng Yaju, Gou Aisuo, Bi Yuzhong. 2013. Analysis of the geological and geochemical characteristics of the Vanadium in the Meiyaogou Formation in Western Henan Province[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 42–46 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingpei. 2009. Analysis of vanadium distribution regularity in Panzhihua vanadium–titanium magnetite mine[J]. *Mining Engineering*, 7(5): 9–11 (in Chinese with English abstract).
- Ma Dongfeng, Zhang Zanfei, Jiang Wei, Li Changqing, Bi Chong. 2016. Geological characteristics and genesis of vanadium deposit in the Meiyaogou Formation, Henan Province[J]. *Engineering Technology*, (3): 225–226 (in Chinese).
- Mao Jingwen, Zhang Guangdi, Du Andao, Wang Yitian, Zeng Mingguo. 2001. Geology, geochemistry, and Re–Os isotopic dating of the Huangjiawan Ni–Mo–PGE deposit, Zunyi, Guizhou Province: With a discussion of the polymetallic mineralization of basal Cambrian black shales in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 234–244 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Lehmann B, Du A D, Zhang G D, Ma D S, Wang Y T, Zeng M G, Kerrich R. 2002. Re–Os dating of polymetallic Ni–Mo–PGE–Au mineralization in lower Cambrian black shales of South China and its geologic significance[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 97(5): 1051–1061.
- Mckelvey V E, Strobell J D, Staughter A L. 1986. The Vanadiferous Zone of the Phosphoria Formation in Western Wyoming and Southeastern Idaho[M]. Denver: U. S. Geological Survey Professional Paper, 1–27.
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2019. China Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2022. China Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, French D, Walshe J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 1–32.
- She Y W, Yu S Y, Song X Y, Chen L M, Zheng W Q, Luan Y. 2014. The formation of P–rich Fe–Ti oxide ore layers in the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for magma–plumbing system process[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 539–559.
- Shi Chunhua, Cao Jian, Hu Kai, Bian Lizeng, Han Shanchu, Yao Suping. 2013. A review of origins of mineral deposits hosted in black rock series and the mineralizing functions of their sea water, hydrothermal fluid and bio–organics[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 19–31 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Chen, Liemeng. 2012. The core issue of the large–scale mineralization in small intrusion: Mineralization in magmatic plumbing system principles, key features and exploration marks[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 117–127 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Reid R K, Xiao L, Qi H W, Ihlenfeld C. 2009. Platinum group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 262(3/4): 246–261.
- Wan Tianfeng. 2011. Tectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 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 Jia, Li Fengjie, Zhang Xihua, Chen Cong, Gao Zhaolong. 2023. Genetic analysis of "Datangpo type" manganese deposit in Qianyang Basin, southwest Hunan: A case study of Jingzhou, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 50(1): 249–263 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lishe. 2009. Study on the Metallogenic Regularity and Geological–Geochemistry for Black Rock Series and Related Typical Deposits in Qinling Mountains, Shaanxi[D]. Xi'an: Northwest University, 1–163 (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 Chaodong, Chen Qiying, Lei Jiajin. 1999. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the Upper Sinian to the Lower Cambrian, southwest of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*,

- 15(3): 453–462 (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).
- Xu Lingang, Fu Xuerui, Ye Huishou, Zeng Wei, Chen Bo, Fang Zhenglong. 2022. Geochemical composition and paleoceanic environment of the Lower Cambrian black shale–hosted Qianjiaping vanadium deposit in the southern Qinling Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 160–175 (in Chinese with English abstract).
- Xu L G, Mao J W. 2021. Trace element and C–S–Fe geochemistry of Early Cambrian black shales and associated polymetallic Ni–Mo sulfide and vanadium mineralization, South China: Implications for paleoceanic redox variation[J]. *Ore Geology Reviews*, 135: 104210.
- 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 Jinghong, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Chen Yongquan. 2005. Re–Os isotope tracing and dating of black shales and oceanic anoxic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 143–150 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tao, Peng Rupan, Luo Pengpeng. 2021. Geological characteristics of Muguaping vanadium mine in Baihe County, Shaanxi Province[J]. *West–China Exploration Engineering*, 33(8): 161–162, 168 (in Chinese).
- Ye Jie, Fan Delian. 2000. Characteristics and mineralization of ore deposits related to black shale series[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(2): 95–102 (in Chinese with English abstract).
- You Xianjun. 2010. Research on the Ni–Mo–V Deposits in Lower Cambrian Black Rock Series in Western Hunan[D]. Changsha: Central South University, 1–100 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bingsong, Wang Lidong, Chen Jianqiang, Chen Xiaolin, Liang Shiyong, Li Zhongbao, Lin Changsong. 2003. The suboxic depositional setting of black shales in Lower Cambrian from northern Tarim basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 545–550 (in Chinese with English abstract).
- 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 Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, Li Sanzhong, Dong Yunpeng, Liu Shaofeng, He Dengfa, Cheng Shunyou, Lu Rukui, Yao Anping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56(10): 1804–1828 (in Chinese).
- Zhang Kuo, Shen Baofeng, Sun Fengyue, Zhou Hongying, Li Huakun. 2016. Metallogenic epoch of Zhaoanzhuang iron ore deposit in Wuyang, Henan Province: Oldest magmatic type iron ore deposit in China[J]. *Mineral Deposits*, 35(5): 889–901 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinshan, Tian Tao, He Li, Liu Changzheng. 2020. The discovery of the first vanadium deposit in Qinghai Province and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(2/3): 330–337 (in Chinese with English abstract).
- 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 Jie. 2022. Sedimentary phosphate–vanadium deposits in the Lower Cambrian black rock series in the Wushi–Keping area, Xinjiang[J]. *Xinjiang Non–ferrous Metals*, 45(5): 64–67 (in Chinese).
- Zhao Xingmin, Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming. 2002. Geological features and origin of the Fangshankou large–scale V–P–U deposit in Dunhuang, Gansu Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 23(3): 207–212 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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.
- 邓泽文. 2012. 内蒙古锡盟扎布其铁矿地质特征及成因[D]. 长春: 吉林大学, 1–68.
- 范德廉, 张焘, 叶杰, 等. 2004. 中国的黑色岩系及有关矿床[M]. 北京: 科学出版社, 1–421.
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 付勇, 周文喜, 王华建, 谯文浪, 叶云涛, 江冉, 王晓梅, 苏劲, 李迪, 夏鹏. 2021. 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学响应[J]. *地质学报*, 95(2): 536–548.
- 高永璋. 2019. 中国钒矿资源及供需形势分析[J]. *中国矿业*, 28(S2): 5–10.
- 高振家, 等. 1993. 前寒武纪地质第 6 号—新疆北部前寒武系[M]. 北京: 地质出版社, 1–171.
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 郝文丽, 孙贵斌, 温丽. 2008. 鸡西市柳毛石墨矿伴生钒矿经济价值及综合开发探讨[J]. *黑龙江国土资源*, (5): 75.
- 韩善楚. 2013. 华南早寒武世黑色岩系生物–热水–海水三元叠合成矿作用及其差异性研究——以镍钼和重晶石矿床为例[D]. 南京: 南京大学, 1–130.
- 胡国辉, 张拴宏, 张琪琪, 王世炎. 2019. 华北克拉通南缘栾川群大红口组形成时代及其对新元古代构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 35(8): 2503–2517.
- 雷英佺, 余继森, 沈健全. 2005. 广西上林钒矿床地质特征及控矿因素[J]. *南方国土资源*, (5): 18–20.
- 李厚民, 王登红, 李立兴, 陈靖, 杨秀清, 刘明军. 2012. 中国铁成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. *中国地质*, 39(3): 559–580.
- 李军, 高军波, 魏怀瑞, 陈述云, 吴桐, 高磊, 杨瑞东. 2019. 贵州寒武

- 系底部黑色岩系成矿序列划分与对比[J]. *地质与勘探*, 55(2): 508-518.
- 李玫, 张复新. 2009. 陕西山阳县黑色岩系中中村—银花钒矿床地质特征[J]. *中国地质*, 36(5): 1009-1109.
- 李胜荣, 肖启云, 申俊峰, 孙丽, 刘波, 阎柏琨. 2002. 湘黔下寒武统铂族元素来源与矿化年龄的 Re-Os 同位素制约[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 32(7): 568-575.
- 李自民, 马东峰, 冯亚举, 郭爱锁, 毕羽中. 2013. 豫西煤窑沟组钒的地质地球化学特征[J]. *四川有色金属*, (1): 42-46.
- 刘明培. 2009. 浅析攀枝花钒钛磁铁矿的分布规律[J]. *矿业工程*, 7(5): 9-11.
- 马东峰, 张鹏飞, 姜伟, 李长青, 毕翀. 2016. 河南省煤窑沟组地层钒矿床地质特征与矿床成因研究[J]. *工程技术 (全文版)*, (3): 225-226.
- 毛景文, 张光第, 杜安道, 王义天, 曾明果. 2001. 遵义黄家湾镍钒铂族元素矿床地质、地球化学和 Re-Os 同位素年龄测定——兼论华南寒武系底部黑色页岩多金属成矿作用[J]. *地质学报*, 75(2): 234-244.
- 施春华, 曹剑, 胡凯, 边立曾, 韩善楚, 姚素平. 2013. 黑色岩系矿床成因及其海水、热水与生物有机成矿作用[J]. *地质前缘*, 20(1): 19-31.
- 宋谢炎, 陈列锰. 2012. “小岩体成大矿”的核心——岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志[J]. *西北地质*, 45(4): 117-127.
- 万天丰. 2011. 中国大地构造学[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 王佳, 李凤杰, 张玺华, 陈聪, 高兆龙. 2023. 湘西南黔阳盆地“大塘坡式”锰矿成因分析: 以湖南靖州地区为例[J]. *中国地质*, 50(1): 249-263.
- 王立社. 2009. 陕西秦岭黑色岩系及其典型矿床地质地球化学与成矿规律研究[D]. 西安: 西北大学, 1-163.
- 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.
- 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999. 湘西震旦—寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. *岩石学报*, 15(3): 453-461.
- 邢长明, 王焰, 张铭杰. 2012. 攀西地区超大型钒钛磁铁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: 地球科学*, 42(11): 1701-1715.
- 徐林刚, 付雪瑞, 叶会寿, 郑伟, 陈勃, 方正龙. 2022. 南秦岭地区下寒武统黑色页岩赋存的千家坪大型钒矿地球化学特征及成矿环境[J]. *地质前缘*, 29(1): 160-175.
- 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.
- 杨競红, 蒋少涌, 凌洪飞, 陈永权. 2005. 黑色页岩与大洋缺氧事件的 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. *地质前缘*, 12(2): 143-150.
- 杨涛, 彭如盼, 雒鹏鹏. 2021. 陕西省白河县木瓜坪钒矿地质特征[J]. *西部探矿工程*, 33(8): P161-162, 168.
- 叶杰, 范德廉. 2000. 黑色岩系型矿床的形成作用及其在我国的产出特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(2): 95-102.
- 游先军. 2010. 湘黔下寒武统黑色岩系中的镍钒矿研究[D]. 长沙: 中南大学, 1-100.
- 于炳松, 王黎栋, 陈建强, 陈晓林, 梁世友, 刘忠宝, 林畅松. 2003. 塔里木盆地北部下寒武统底部黑色页岩形成的次氧化条件[J]. *地质前缘*, 10(4): 545-550.
- 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.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚平安. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1553-1582.
- 张阔, 沈保丰, 孙丰月, 周红英, 李怀坤. 2016. 河南舞阳地区赵寨庄铁矿床成矿时代及地质意义——中国最古老的岩浆型铁矿床[J]. *矿床地质*, 35(5): 889-901.
- 张勤山, 田滔, 何利, 刘长征. 2020. 青海省首个钒矿床的发现及意义[J]. *地质通报*, 39(2/3): 330-337.
- 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.
- 赵杰. 2022. 新疆乌什—柯坪一带下寒武统黑色岩系中的沉积型磷钒矿[J]. *新疆有色金属*, 45(5): 64-67.
- 赵省民, 聂风军, 江思宏, 白大明. 2002. 敦煌方山口大型钒磷铀矿床的地质特征及成因[J]. *地球学报*, 23(3): 207-212.
- 中国地质矿产信息研究院. 1996. 国外矿产资源[M]. 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国自然资源部. 2019. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社.
- 中华人民共和国自然资源部. 2022. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社.