

DOI: 10.13745/j.esf.2018.03.008

中国稀土矿资源成矿地质特征与资源潜力分析

李童斐¹, 夏庆霖^{1,2}, 汪新庆^{1,2}, 刘岳³, 常力恒¹, 冷帅¹

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉) 固体矿产勘查国家级实验教学示范中心, 湖北 武汉 430074

3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011

LI Tongfei¹, XIA Qinglin^{1,2}, WANG Xinqing^{1,2}, LIU Yue³, CHANG Liheng¹, LENG Shuai¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2. National Demonstration Center for Experimental Mineral Exploration Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3. Xinjiang Research Centre for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China

LI Tongfei, XIA Qinglin, WANG Xinqing, et al. Metallogenic geological characteristics and mineral resource potential of rare earth element resources in China. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(3): 095-106

Abstract: Rare earth element (REE) is a general term for the 17 elements including 15 lanthanide elements and Sc and Y. Because of its irreplaceable role in manufacturing, metallurgy and other industries, REE has earned the title of “industrial vitamin”. Deemed as one of superior strategic mineral resources, the share of China’s REE resource in the global reserves has declined sharply in recent decades due to over reliance on and exploitation of a few super large deposits. Therefore, it is urgent to conduct an in-depth investigation on the geological characteristics, metallogenic regularity and resource potential evaluation of REEs in China. Since it is one of the REE rich countries in the world and possesses of complete REEs, a great deal of work has been done on REE metallogenic theory in China. Here, we carried out comprehensive analyses of REE metallogenic potential prediction of various provinces, using prediction model and comprehensive geological information prediction method with MapGIS platform. According to spatio-temporal distribution of REE deposits, and magmatite, tectonic and stratigraphic control factors, as well as tectonic units, we identified 17 rare earth metallogenic zones. We also screened typical ore deposits of different genesis and summarized their geological features and metallogenic types. Further, we established prediction models of REE deposits, such as sedimentary metamorphic, magmatic and ion adsorption of weathering crust types. A total of 930 minimum prospective areas were delineated nationally, amounting to approximately 327.00 million tons of cumulative forecast REE resources. According to the regional metallogenic characteristics of REE deposits, we classified the minimum prospective areas as level-II prospective areas, which were further merged into 133 level-III prospective areas. In addition, the amount of REE resources was documented according to metallogenic belt, prediction depth, geological reliability and utilizability. We selected 6 level-III priority prospective areas including Yunkai – Dashan and Dasi – Xiaodong in Guangxi, Bayan Obo and Baerzhe in Inner Mongolia, Miaoya – Jiangjiayan in Hubei and Mianning in Sichuan, based on metallogenic geological conditions favorable for mineral potential analysis. This work can provide guidance for further REE exploration.

Key words: REE deposit; metallogenic geological characteristics; resource potential evaluation; prediction model

收稿日期: 2017-10-15; 修回日期: 2018-03-15

基金项目: 中国地质调查局项目“全国重要矿产总量预测”(1212010633905, 1212010733806, 1212011121040)

作者简介: 李童斐(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事矿产资源预测评价研究。E-mail: Tongfei1992@hotmail.com

摘要:稀土元素是元素周期表中 15 种镧系元素以及钪、铈等 17 种元素的总称。它们在材料、冶金等行业具有难以替代的作用,因而有“工业维生素”之称。作为具有战略意义的优势矿产资源之一,中国稀土资源由于近几十年的过度依赖极少数超大型矿床以及资源过度开采等问题,其占世界稀土资源储量的比重急剧下降。因此,急需进一步分析和总结其地质特征、成矿规律以及资源潜力评价。中国是世界稀土资源大国,稀土矿床类型齐全,前人针对其成矿理论方面也做了大量工作。本文采用矿床模型综合地质信息预测方法,在全国各省份稀土矿成矿潜力预测结果的基础之上,以 MapGIS 软件为平台,进行数据库汇总与综合分析研究。根据中国稀土时空分布、岩浆岩、构造和地层等控矿因素以及大地构造单元,划分了 17 个稀土矿成矿区带。同时,筛选出不同成因的典型矿床,总结其成矿地质特征及成矿模式。在此基础上,建立了沉积变质型、岩浆型、风化壳离子吸附型等稀土矿预测模型。在全国范围内总计圈定了 930 个稀土矿最小预测区,累积预测资源量约 $32\,700 \times 10^4$ t。根据稀土矿区域成矿特征,将最小预测区归并为 2 级预测区,并进一步归并为 133 个 3 级预测区。此外,根据不同成矿带,按照不同预测深度、不同地质可靠程度以及不同利用程度对稀土资源量进行了汇总。最后根据稀土矿成矿地质条件,选取了广西云开大山、大寺—小董,内蒙古白云鄂博、巴尔哲,湖北庙垭—蒋家堰以及四川冕宁等 6 个重点的 3 级预测区进行资源潜力分析,为下一步勘查部署工作提供指导。

关键词:稀土矿;成矿地质特征;资源潜力评价;预测模型

中图分类号:P618.7;P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)03-0095-12

0 引言

稀土元素是由元素周期表中第ⅢB族原子序数从 57 到 71 的 15 种镧系元素以及钪、铈等 17 种元素组成^[1]。其中,15 种镧系元素和钪通常分为轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)两类,前者主要包含 La 到 Eu 等元素,后者包含 Gd 到 Lu 以及 Y 等元素。稀土元素不仅在传统行业,如冶金等方面应用广泛,而且在高科技领域,如电子、超导等方面具有难以替代的作用,具有极其重要的战略价值。然而,中国稀土资源已经从 20 世纪 70 年代占世界总量的 74%,至 90 年代末下降到 45%左右,却供应着全球 90%以上的稀土用户。中国稀土资源的现状使得系统地进行中国稀土矿成矿规律及资源潜力预测具有很大的现实意义。

国内外针对稀土资源潜力评价的相关计划主要包括 USGS 在 20 世纪 90 年代完成的第一次矿产资源定量评价项目以及之后的全球矿产资源评价项目,欧洲的 EURARE 以及 ASTER 计划以及中国的重要矿产资源潜力评价等^[2-3]。目前已知的稀土矿产主要集中在中国、美国、印度、澳大利亚、独联体国家以及南非等少数几个国家。美国是全球重要的稀土资源赋存地,其稀土储量估计为 1 300 万 t (REO),稀土矿物主要有氟碳铈矿、独居石、黑稀金矿、硅铍钇矿和磷钇矿等;印度的稀土储量约为 310 万 t (REO),其稀土矿床主要为海滩冲积砂矿,以赋含轻稀土的独居石为主;澳大利亚稀土储量约 160

万 t (REO)^[4]。中国是世界第一稀土资源赋存国和产出国,在全球稀土总资源量中占比约为 48%。截至 2010 年,中国稀土矿床(点)共计 447 处,其中超大型 4 处,大型 15 处,中型 39 处,小型 81 处。

一般认为,中国大部分内生的稀土矿大地构造位置主要位于古老陆块边缘的陆缘拗陷带或裂谷带^[5-6]。该类型矿床与稀土矿高度富集关系密切的主要是碱性岩-碳酸岩,二者常结合呈杂岩体产出,除 K、Na 等碱元素外,通常 F、P、CO₂ 等挥发分也高度富集^[5]。成矿物质通常具有幔源特征,并且形成时有陆源物质参与^[5,7-14]。同时,深断裂常常为具有幔源特征的含矿岩浆和含矿流体提供了运输通道,最终在拗陷带或裂谷带内局部半封闭海湾或海盆中堆积成矿,如内蒙古白云鄂博矿床^[8,15-17]、四川冕宁牦牛坪矿床^[18-19]、新疆拜城波孜果尔矿床^[20]。而造山带内主要是新生代与风化作用相关的稀土矿,如风化壳离子吸附型矿床、砂矿型^[5,21-22]。典型矿床有江西西洞稀土矿床等^[23-24]。少数原生且与碱性花岗岩关系密切的矿床也产在造山系中,如内蒙古巴尔哲矿床等^[25-26]。

本次研究在前人研究工作以及全国稀土矿预测结果的基础之上,进一步系统研究中国稀土矿时空分布规律及典型矿床成矿地质特征及成矿模式,划分成矿区带,建立相应的稀土矿预测模型,圈定出最小预测区,并逐级归并到稀土矿 3 级预测区,根据成矿地质条件筛选出重点的 3 级预测区并且分析其找矿潜力,为下一步稀土矿勘查部署提供建议。

1 稀土矿成矿地质特征

1.1 稀土矿时空分布特征

在成矿时间上, 燕山期是中国稀土矿富集的高峰期(表 1)。然而, 不同类型的稀土矿成矿时间上

又有一定差异性。一般而言, 碱性岩型的稀土矿主要形成于中、新元古代^[27]; 离子吸附型矿床成矿时代主要为燕山期, 而成矿时代主要在第四纪; 砂矿型稀土矿成矿时代主要集中在加里东期和燕山期, 成矿时代为第四纪; 变质岩型稀土矿主要形成于新元古代; 海相沉积磷块岩型稀土矿则形成于寒武纪。

表 1 中国主要稀土矿床成矿年龄
Table 1 Metallogenic age of major REE deposits in China

省(区)	矿床名称	矿种	测试年代/Ma	测试方法	成矿年代	参考资料
广东	平远县仁居	REE	114	K-Ar	燕山期	吴澄宇等 ^[28]
广东	寨背顶	REE	144.8	U-Pb	燕山期	马配学等 ^[29]
广西	昆仑关佛子	REE	93	U-Pb	燕山期	谭俊等 ^[30]
广西	旧州	REE	225	K-Ar	印支期	汪绍年等 ^[31]
广西	台马	REE	236	U-Pb	印支期	邓希光等 ^[32]
广西	钟山—富川县花山	REE	164.7	Rb-Sr	燕山期	朱金初等 ^[33]
广西	钦州大寺	REE	230	K-Ar	印支期	汪绍年等 ^[31]
广西	崇左六汤	REE	221.2	Rb-Sr	印支期	梁金城等 ^[34]
海南	坝王岭	REE	230	Rb-Sr	印支期	傅杨荣等 ^[35]
江西	龙南足洞	REE	124	U-Pb	燕山期	吴澄宇 ^[28]
江西	关西	REE	170	U-Pb	燕山期	黄典豪等 ^[36]
江西	寻乌河岭	REE	114	K-Ar	燕山期	王京彬等 ^[37]
江西	南桥	REE	130	U-Pb	燕山期	吴澄宇等 ^[28]
湖南	江华县姑婆山	REE	172	Rb-Sr	燕山期	吴澄宇等 ^[28]
湖北	竹山县庙埡	REE-Nb	278	K-Ar	华力西期	李石 ^[38]
湖北	杀熊洞	REE-Nb	305	Rb-Sr	华力西期	李石 ^[39]
陕西	黄龙铺	Mo-REE-Pb	221	Re-Os	印支期	黄典豪等 ^[40] , 许成等 ^[41]
山东	微山县郗山	REE-Au(Ag)	110	K-Ar	燕山期	田京祥等 ^[42]
山东	龙宝山	REE-Au(Ag)	133~174	K-Ar	燕山期	宋友贵 ^[43]
辽宁	辽阳生铁岭	REE-P	1866	U-Th-P	古元古代	袁忠信等 ^[27]
辽宁	凤城赛马	REE-U	223~240	U-Pb	印支期	袁忠信等 ^[27]
内蒙古	白云鄂博	REE-Fe-Nb	1580	Sm-Nd	中元古代	袁忠信等 ^[8, 16-17]
内蒙古	巴尔哲	REE-Nb-Be-Zr	125	Rb-Sr	燕山期	王一先等 ^[5, 7-14]
黑龙江	碾子山	REE	123	K-Ar	燕山期	李培忠等 ^[44]
贵州	织金县	REE-P			寒武纪	张杰等 ^[45]
甘肃	天祝县干沙河	REE	256	Rb-Sr	华力西期	陈耀宇等 ^[46]
青海	平安县上庄	REE-P-Fe	442.5	K-Ar	加里东期	吴正涛等 ^[47]
新疆	波孜果尔	REE-Nb-Ta-Zr	279		华力西期	邹天人等 ^[48]
新疆	依兰里克	REE-Nb-Ta-Zr	273	U-Pb	华力西期	邹天人等 ^[48]
新疆	瓦吉尔塔格	REE-Nb-P	306	Sm-Nd	华力西期	邹天人等 ^[48]
新疆	哈密红柳井	REE-Nb	682		新元古代	邹天人等 ^[48]
新疆	玛依达	REE-Nb-Ta-Zr	931	锆石逐层蒸发	新元古代	邹天人等 ^[48]
新疆	阔克塔格西	REE-Nb-Ta-Zr	249	Rb-Sr	印支期	邹天人等 ^[48]

在空间分布上,虽然中国稀土矿分布广泛,但储量分布较为集中,主要集中在内蒙古、江西、广东、广西、四川等省(自治区)(图1)。在大地构造上既分布于稳定的地质构造单元之中,又分布于活动的地质单元之内(褶皱系)^[49]。中国稀土矿最为典型的有白云鄂博型、碱性岩浆岩型、风化壳离子吸附型、砂矿型等。中国稀土矿具有受岩浆岩、地层以及构造等因素控制的特点。不同类型稀土矿产出的大地构造环境差异明显:白云鄂博型稀土矿主要产出在陆缘裂谷带,如白云鄂博陆缘裂陷带;与碱性岩浆岩有关的稀土矿主要产出在造山带,如兴安造山系内蒙古造山带;风化壳离子吸附性稀土矿的产出则主要受中酸性花岗岩的分布影响,主要分布于温热潮湿气候的华南地区的造山带内。

其中,与岩浆岩相关的稀土矿占中国稀土储量的90%以上,该类型矿床的空间分布与碱性岩的分布较为一致,常沿深断裂分布。从超基性岩到酸性

岩均可能发生稀土矿化。而与稀土矿化最为密切相关的主要是碱性岩-碳酸岩,具有深源甚至幔源的特征,K、Na等碱金属元素富集,同时富集F、Cl、P、CO₂等挥发分。中、新元古代的稀土矿大多经历了岩浆、沉积及变质作用,具有典型沉积建造特征,矿体常与围岩产出一致,呈层状、透镜状等。而新生代与风化作用相关的矿床大多产于造山带,其成矿母岩多为富含稀土元素的中酸性花岗岩。

1.2 稀土矿成矿区带

根据潜力评价项目成果《中国成矿区带划分方案》、《中国大地构造图》、中国稀土矿产地分布、稀土预测工作区分布、稀土矿最小预测区分布、稀土矿远景区分布以及与稀土成矿关系密切的地球化学异常等,圈定了17个稀土成矿带(图2)。

1.3 典型矿床地质特征及成矿模式

中国稀土矿按照成因类型可以划分为内生矿床、外生矿床以及变质矿床等三大类。根据其成矿地质特征又可划分为不同的亚类。其中,内生矿床

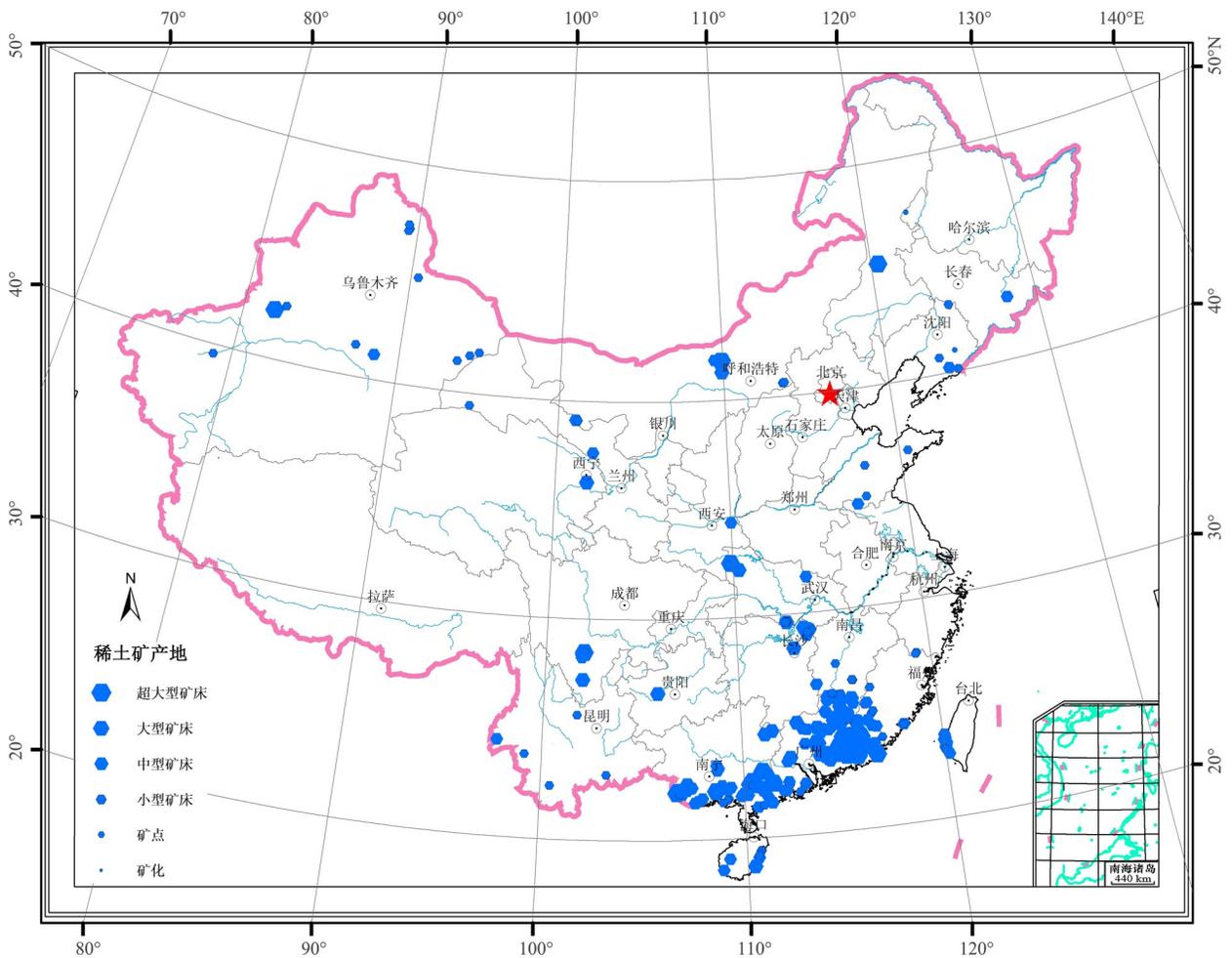


图1 中国稀土矿床(点)分布图
Fig.1 Distribution of REE deposits in China

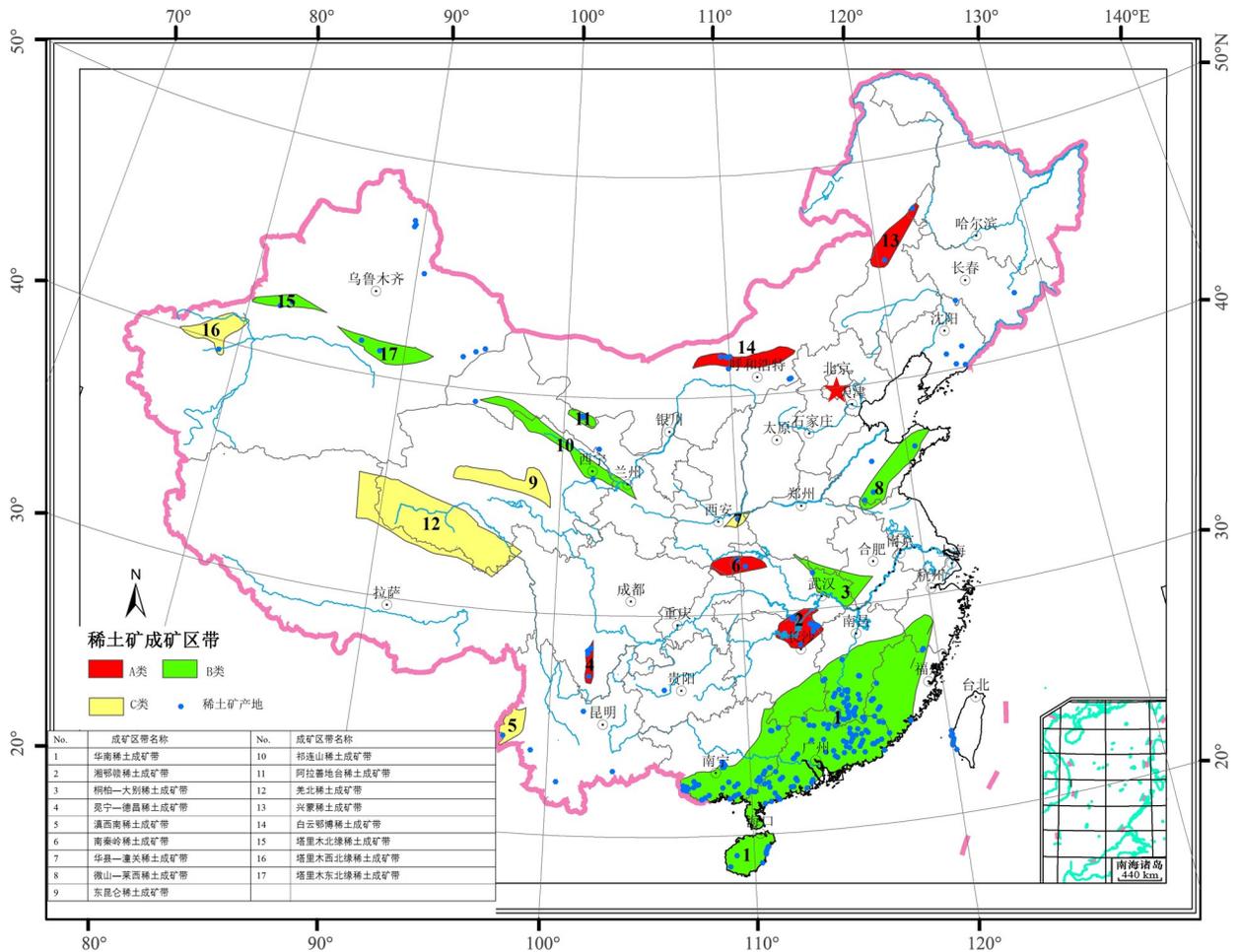


图2 中国稀土矿成矿区带
Fig.2 REE metallogenic belts in China

可以划分为碱性岩-碳酸岩型(包括海相火山碱性岩-碳酸岩型和陆相侵入碱性岩-碳酸岩型)、碱性超基性岩型、正长岩型、碱性花岗岩型、钙碱性花岗岩型以及伟晶岩型;外生矿床可以划分为沉积岩型(包括海相沉积磷块岩型和古风化壳沉积铝土型)、砂矿型以及风化壳离子吸附型等;变质矿床可划分为浅粒岩-变粒岩型及混合岩-混合花岗岩型等^[5]。本文根据不同成因类型、矿床储量级资源前景、矿石易采选程度、稀土矿种紧缺程度以及经济价值等方面情况,筛选出具有代表性的典型稀土矿床,总结其成矿地质特征及成矿模式。

1.3.1 白云鄂博式海相火山岩-碳酸岩型 Fe-Nb-REE 矿床

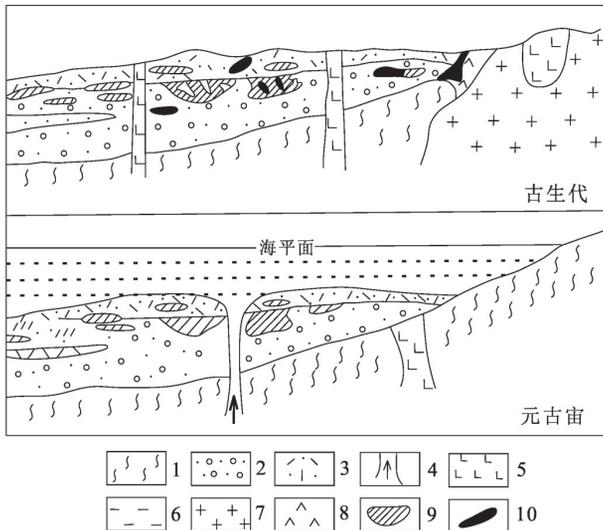
白云鄂博矿床为世界知名的超大型 Fe-Nb-REE 稀土矿床。大地构造上,该矿床位于狼山—白云鄂博陆缘断陷带^[50]。区内出露地层主要为以陆缘碎屑泥质建造夹薄层碳酸盐沉积的白云鄂博群。其中,赋矿地层为尖山组上部的由白云石大理岩、长

石板岩、黑云母板岩等组成的火山沉积变质岩。矿体呈层状,主要赋存于白云石大理岩及富钾板岩接触带。矿石类型主要有 Nb-Fe-REE 矿石以及 Nb-REE 矿石两大类。

白云岩大理岩平均化学成分上接近碳酸岩,富钾板岩原岩相当于碱性粗面岩^[5]。矿区主、东矿 Nb-REE-Fe 矿石以及 Nb-REE 矿石 Sm、Nd 同位素及年龄分析表明其 Nb、REE 等成矿物质具有幔源特征^[51],而主、东矿赋矿白云石大理岩 Rb-Sr 同位素特征显示赋矿的白云石大理岩体现出大洋玄武岩特征^[51]。一般认为,矿区主、东矿稀土矿矿石的 Sm-Nd 同位素等时线年龄可视为主成矿期年龄,约为 1 305 Ma,而此后又经历了加里东期与华力西期等多期次的矿化叠加作用^[51-53]。

其成因可能为:中元古代中期,白云鄂博处于拉张断陷的沉积环境,白云鄂博裂谷系活化,幔源物质从地幔深处沿深断裂上涌,同时伴随着碳酸岩岩浆的活动;碳酸岩岩浆与富含大量 F、CO₂ 以及 REE

的流体交代白云鄂博群中的白云岩, 从而形成稀土矿床^[5,54]; 后期由于受加里东期以及华力西期南部花岗岩侵入的影响, 发生交代作用, 进而叠加晚期矿化。其成矿模式如图 3 所示。



1—古老基底岩石; 2—火山喷溢碳酸岩; 3—火山喷溢粗面岩—玄武岩; 4—幔源熔体—溶液上升通道; 5—碱性辉长岩及碳酸岩脉; 6—海水及海平面; 7—黑云母花岗岩; 8—夕卡岩; 9—Nb-Fe-REE 矿石; 10—晚期叠加矿化。

图 3 白云鄂博 Nb-Fe-REE 矿床成矿模式

(改自文献[3])

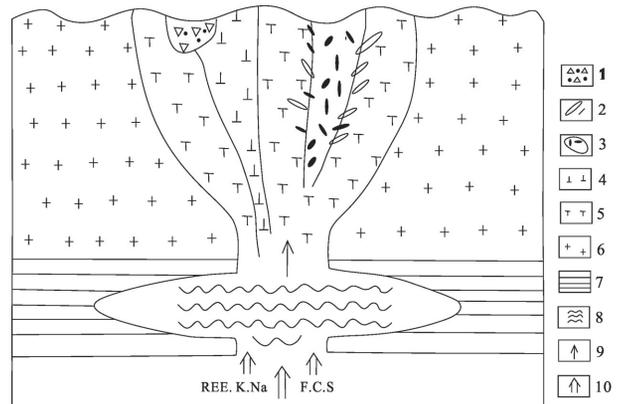
Fig.3 Metallogenic model of the Bayan Oboe Nb-Fe-REE deposit

1.3.2 牦牛坪式陆相侵入碱性岩-碳酸岩型稀土矿床

该矿床位于四川冕宁县, 为典型的陆相侵入碱性岩-碳酸岩型稀土矿床, 属大型矿床。大地构造位置上属于扬子陆台西缘陆缘拗陷带, 康滇隆起与盐源—丽江台褶皱带的过渡部位^[55]。区内 NNE 向断裂组不仅控制着矿带的分布, 还控制着矿脉的展布。与成矿关系密切的岩浆岩主要为英碱正长岩, 氟碳铈矿矿体呈细脉—浸染状产于其内。碳酸岩脉呈岩脉产出, 稀土矿矿化的碳酸岩脉主要为氟碳铈矿方解石脉。该矿床原生稀土矿石主要呈脉状—细网脉状分布于英碱正长岩内, 而风化壳类型的矿石主要以胶体态被 Fe、Mn 氧化物吸附, 以重稀土为主, 但未被回收利用。

英碱正长岩及石英等矿物 C、O 同位素分析结果表明, 成矿流体主要为岩浆水, 成矿过程中有天水的混入^[5]。英碱正长岩 Sr、Nd 同位素及稀土元素含量, 碳酸岩 Pb、Sr、Nd 同位素以及英碱正长岩中黄铁矿 S 同位素分析结果表明, 成岩成矿物质主要来自于地幔, 少量受地壳的混染^[5,11]。

其成因可能为: 在喜马拉雅期, 该地区处于拉萨地块与扬子陆块碰撞晚期的构造转换环境^[56], 软流圈物质的上涌诱发了碰撞带东缘岩石圈富集地幔部分熔融, 导致富 CO₂ 的硅酸盐岩浆的形成; 富 CO₂ 的硅酸盐岩浆沿深断裂上升侵位, 在较浅的部位形成岩浆房, 并且发生岩浆不混溶作用, 产生碳酸岩岩浆和英碱正长岩, 同时分离出大量富含 F、C、K、Na 以及 REE 元素的流体; 富 REE 的流体随分离出的碳酸岩和英碱正长岩岩浆的上升侵位发生水/岩反应, 最终形成了稀土矿床^[5,57-58]。其成矿模式如图 4 所示。



1—矿化角砾岩; 2—细网矿脉; 3—大矿脉; 4—碳酸岩; 5—英碱正长岩; 6—碱长花岗岩; 7—下地壳岩石; 8—幔源岩浆储留场; 9—含矿岩浆及热液转移方向; 10—幔源含矿岩浆及气液上升方向。

图 4 牦牛坪矿床成矿模式

(改自文献[3])

Fig.4 Metallogenic model of the Maoniuping REE deposit

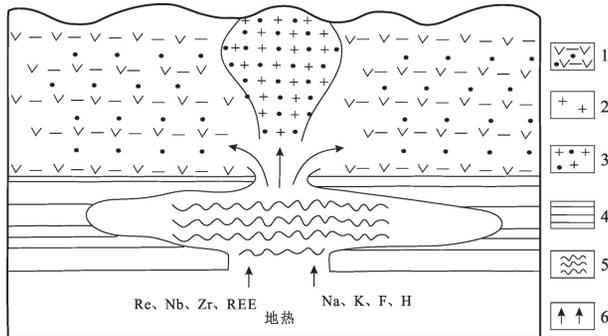
1.3.3 巴尔哲式碱性花岗岩型稀土矿床

该矿床位于内蒙古通辽市扎鲁特旗乌兰哈达公社, 为一大型轻重稀土混合型的碱性花岗岩型矿床。大地构造上, 该矿床位于兴安造山系内蒙古造山带, EW 向霍林河褶皱带南侧。矿区的岩体受 EW 向深断裂以及 NNE 向断裂控制, 其中, 碱性花岗岩与成矿关系最为密切。稀有稀土元素矿物在碱性花岗岩中呈浸染状产出。碱性花岗岩在垂向上从下往上可分为 5 个带, 其中靠近岩体顶部的钠长石化硅化碱性花岗岩带为主要的矿化富集带。

对矿区碱性花岗岩稀土元素组成分析表明, 其可能为碱性岩浆结晶分异晚期的产物。矿物碱性花岗岩 Sr、Nd 同位素分析表明, 原始岩浆可能为幔源, 成岩年龄为 125~127 Ma, 属燕山期。

其成因可能为: 中生代以来受滨太平洋构造域的影响, 该地区处于拉张环境, 构造岩浆活动十分强

烈, 幔源物质与地壳基底变质岩发生部分熔融, 形成富 K、Na 以及 REE 的酸性岩浆岩; 岩浆经断裂上侵, 并且在此过程中不断发生结晶分异, 形成更富 F 及 REE 的碱性花岗岩, 在碱性岩浆演化到岩浆-热液过渡阶段时, 体系内 REE 超常量富集, 最终成矿^[5,59-60]。其成矿模式如图 5 所示。



1—碱流质晶屑岩屑凝灰岩及熔岩; 2—碱性花岗岩; 3—矿化蚀变碱性花岗岩; 4—下地壳变质岩; 5—碱流质凝灰岩及熔岩的原岩; 6—岩浆及矿液运移方向。

图 5 巴尔哲稀土矿床成矿模式

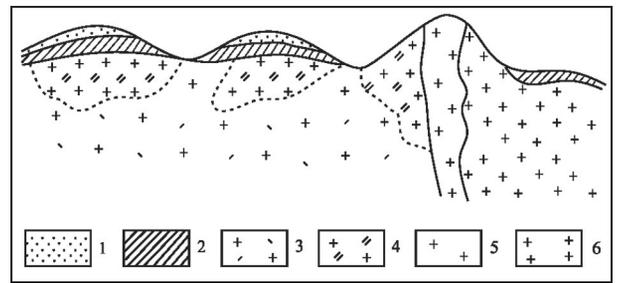
(改自文献[3])

Fig.5 Metallogenic model of the Baerzhe REE deposit

1.3.4 足洞式风化壳离子吸附型稀土矿床

足洞矿床位于江西省龙南县, 该矿床为一大型的富 Y 重稀土离子吸附型矿床。大地构造上, 该矿床位于华南造山系南岭造山带的赣南隆起。岩体的产出受 EW 向及 NNE 向构造控制。矿床的成矿母岩为燕山期黑云母花岗岩以及白云母花岗岩。其中, 白云母碱长花岗岩中发育有钽萤石、氟碳钙钽矿、钽钽矿等, 为稀土矿化提供了重要的物质来源^[24]。矿区主要分布于海拔 280~600 m 的低山丘陵区, 相对高差 50~200 m。风化作用强烈的山顶以及山梁部位的风化层最厚。风化层自上而下可分为腐殖土层、亚黏土层、网纹状风化层、全风化层、半风化层、基岩-半风化层间过渡层、基岩等 7 层。其中矿体主要呈层状, 分布于全风化层中。

该类型矿床成因大致为: 由于地处潮湿多雨、植被发育的亚热带气候, 花岗岩在 H_2O 、 CO_2 以及有机酸的作用下发生风化作用, 尤其在低缓山丘部位; 花岗岩中长石等矿物风化后形成黏土, 而稀土矿物经风化后分解, 解离出来的稀土阳离子随雨水向下迁移, 最终被黏土矿物吸附成矿; 随着风化剥蚀作用的不断进行, 风化岩石更向下发育, 原来风化层中的稀土阳离子可能被淋滤向下, 进一步富集成矿^[5]。其成矿模式如图 6 所示。



1—表土层; 2—风化壳稀土矿床; 3—黑云母正长花岗岩; 4—富 Y 的白云母碱长花岗岩; 5—花岗岩; 6—中粗粒黑云母花岗岩。

图 6 足洞矿床成矿模式

(改自文献[3])

Fig.6 Metallogenic model of the Zudong REE deposit

2 预测模型

根据全国矿产资源潜力评价系列丛书《重要矿产预测类型划分方案》^[61]、《中国稀土矿床成矿规律》^[5], 将中国稀土矿成因类型中的海相火山沉积碱性岩-碳酸岩型、火山沉积变质浅粒岩-变粒岩型归并到沉积变质型, 将陆相侵入碱性岩-碳酸岩型、碱性超基性岩型、碱性岩型、碱性花岗岩型以及正长岩型归并到岩浆型, 将沉积磷块岩型定为海相沉积型, 将沉积黏土岩及沉积铝土矿型归并到陆相沉积型中, 由此将稀土矿预测类型划分为 6 大类。其中, 在中国稀土矿最具工业意义的主要为沉积变质型、岩浆型、风化壳离子吸附型以及砂矿型。

2.1 沉积变质型

该类型矿床最为典型的是白云鄂博稀土矿, 矿床主要产出在大陆裂谷带或者拗陷带, 含矿岩性为前寒武系的碳酸盐建造, 常具有深源特征。该类型矿床矿物种类繁多, 储量巨大, 具有极高的工业价值及经济意义。其预测模型如表 2 所示。

2.2 岩浆型

该类型稀土矿主要与碱性岩浆岩的活动密切相关, 主要成矿年代为中、新元古代。岩体的产出受深大断裂控制, 具深源甚至幔源特征。矿体多产于岩体上部呈脉状、层状及透镜状产出。矿石多具有浸染状、块状构造。其预测模型如表 3 所示。

2.3 风化壳离子吸附型稀土矿

该类型矿床主要产在华南湿热的低山丘陵地区, 成矿母岩主要是中细粒黑云母二长花岗岩等。矿体形状受地貌条件和母岩的风化程度控制。矿石易采选, 具有良好的工业价值。典型矿床有江西足洞稀土矿床。其预测模型如表 4 所示。

表 2 沉积变质型稀土矿预测模型
Table 2 Prediction model of sedimentary metamorphic REE deposits

要素类别	一级要素	二级要素
必要要素	大地构造位置	大陆边缘裂谷亚相
	大型变形构造/区域断裂构造	规模、产状、(力学)性质、活动期次
	沉积建造/沉积作用	地层时代、岩石类型、岩性特征、岩石组合、矿化特征、蚀变特征、沉积建造类型、同位素
重要要素	成矿时代	沉积成矿年龄、沉积矿产后期改造年龄、变质成矿年龄
	成矿构造	沉积相、沉积相岩石组合、古地理类型、断裂构造类型、规模、产状、期次
	成矿特征	矿体形态、矿体规模、矿体产状、矿石矿物成分、矿石矿物特征、矿床共生组分、成矿期次、成矿物源
	磁测资料	线性构造类型、线性构造埋深、火山机构磁场特征、火山机构形态、
	化探资料	异常元素、组合元素
	自然重砂异常	矿物名称、矿物含量
	次要要素	找矿线索

表 3 岩浆型稀土矿预测模型

Table 3 Prediction model of magmatic REE deposits

要素类别	一级要素	二级要素
必要要素	大地构造位置	大陆边缘裂谷亚相
	大型变形构造/区域断裂构造	规模、产状、活动期次、构造体系
	岩浆建造/岩浆作用	侵入岩时代、岩石名称、岩石组合、侵入期次、矿物成分、微量元素、稀土元素、同位素示踪、同位素年龄、侵入岩成因
重要要素	成矿时代	主成矿期成矿年龄、多期成矿年龄(同一成矿作用内)
	成矿构造	多期侵位构造、岩体侵位构造、大地构造环境、断裂构造规模、构造产状、构造期次、
	成矿特征	矿体形态、矿石矿物成分、矿石矿物特征、成矿物源
	磁测资料	线性构造类型、线性构造走向
	重力资料	局部重力异常推断岩体
	化探资料	异常元素、组合元素
	自然重砂异常	自然重砂矿物异常类型、矿物名称、矿物含量
次要要素	找矿线索	矿点、矿化点

表 4 风化壳离子吸附型稀土矿预测模型
Table 4 Prediction model of weathering crustion adsorption REE deposits

要素类别	一级要素	二级要素
必要要素	大地构造位置	弧后盆地相
	岩浆建造/岩浆作用	侵入岩年龄、出露位置、剥蚀程度、矿物成分、微量元素、稀土元素、同位素年龄、侵入岩成因
	沉积建造/沉积作用	沉积构造、矿化特征、沉积作用类型、氧化还原环境、沉积建造厚度
重要要素	成矿时代	沉积成矿年龄
	地形	地貌类型、地貌特征、相对切割深度、基岩岩性
	成矿特征	矿体形态、矿体规模、矿石矿物成分特征、矿石矿物组合、矿床共生与伴生组分、矿床主要组分赋存状态
	自然重砂异常	自然重砂矿物异常类型
	化探资料	异常元素、组合元素
	重力资料	局部重力异常推断中酸性岩体
	磁测资料	侵入岩体赋存状态
次要要素	遥感资料	构造特征、环形构造类型、解译赋矿岩带类型(赋矿岩层、岩体、第四纪堆积物)

2.4 砂矿型

该类型矿床主要产于东南沿海滨海相或者河流冲积相,形成滨海砂矿或者冲积砂矿。主要矿物有独居石、磷钇砂矿等,矿物分选好。其预测模型如表 5 所示。

表 5 砂矿型稀土矿床预测模型

Table 5 Prediction model of placer REE deposits

要素类别	一级要素	二级要素
必要要素	大地构造位置	弧后盆地相
	岩浆建造/岩浆作用	侵入岩年龄、矿物成分、微量元素、稀土元素、同位素年龄、侵入岩成因
	自然重砂异常	自然重砂矿物异常类型
重要要素	成矿时代	沉积成矿年龄
	地貌	地貌类型、地貌特征、第四纪沉积物类型、第四纪沉积物厚度
	成矿特征	矿体形态、矿体产状、矿石矿物成分、矿石矿物特征、矿石矿物组合
	沉积建造/沉积作用	沉积作用类型
	化探资料	异常元素、组合元素
	重力异常	局部重力异常推断中酸性岩体
	次要要素	遥感异常

3 资源潜力

各省依据矿床模型地质综合预测技术方法, 圈定最小预测区并进行资源量估计。全国共圈定了 930 个最小预测区。根据预测资源量规模、已知预测范围内是否存在已有矿床以及是否具备直接和间接的找矿标志, 将预测区划分为 A、B、C 三类。其中, A 类预测区 204 个, B 类预测区 240 个, C 类预测区 486 个, 累计预测资源量约 $32\,700 \times 10^4$ t, 主要分布在内蒙古、江西、广东、四川、广西、湖北及青海等 7 省(自治区), 约占全国稀土预测资源量的 98%。

根据不同预测深度, 2 000 m 以浅的资源量分布较为集中, 稀土资源主要分布于白云鄂博、华南、南秦岭以及冕宁—德昌等四个成矿带, 各个成矿区带稀土预测资源量如表 6 所示。

预测资源量按不同预测深度划分, 500 m 以浅预测资源量约 $13\,225 \times 10^4$ t, 1 000 m 以浅预测资源量约 $20\,718 \times 10^4$ t, 2 000 m 以浅预测资源量约 $32\,700 \times 10^4$ t; 按地质可靠程度划分, 334-1 预测资

源量约为 $25\,396 \times 10^4$ t, 334-2 预测资源量约为 $4\,959 \times 10^4$ t, 334-3 为 $2\,344 \times 10^4$ t; 按不同利用程度划分, 可利用的资源量约为 $32\,252 \times 10^4$ t, 暂不可利用资源量约为 447×10^4 t。

在各省圈定的最小预测区的基础上, 按稀土成矿要素及资源量特征划分了 133 个稀土矿 3 级预测区。其中, 2 000 m 以浅预测资源量大于 50×10^4 t 的 39 个, $(5 \sim 50) \times 10^4$ t 的 50 个, 小于 5×10^4 t 的 44 个(图 7)。

综合考虑成矿地质特征、已发现矿床、矿化及采选条件等信息, 对 3 级预测区进行优选, 最终选取了以下几个资源潜力较大的 3 级预测区。

(1) 广西云开大山 3 级预测区。预测区地处武夷—云开岩系武夷岩系弧广宁深成岩带、华夏古陆与南华活动带的交切部位, 区内花岗岩体成因以同熔型为主, 重熔型次之。已发现的稀土矿床(点) 共计 23 处, 其中大型 1 处, 中型 1 处, 小型 1 处, 矿点 20 处。矿石以轻稀土为主。查明资源量约 38×10^4 t, 2 000 m 以浅预测资源量约 129×10^4 t。主攻类型为风化壳离子吸附型。

表 6 各个成矿带不同预测深度稀土预测资源量

Table 6 Predicted REE resources at different prediction depths in each metallogenic belt

序号	成矿带名称	预测资源量/t		
		500 m 以浅	1 000 m 以浅	2 000 m 以浅
1	华南稀土成矿带	4.7706E+07	4.7706E+07	4.7706E+07
2	湘鄂赣稀土成矿带	1.7301E+05	1.7301E+05	1.7301E+05
3	桐柏—大别稀土成矿带	9.4977E+04	9.4977E+04	9.4977E+04
4	冕宁—德昌稀土成矿带	5.1290E+06	9.1140E+06	9.1140E+06
5	滇西南稀土成矿带	4.9647E+04	4.9647E+04	4.9647E+04
6	南秦岭稀土成矿带	4.8751E+06	4.8751E+06	4.8751E+06
7	华县—潼关稀土成矿带	4.6800E+04	9.4100E+04	1.8870E+05
8	微山—莱西稀土成矿带	3.3258E+05	5.2190E+05	5.2190E+05
9	东昆仑稀土成矿带	2.3849E+06	2.3849E+06	2.3849E+06
10	祁连山稀土成矿带	5.6620E+05	5.6620E+05	5.6620E+05
11	阿拉善地台稀土成矿带	1.8162E+05	1.8162E+05	1.8162E+05
12	羌北稀土成矿带	4.3710E+05	4.3710E+05	4.3710E+05
13	兴蒙稀土成矿带	3.8401E+05	8.5087E+05	8.5087E+05
14	白云鄂博稀土成矿带	6.7513E+07	1.3776E+08	2.5748E+08
15	塔里木北缘稀土成矿带	1.3150E+06	1.3150E+06	1.3150E+06
16	塔里木西北缘稀土成矿带	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
17	塔里木东北缘稀土成矿带	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
18	其他	1.0616E+06	1.0616E+06	1.0616E+06
	总计	1.3225E+08	2.0718E+08	3.2700E+08

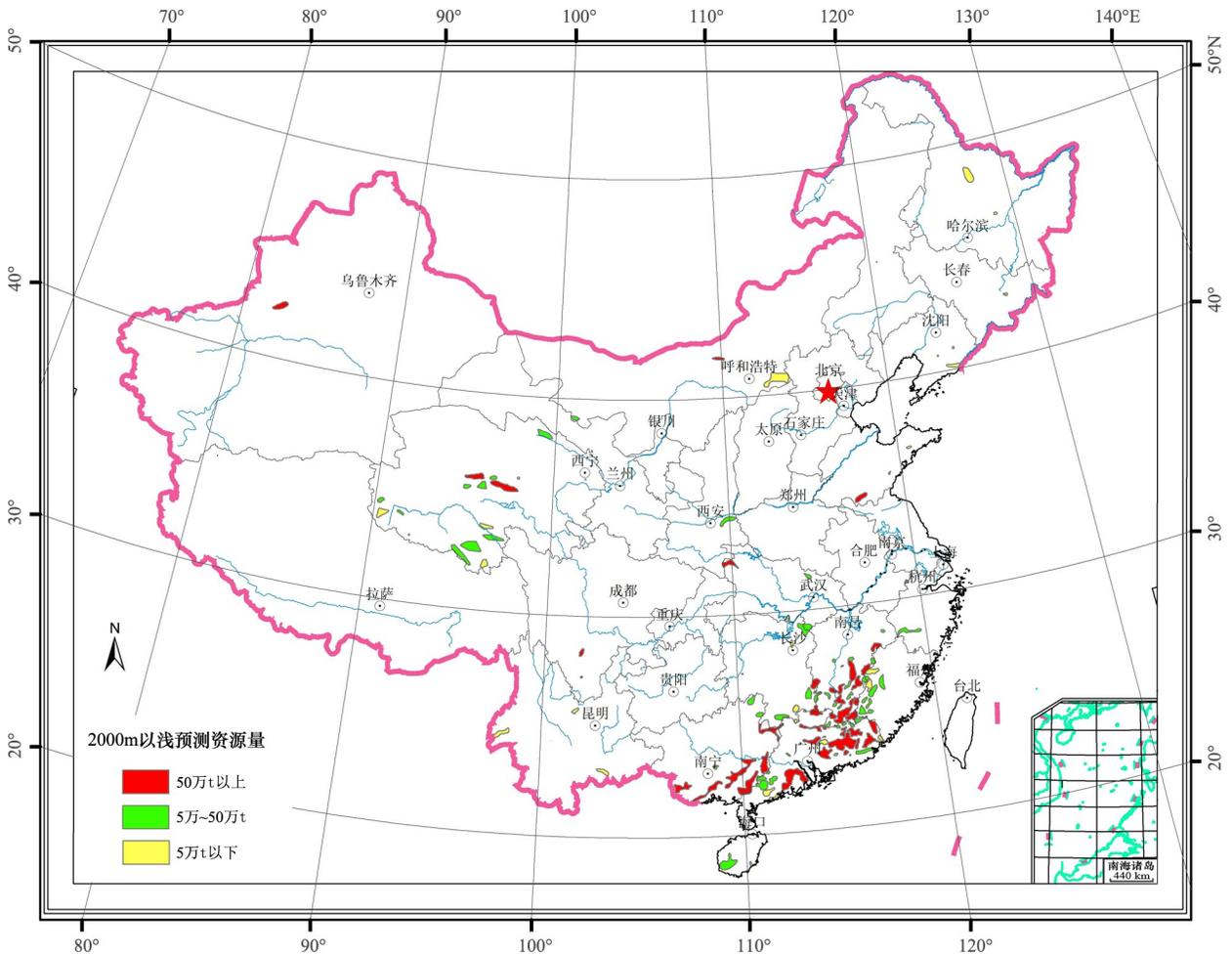


图7 中国稀土矿资源潜力预测图

Fig.7 Prediction of REE resources potential in China

(2)广西大寺—小董3级预测区。大地构造位置属华南地区武夷—云开造山带。地貌特征为低山岩溶盆谷。花岗岩时代以印支、燕山期为主,海西期次之。已发现稀土矿床(点)共计9处,其中大型2处,矿点7处。矿石以轻稀土为主,矿体内也常出现重稀土矿石。预测区查明资源量约 23×10^4 t, 2 000 m以浅预测资源量约 153×10^4 t。主攻类型为风化壳离子吸附型。

(3)内蒙古白云鄂博3级预测区。大地构造处于华北陆块北缘内蒙古台隆、元古宙狼山—白云鄂博裂谷区。地层为中元古界白云鄂博群变质岩系,周围附近的岩浆岩有超基性岩、基性岩、碱性岩及偏碱花岗岩等。区内产出白云鄂博Fe-Nb-REE超大型矿床。预测区查明资源量约 1.01×10^8 t, 2 000 m以浅预测资源量约 2.57×10^8 t。主攻矿种为沉积变质型。

(4)湖北庙堰—蒋家堰3级预测区。该区位于

秦岭大别造山带中Ⅲ级构造单元武当随南逆推带。区内已知庙堰大型铌钽矿一处,与正长岩、碳酸岩关系密切。预测区查明资源量约 122×10^4 t, 2 000 m以浅预测资源量约 488×10^4 t。主攻矿种为岩浆型。

(5)四川冕宁3级预测区。大地构造处于大地构造位于上扬子地块康滇基底断隆带和盐源—丽江陆缘裂谷盆地结合部。矿床主要与老地层和酸性岩相关。矿体产出在喜山期碱性杂岩或围岩中。区内典型矿床有牦牛坪大型稀土矿。预测区查明资源量约 192×10^4 t, 2 000 m以浅预测资源量约 761×10^4 t。主攻稀土矿种岩浆型。

(6)内蒙古巴尔哲3级预测区。该区位于天山—兴蒙造山系,锡林浩特岩浆弧。区内典型矿床有巴尔哲稀土矿,其成因与碱性花岗岩体密切相关。预测区查明资源量约 78×10^4 t, 2 000 m以浅预测资源量约 85×10^4 t。主攻类型为岩浆型。

4 结论

(1) 中国稀土矿成矿条件优越, 矿床种类完备, 矿种齐全。本文在省级预测基础上圈定了 133 个 3 级预测区。其中, 2 000 m 以浅预测资源量大于 50×10^4 t 的 39 个, $(5 \sim 50) \times 10^4$ t 的 50 个, 小于 5×10^4 t 的 44 个, 表明中国稀土矿具有很好的找矿前景。

(2) 中国稀土矿主攻矿床类型应该为沉积变质型、岩浆岩型以及风化壳离子吸附型。虽然中国稀土矿资源以轻稀土为主, 但也应该重视重稀土资源的找矿工作。

(3) 中国稀土矿预测结果显示, 在 2 000 m 以浅的找矿深度范围内具有很大的找矿潜力。在超大型矿床(如白云鄂博矿床)附近依然有很大的找矿潜力。此外, 湖北庙娅—蒋家堰、四川冕宁以及内蒙古巴尔哲等 3 级预测区可为勘查工作部署提供参考。

本文研究是全国矿产资源潜力评价项目组全体成员集体智慧的结晶, 在此对他们深表感谢!

参考文献

- [1] GOODENOUGH K M, SCHILLING J, JONSSON E, et al. Europe's rare earth element resource potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 838-856.
- [2] XIAO K, XING S, BAGAS L, et al. The China national mineral assessment initiative [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 1084-1093.
- [3] BAGAS L, XIAO K, JESSELL M, et al. Quantitative assessment of China's mineral resources (Part 1)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 1081-1083.
- [4] 李建武, 侯甦予. 全球稀土资源分布及开发概况[J]. *中国国土资源经济*, 2012, 25(5): 25-27.
- [5] 袁忠信, 李建康, 王登红, 等. 中国稀土矿成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [6] 袁忠信, 白鸽. 中国碱性侵入岩的空间分布及有关金属矿床[J]. *地质与勘探*, 1997, 33(1): 44-50.
- [7] 王一先, 赵振华. 巴尔哲超大型稀土铈铈矿床地球化学和成因[J]. *地球化学*, 1997, 26(1): 24-35.
- [8] 袁忠信, 白鸽, 吴澄宇, 等. 内蒙白云鄂博铈、稀土、铁矿床的成矿时代和矿床成因[J]. *矿床地质*, 1991, 1(1): 59-70.
- [9] 杜小军, 张强. 浅析白云鄂博铁—铈—稀土矿的成矿机理[J]. *科技信息(科学教研)*, 2008(24): 640-641.
- [10] 侯宗林. 白云鄂博铁—铈—稀土矿床基本地质特征成矿作用、成矿模式[J]. *地质与勘探*, 1989, 25(7): 1-5, 22.
- [11] 王登红, 杨建民, 闫升好, 等. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. *成都理工学院学报*, 2002, 29(5): 70-75.
- [12] 田世洪, 丁梯平, 毛景文. 四川牦牛坪稀土矿床地幔流体成矿的碳、氢、氧硫同位素证据[J]. *地球学报*, 2003, 24(6): 543-547.
- [13] 刘春花, 吴才来, 邵源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 77-96.
- [14] 徐海明, 邹天人, 方景玲, 等. 新疆波孜果尔铈铈矿床时代及成因研究[J]. *矿床地质*, 2012, 31(增刊 1): 625-626.
- [15] SMITH M P, CAMPBELL L S, KYNICKY J. A review of the genesis of the world class Bayan Obo[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 459-476.
- [16] 费红彩, 肖荣阁, 王安建. 白云鄂博 REE-Nb-Fe 稀土矿赋矿岩系建造研究评述[J]. *地质学报*, 2012, 86(5): 81-90.
- [17] 曹荣龙, 朱寿华, 王俊文. 白云鄂博铁—稀土矿床的物质来源和成因理论问题[J]. *中国科学: B 辑*, 1994, 24(12): 1298-1307.
- [18] 蒋明全. 牦牛坪稀土矿床地质构造特征及其控矿意义[J]. *矿床地质*, 1992, 11(4): 351-358.
- [19] 陈从德, 蒲广平. 牦牛坪稀土矿床地质特征及其成因初探[J]. *地质与勘探*, 1991(5): 18-23.
- [20] 徐海明, 方景玲, 王军, 等. 新疆波孜果尔铈铈矿床地质特征[J]. *矿床地质*, 2010, 29(增刊 1): 309-310.
- [21] 祝立人, 刘春根, 丁少辉, 等. 江西省稀土矿产资源潜力评价报告[R]. 南昌: 江西省地质调查研究院, 2011.
- [22] 许成, 宋文磊, 何晨, 等. 外生稀土矿床的分布、类型和成因概述[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(2): 234-241.
- [23] 邓茂春, 曾载淋, 徐九发, 等. 赣南离子型重稀土矿类型及找矿潜力[J]. *江西地质*, 17(2): 121-127.
- [24] 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征[J]. *地质学报*, 1988(4): 311-328.
- [25] 杨武斌, 牛贺才, 单强, 等. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2924-2932.
- [26] 冯守忠. 巴尔哲碱性花岗岩稀有稀土矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿产与地质*, 1993, 7(1): 45-50.
- [27] 袁忠信, 白鸽. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. *矿床地质*, 2001, 20(4): 53-60.
- [28] 吴澄宇, 黄典豪, 白鸽, 等. 南岭花岗岩类起源与稀土元素的分馏[J]. *岩石矿物学杂志*, 1990, 9(2): 106-116.
- [29] 马配学, 刘在信, 白鸽. 广东寨背顶富重稀土花岗岩地球化学特征及岩石成因[J]. *河北地质学院学报*, 1991, 14(4): 351-360.
- [30] 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2008, 33(6): 743-754.
- [31] 汪绍年. 广西大容山—十万大山岩带中花岗岩类特征及成因[J]. *岩石学报*, 1991, 5(2): 73-80.
- [32] 邓希光, 陈志刚, 李献华, 等. 桂东南地区大容山—十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *地学评论*, 2004, 50

- (4): 426-432.
- [33] 朱金初, 李向东, 沈渭洲. 广西花山复式花岗岩体成因的铍、钨和氧同位素研究[J]. 地质学报, 1989(3): 225-235.
- [34] 梁金城, 邓继新, 陈懋弘. 桂西南早三叠世中酸性火山岩及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(2): 141-148.
- [35] 傅杨荣, 杨昌松, 陈沐龙, 等. 海南省稀土矿资源潜力评价成果报告[R]. 海口: 海南省地质调查院, 2011.
- [36] 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹, 等. 江西足洞和关西花岗岩体的铀-铅-钷-铽体系同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 1989, 2(1): 37-48.
- [37] 王京彬. 河岭式酸性稀土火山岩系的演化特征与稀土富集[J]. 中国稀土学报, 1989, 7(2): 68-72.
- [38] 李石. 湖北庙娅碳酸岩地球化学特征及岩石成因探讨[J]. 地球化学, 1980(4): 345-355.
- [39] 李石. 湖北杀熊洞碳酸岩杂岩体地球化学特征及其成因探讨[J]. 地球化学, 1991(3): 245-254.
- [40] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区相矿床的铷-锶同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
- [41] 许成, 宋文磊, 漆亮, 等. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 422-430.
- [42] 田京祥, 张日田, 范跃春, 等. 山东郯山碱性杂岩体地质特征及与稀土矿的关系[J]. 山东地质, 2002, 18(1): 21-25.
- [43] 宋友贵, 沈昆, 等. 鲁西南苍山县龙宝山-莲子汪地区金矿成矿规律研究及找矿靶区优选[R]. 济南: 山东省地质科学实验研究院, 1997.
- [44] 李培忠, 于津生. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩岩体年龄及其意义[J]. 地球化学, 1993(4): 389-398.
- [45] 张杰, 朱雷, 张覃. 贵州织金含稀土磷块岩矿床生物成矿基本特征[J]. 稀土, 2006, 27(1): 93-94.
- [46] 陈耀宇, 朱四宏. 北祁连中段与碱性岩有关的金、稀土矿床地质特征及控矿因素[J]. 华南地质与矿产, 2001(4): 45-49.
- [47] 吴正涛, 赵呈祥, 易平乾, 等. 青海省矿产资源潜力评价成果报告[R]. 西宁: 青海省地质矿产勘查开发局, 2013.
- [48] 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [49] 张培善. 中国稀土矿床成因类型[J]. 地质科学, 1989(1): 26-32.
- [50] 王辑, 李双庆, 王保良. 狼山-白云鄂博裂谷系[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 1-25.
- [51] 张宗清, 袁忠信, 唐索寒. 白云鄂博矿床年龄和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 148-156.
- [52] 裘培卓, 秦朝建, 周国富, 等. 白云鄂博年代学新资料[C]// 第九届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2009: 477-479.
- [53] 赵景德, TATSUMOTO M, MINKIN J A, 等. 以多种证据建立的白云鄂博稀土矿床成矿矿物的生成顺序[J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(4): 1-17.
- [54] 赖小东. 内蒙古白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床成因问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [55] 骆耀南. 中国攀枝花-西昌裂谷带[G]// 中国攀西裂谷文集. 北京: 地质出版社, 1985: 1-25.
- [56] HOU Z Q, TIAN S H, YUAN Z X, et al. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 244(1): 234-250.
- [57] 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 等. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 145-176.
- [58] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 川西冕宁-德昌 REE 成矿带成矿年代学研究: 热液系统维系时限和构造控矿模型约束[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 177-187.
- [59] 丘志力, 梁冬云, 王艳芬, 等. 巴尔哲碱性花岗岩锆石稀土微量元素、U-Pb 年龄及其成岩成矿指示[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 239-250.
- [60] 杨武斌, 罗勇, 单强, 等. 内蒙古巴尔哲稀有稀土多金属矿床特征[J]. 矿物学报, 2009(增刊 1): 266.
- [61] 陈毓川, 王登红, 李厚民, 等. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2008.