

doi: 10.11720/wtyht.2022.1040

赵泽霖,李俊建,张彤,等.华北地区稀土矿床特征及找矿方向[J].物探与化探,2022,46(1):46-57.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1040

Zhao Z L, Li J J, Zhang T, et al. Geological characteristics and prospecting direction of rare earth element deposits in North China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 46-57. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1040

华北地区稀土矿床特征及找矿方向

赵泽霖¹, 李俊建¹, 张彤², 倪振平³, 彭翼⁴, 宋立军⁵

(1. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013; 4. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007; 5. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081)

摘要: 在系统收集华北地区稀土矿床资料基础上, 分析了华北地区稀土资源现状及稀土矿床的时间、空间分布规律。分析认为, 华北地区稀土矿床成矿类型主要包括沉积变质型、火成碳酸岩浆型、岩浆热液型、伟晶岩型和离子吸附型。根据华北地区稀土矿床构造位置及控矿特征, 认为华北地区古老变质基底、太古宙—古元古代陆块边缘裂谷带、中元古代陆缘裂谷带、燕山期滨西太平洋活动陆缘均是稀土矿床成矿的有利地球动力学背景。区域深大断裂、地槽发育初期的火山—沉积事件及碱性正长岩和碱性花岗岩类岩浆活动, 是寻找各类稀土矿床的有利构造—沉积—岩浆条件, 降雨量高、冲积平原、棕壤—褐土分布区则提供良好的稀土元素地球化学背景。

关键词: 华北板块及周缘; 稀土矿床; 成因类型; 找矿方向

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0046-12

0 引言

我国稀土资源丰富, 是全球稀土第一储量大国和生产大国, 以全球 23% 的稀土储量供应全球 90% 以上的市场需求。稀土元素包括轻稀土元素镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu) 和重稀土元素钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu)、铕 (Y)、钪 (Sc)。稀土元素独特的磁性、光性能和催化性, 已成为科学技术界不可替代的元素^[1]。稀土元素是战略新兴产业的七大领域 (新一代尖端武器、信息技术、节能环保、医药和医疗设备、高端装备制造、新材料、新能源汽车) 所必需的功能材料、结构材料和关键性原料^[2], 被列为我国“战略性关键矿产”^[3-4]。

我国境内稀土资源勘探开发历史可追溯至 20 世纪 30~40 年代, 由苏联地质人员对我国阿尔泰山

南缘进行矿产勘查和开采工作, 建立了伟晶岩型稀有金属矿床的成矿理论和一整套的地质勘查、储量计算的方法体系。新中国建立后, 20 世纪 50~70 年代发现白云鄂博超大型稀土—铌矿床、扎鲁特旗“八〇一”大型碱性花岗岩铌—稀土矿床、山东微山县鄱山热液脉状稀土矿及江西、广东等地的风化淋积型 (离子吸附型) 稀土矿床, 80 年代中期发现四川凉山“牦牛坪式”大型稀土矿床。2012 年以来, 中国地质科学院分别在四川甘孜州甲基卡锂矿、福建永定大坪铌钽矿、广东铌钽矿及离子吸附型稀土、广西稀土矿、云南铍锂矿、江西稀有矿、湖南平江稀有金属铌钽矿、新疆大红柳滩铌钽锂矿及甘肃和青海等地新增大量资源储量, 同时丰富了我国“三稀”矿产的成矿理论研究。

虽然我国稀土资源的勘探和开发取得显著成果, 但对稀土矿床的成矿理论研究多集中在单矿床的成矿年代、流体性质及演化、成矿模式及资源潜力^[5-14]或控矿岩体的年代学、地球化学及岩矿关

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-05-24

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190379-31、1212011121029、200110200038); 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题 (2016YFC0600107、2018YFC0603805-1)

第一作者: 赵泽霖 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查和成矿作用研究工作。Email: tishan_yuei@163.com

通讯作者: 李俊建 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域成矿学和矿产勘查工作。Email: tjljunjian@163.com

系^[15-21]等方面,对区域矿床时空分布、成因联系及资源特征缺少总结研究。本文在系统搜集华北地区稀土矿床成矿资料的基础上,系统梳理了各类稀土矿床类型的时空分布、成矿特征及构造环境,总结华北地区稀土矿床的产出规律,希望为下一步找矿方向及预测工作提供依据。

1 华北稀土资源现状

华北地区共发育各规模矿床 24 处,大型—超大型稀土矿床集中分布在内蒙古自治区和山东省境内,河北、河南、山西等地也有稀土矿床产出,但规模多以小型或矿点为主(图 1)。

内蒙古地区重要稀土矿床主要为白云鄂博超大型火成碳酸岩型 REE-Nb 矿、阿拉善右旗桃花拉山变质型稀土矿、三道沟复合内生型稀土矿。此外,内蒙古地区发现共生或伴生稀土元素的稀有矿床众多,包括武川县产出赵井沟铌钽矿和潘家沟铌钽矿点、锡林浩特发现石灰窑铌钽铷锂矿床、镶黄旗加不斯铌铷锂矿、东七一山超大型铷萤石矿等。

山东省稀土矿床主要产地为微山县鄱山及兰陵县龙宝山,稀土资源储量占全国约 8%。微山县鄱山稀土矿成矿元素以轻稀土为主,是我国三大轻稀土资源基地之一。20 世纪 70 年代勘查评价认为,鄱山稀土矿为我国一处著名的中大型轻稀土矿床;20 世纪 90 年代末期,鄱山矿区外围发现了一批小型稀土矿床和矿点,同时发现龙宝山稀土矿^[23]。

河北省已发现的稀土矿床类型较为丰富,包括风化壳—沉积型、霞石正长岩型、伟晶岩型等多种类型。但各类型矿床多呈矿点产出,规模较小。河北武安市暴庄稀有稀土矿为典型风化壳—沉积型,矿化元素多为轻稀土^[14]。河北内生稀土矿床主要分布在阳原县响水沟、怀安县右所堡、宣化县黑渣峪—平泉—隆化和阜平等地,主要矿化元素为镧、铈和钇等。

河南省稀土金属矿化主要位于豫南靠近秦岭—大别造山带区域,东秦岭北部沿黑沟—栾川—确山深大断裂带两侧形成有 EW 向展布的富碱侵入岩带^[24]。在方城北部的宋坟、双山、鱼池正长岩体显示较好的稀土金属矿化^[20,25]。此外,河南、山西 2

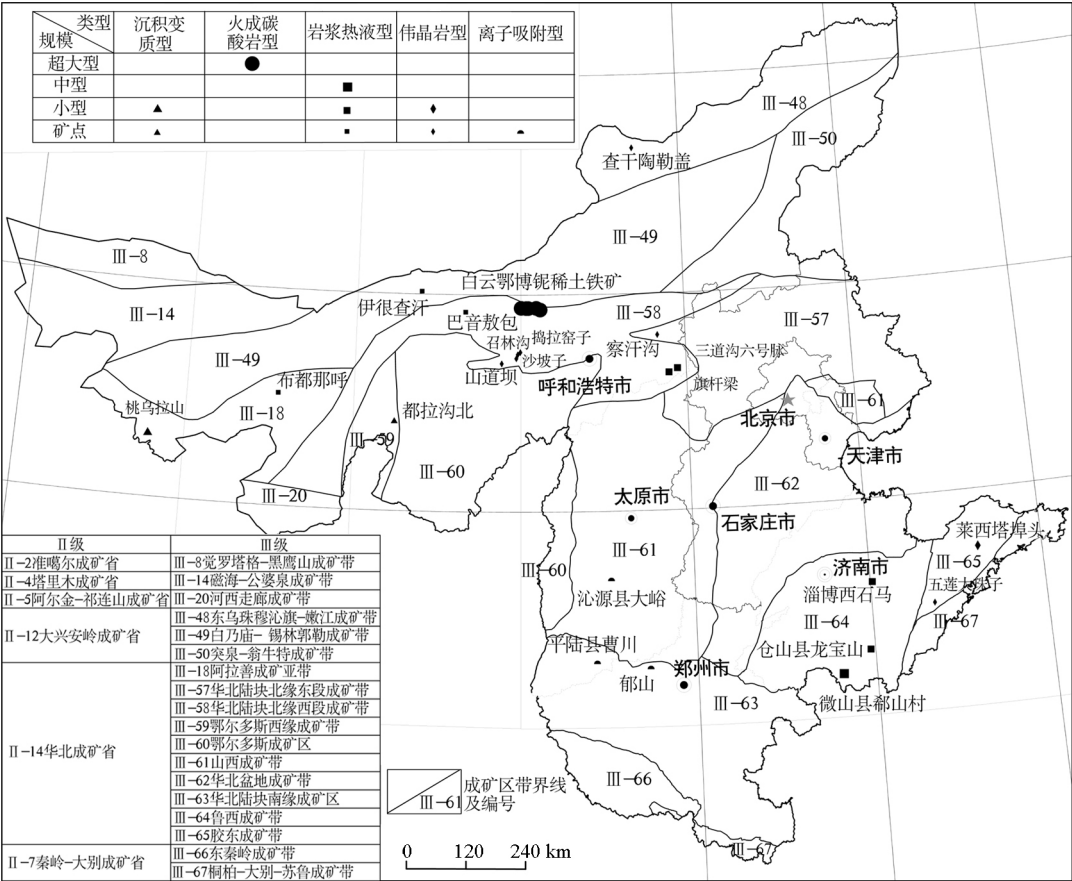


图 1 华北地区稀土矿分布(据文献[22]修改)

Fig.1 Distribution map of rare earth elements deposits in North China (revised according to the reference[22])

省外生稀土稀有金属成矿潜力较大,主要与华北地区的 G 层铝(黏)土矿化层相关。据近年勘探工作,在山西省沁园大峪、平陆曹川、阳泉地区、五台白家庄等铝土矿区^[26]及豫西地区的郁山^[27]、陕县—渑池—新安—济源等铝黏土矿区^[25]均发现稀有、稀土元素达工业品位。

2 华北稀土矿成因类型

自显生宙以来,华北地区经历了多次板块间的俯冲拼贴事件,而具多样的构造背景,为该区域多样化的稀土矿床发育提供了构造条件^[28]。华北板块与其北部的西伯利亚板块、微块体在古生代期间发育拼贴碰撞事件,整个古生代构造—岩浆活动频发^[29-30]。华北板块南部于印支期发育古秦岭洋的俯冲消减,形成秦岭—大别和苏鲁造山带,也形成了大量三叠—侏罗纪不同性质的岩浆岩。而燕山期以来同时发生古太平洋俯冲、华北克拉通减薄、地幔柱上涌等多种构造事件,使得燕山期成为我国重要的构造—岩浆—成矿期^[31]。华北地区在不同构造背景下有不同成因类型矿床的形成,其成矿类型主要包括沉积变质型、火成碳酸岩型、碱性岩浆岩型、伟晶岩型和离子吸附型,典型矿床见表 1。

2.1 沉积变质型稀土矿

华北地区沉积变质型稀土矿主要产于龙首山地块内中元古代龙首山群,典型矿床为阿拉善桃花拉山小型稀土矿和都拉沟北稀土矿。成矿过程经历了原生沉积矿化和后期热液富集成矿等多阶段成矿作用,成矿具多期多阶段性。早期原生沉积时,稀土稀有元素等成矿物质在火山岩浆活动及热液活动作用下发生初步富集和沉淀,但成矿规模较小。后期的岩浆热液、变质流体等作用下,使得原生沉积岩层发生热液交代或变质作用,成矿物质在热液流体的重新萃取、迁移下,在有利的沉积构造内富集成矿。

根据目前研究程度,华北地区沉积变质型稀土矿床含矿层位为条带状大理岩、角闪片岩、钙质片岩。矿层与围岩呈渐变关系,并可见同步褶皱现象,局部为断层接触。矿石自然类型分为大理岩型(褐铁矿化大理岩、黑云母大理岩)和片岩型(黑云方解片岩、绿泥钙质片岩、方解黑云片岩)两种。大理岩型矿石组成的矿体呈夹层状产于片岩型矿石中,层位稳定,在走向和倾向上渐变为片岩型矿石,二者呈过渡相变关系。矿体顶底板围岩一般为条带状大理岩,局部地段的围岩为花岗质混合岩,岩石稳定性较强。矿石结构为不等粒花岗变晶结构、花岗变晶结

构、花岗鳞片变晶结构,矿石构造有块状构造、片状构造。两种不同类型的矿石中主要工业矿物为铈铁矿、铁铁金红石、独居石、易解石、褐帘石、磷灰石、锆石。其中,含铈独立矿物有铈铁矿、钦铁金红石、易解石,含稀土独立矿物有独居石、易解石、褐帘石,含磷独立矿物有磷灰石、独居石。稀土元素亦可呈分散状态以类质同象存在于其他副矿物及脉石矿物之中。

沉积变质型稀土矿床往往发育强烈的围岩蚀变,蚀变类型多样,主要包括褐铁矿化、黑云母化、白云母化、磷酸盐化、钾钠长石化、磁铁矿化、黄铁矿化、碳酸盐化、硅化、重晶石化、萤石化等,其生成顺序大致分两期:早期主要与稀土元素沉淀有关,生成矿物以独居石为主,其次有微量磷钇矿;晚期以大量磷灰石的生成为特征,并见其有独居石、铈铁矿和钦铁金红石的细小包体,局部富集构成条带状(与变质条带方向基本一致),足以说明它是在铈、稀土矿化之后热液作用下形成。矿区内可见吕梁期闪长岩和加里东晚期花岗岩,且变形为片麻状,后期的岩浆和构造作用为叠加变质成矿提供了更多可能。

2.2 火成碳酸岩型稀土矿

华北地区火成碳酸岩型稀土矿典型矿床包括白云鄂博铈稀土铁矿主矿区、东矿区、西矿区和主东矿境外底盘、都拉哈拉等铁稀土矿床,同时在山东莱芜胡家庄稀土矿区和微山县郁山稀土矿区内也见火成碳酸岩发育。该类型稀土矿成矿潜力巨大,白云鄂博稀土矿铁矿床规模为超大型。该类稀土矿床受控于火成碳酸岩的产出状态,成矿物质直接来源于碳酸岩浆。火成碳酸岩成因不同于沉积碳酸盐岩,相应地在岩石产状、结构构造及地球化学等方面均有差异。火成碳酸岩呈岩脉或岩墙状产出,或平行于不同岩层接触面而呈层状,或与围岩有一定的夹角。火成碳酸岩尖灭于围岩的地方,往往会分枝发育分枝细脉或呈锯齿状接触^[32]。岩浆型碳酸岩富集微量元素 Ba、Th、Nb、REE,而 U、Zr 和 Hf 则出现负异常,REE 与微量元素含量具正相关性^[33]。该类碳酸岩碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)接近正常地幔值^[34]($-5\% \pm 2\%$),氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)也较沉积型碳酸岩更低。此外,氢氧同位素、硫同位素等也可以有效区分两类碳酸岩,火成碳酸岩内全岩、重晶石或黄铁矿的硫同位素接近零或更低。火成碳酸岩成矿,其矿体周边也往往发育强烈的围岩蚀变,其中与稀土矿床关系最密切的蚀变类型为钠氟交代作用。氟主要与钙质岩石发生反应,主要矿物组合为萤石、氟碳铈矿、独居石、铈铁矿、金红石、铈铁金红石、磁铁矿、赤铁矿、

表 1 华北地区典型稀土稀有金属矿床成矿信息

Table 1 Metallogenic information of typical rare earth elements deposits in North China

矿床	成矿类型	矿区地质特征	矿体特征	矿石特征	规模	时代
白云鄂博稀土矿	火成碳酸岩型	出露中元古界下白云鄂博群和石炭系宝力格庙组火山岩。白云鄂博群包括 17 个岩性段 (H1-H17) 和 6 个岩组,其中 H8 白云质大理岩是主要的铈—稀土—铁矿体主要赋矿层位,H9 为板岩,为矿体顶板,呈断层接触。矿区侵入岩包括古元古代片麻状斜长片麻岩和海西期闪长质—花岗岩类,与矿化无关。矿区褶皱发育,作用于白云鄂博群各岩性段,H1、H2 为宽沟北向核部,H9、H10 为白云向斜核部。矿区北部为白银角拉克—宽沟断裂,为 EW 走向并与乌兰布拉格大断裂交汇,交汇处控制了白云岩产出	矿体包括主矿、东矿、西矿和东部接触带 4 个矿区。东矿产于白云向斜北翼,NEE 走向,倾向 SSW,长 1 300 m,宽均 179 m,最大延伸深 870 m,呈不规则透镜体状,两端渐变成白云岩及板岩;主矿体位于白云向斜南翼,走向近 EW 向,倾向 S,长 1 250 m,平均宽 245 m,最大延伸深度 1 030 m,呈透镜体状,两端尖火于白云岩中。西矿矿段为主矿以西由东西向排列十数个 小矿体组成,东西长 10 km,南北宽约 1 km,呈层状、透镜状,具条带状构造,铁矿体与围岩界限不清,由品位圈定。东部接触带位于白云向斜构造的北翼,白云岩与海西期花岗岩接触部位处。矿体产状多与围岩产状一致,总体呈透镜体、层状和似层状	矿石具有粒状变晶结构、粉尘状结构、交代结构、固溶分离结构等;具块状构造、浸染状构造、条带状构造、层纹状构造、斑杂状构造、角砾状构造等。主要有用元素为铁、铈、稀土,其次含多种分散元素和放射性元素。造岩矿物为白云石、方解石和石英等。稀土矿物主要为独居石、氟碳铈矿、黄河矿、氟碳钙铈矿和磷铈石等。含铁矿物为磁铁矿和赤铁矿。主要含铈矿物为铈铁矿、易解石、褐钨铈矿、烧绿石和铈铁金红石等。铁矿储量 1 500 Mt (35% Fe),REE 储量 48 Mt (6% RE ₂ O ₃) 和 1 Mt Nb (0.13% Nb)	超大型	中元古代
祁山轻稀土矿	碱性岩浆岩型	出露太古宇泰山群山草峪组黑云斜长片麻岩。燕山期花岗岩发育,受微山湖—东平湖断裂控制。含矿碱性杂岩体主为正长岩、石英正长岩、霓辉石英正长岩,呈椭圆形,NW-SE 向延伸,SW 向倾斜,侵入山草峪组。控矿构造和容矿构造为 EW 向、NNW 向、NE 向、NEE 向、SN 向和 EW 向 6 组断裂	矿体包以萤石型矿脉、石英重晶石型矿脉和石英方解石型矿脉形式产出,括矿脉 60 余条,多分布在碱性岩体顶、底板附近。单条矿脉长 110~580 m,深 200~500 m,宽 0.2~8 m。矿脉由氟碳铈矿、萤石、重晶石、石英、方解石等组成。矿脉多充填于北西向压扭性构造裂隙中,倾向 210~245°,倾向 50°~70°	稀土矿物主为氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、铈磷灰石、铈镧霓辉石,次为锆英石、褐帘石、独居石、榍石等。主要有益组分为轻稀土元素,包括 Ce、La、Nd、Pr、Sm 以及 Eu、Er、Gd、Lu、Y 等;其他金属元素有 Tu、U、Mo、Pb 等。TR ₂ O ₃ 变化于 1.55%~4.92%,平均 3.25%	中型	燕山晚期
桃花拉山稀有稀土矿	沉积变质型	矿区出露前中元古界二道凹群中深变质岩系,含矿层位为条带状大理岩夹角闪片岩、薄层状钙质片岩。与矿体接触处多为薄层状,颜色变暗,颗粒渐次变细。侵入岩主要包括吕梁期闪长岩和加里东晚期花岗岩。成矿前断裂为走向 310°~315°,大体呈“S”形,中间近东西,为控矿的主要构造。成矿后断裂对矿体起破坏作用	矿带东西长达 11 km,南北宽约 60 m,走向 295°~310°,南倾,倾角 60°~75°。目前大致圈出 20 个矿体(西矿区 12 个,东矿区 8 个),长 35~904 m,多数为 200~500 m。平均厚 1.4~14.0 m,延深一般在 200 m 以下。矿体多为似层状,少数呈透镜状。矿层与围岩呈渐变关系,并可见同步褶皱现象,局部为断层接触。围岩一般为条带状大理岩,局部地段的围岩为花岗质混合岩	矿石自然类型分为大理岩型和片岩型。主要工业矿物为铈铁矿、铁铁金红石、独居石、易解石等。矿石结构为不等粒花岗岩变晶结构、花岗岩变晶结构、花岗鳞片变晶结构,矿石构造有块状构造、片状构造。与铈、稀土、磷矿化有关的蚀变主要为褐铁矿化、黑云母化、磷酸盐化、钾钠长石化	中型	古元古代
塔埠头稀土矿	伟晶岩型	矿区出露地层主要为古元古界荆山群野头组,岩性为黑云变粒岩、大理岩、斜长角闪岩等,总体走向近 EW 向。矿区侵入岩主要为燕山晚期花岗岩、花岗伟晶岩、石英脉,稀土矿化主要发育在花岗伟晶岩中。断裂构造主要有近 EW 向的上庄断裂及水集—徐格庄断裂	共探明 4 个工业矿体,稀土氧化物总储量 398 t,平均品位 1.603%,主要包含 4 个矿体 ^[38] ,矿体呈似层状或板状,长 33.5~60 m,平均厚 1.57~7.47 m,延伸 7~43 m,倾向为 NNE,倾角 32°~68°	矿石矿物包括褐帘石、氟碳铈矿、锆石、榍石、钍石等;脉石矿物主要有钾长石、斜长石、石英、黑云母等。矿石中稀土元素含量较高,主要为铈、镧、钕、钇等,铈、钍均达到工业要求,另含一定量的铀、钽、钍、铷、铯等有用元素	小型	燕山期
东七一山稀有矿	碱性岩浆岩型	矿区出露寒武—奥陶系西双鹰山组碎屑岩夹火山岩。侵入岩为七一山复式杂岩体,其中含矿岩体为碱长花岗斑岩和似斑状碱长花岗岩,局部或外围见石英闪长岩、花岗闪长岩、二云母花岗岩、黑云母花岗岩等	52 号铷矿体分布在钠长石化花岗岩中。走向 NE—SW 向,倾向 N。为一简单透镜体,长 400 m,厚 172.5 m。铷矿体含铷矿物为细粒绿柱石,脉石矿物为钠长石、石英、黄玉、铁锂云母等	铷矿体见于钠长石化花岗岩中,元素赋存于锂云母和磷云母内。铷含量 0.1%~0.215%,平均 0.133%。铷矿石具细脉状,矿石矿物为细粒状绿柱石,BeO 含量 0.1%~0.43%,平均 0.172%。铷矿矿物为铷铁矿—钽铁矿、细晶石—烧绿石、铷钽金红石类等	大型	白垩纪

磷灰石和重晶石等。钠主要在硅质较高的岩石中聚集,表现为霓石化、钠闪石化、钠长石化、黑云母化和金云母化^[35]。

白云鄂博铌稀土铁矿床中稀土矿体含矿碳酸岩的上述地质和地球化学特征都有不同的解释,也导致稀土矿化成因争执不休。白云鄂博稀土矿体的赋矿碳酸岩从结构来说,分为粗粒和细粒白云岩,其中细粒白云岩在地球化学性质上更接近深源或幔源特征,但也多少受到地壳或海水的交换和混合作用^[33]。而粗粒白云岩具更低的 SiO_2 、REE 和 C-O 同位素组成等,具有沉积碳酸盐岩特征。白云鄂博铌稀土铁矿床其他位置可见碳酸岩强发育,说明区域内有过深源碳酸岩浆侵入活动,而矿区内广泛的蚀变反应以及靠近碳酸岩接触的石英岩内发生了非常明显的霓长岩化现象^[36],可能的解释是矿区内既发育沉积型碳酸盐岩,也发育岩浆型碳酸岩,二者的化学组成及同位素组成等方面可能都遭受后期的扰动。但是主要的成矿物质来源可能由火成碳酸岩浆及其热液来提供,这种成矿模式可以允许具典型沉积结构特征的碳酸盐岩存在。白云鄂博铌稀土铁矿床矿石类型复杂,团块状矿石中穿插有含稀土矿物的萤石脉、方解石脉、氟碳铈矿脉等,有强烈的与稀土矿化有关的围岩蚀变,矿石中脉状萤石、石英中的流体包裹体中富 CO_2 及含稀土子矿物^[37],种种迹象均显示稀土矿床更具内生成因的属性。

2.3 碱性岩浆岩型稀土矿

华北地区与碱性岩有关岩浆型稀土矿典型矿床包括微山县郝山村中型稀土矿、苍山县龙宝山小型稀土矿、淄博市西石马小型稀土矿、内蒙古三道沟小型磷稀土矿六号脉、棋杆梁小型磷稀土矿、巴音敖包稀土矿点、伊很查汗稀土矿点。此外具成矿潜力的碱性岩体还包括河南方城北部宋坟—双山—鱼池一带,河北兴隆麻地和迁西汉儿庄等地碱性花岗岩,虽有矿化但多未形成矿产地。成岩成矿时代为新太古代—古元古代和燕山期。

岩浆热液型稀土矿床的形成与碱性正长岩类或碱性花岗岩类岩浆活动密切相关,矿体多直接赋存于该类侵入岩内部或与围岩接触带部位,成矿的岩性专属性较强,主要岩石类型为(含霓)辉石正长(斑)岩、斑状正长岩、正长斑岩、石英碱长正长岩、二长斑岩等。华北地区面型分布的成矿碱性侵入岩体多形成于燕山期,岩浆高度分异演化,地球化学具极度富碱,稀土总量高且轻稀土高度富集,微量元素富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Zr 等高场强元素,具富集地幔来源的特征^[38-39],这类

岩浆活动可能是华北地区中生代伸展构造体制下克拉通减薄作用的结果^[40]。兰陵龙宝山碱性岩体 I_{Sr} 值为 0.707 766,全岩氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)为 7.6‰~11.7‰,该区龙宝山稀土矿的锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)、氧和铅同位素与之类似^[41]。这表明该类矿床的成矿物质直接来源于岩浆内部,稀土稀有元素的富集是由于该类侵入岩体独特的岩浆分异演化方式、岩浆—热液转变及岩浆热液的蚀变作用所致。

碱性岩体的成矿作用经历碱性岩浆演化阶段—伟晶岩岩浆阶段—高温热液阶段(450~350℃)—低温热液阶段(<350℃),工业意义的矿化形成于低温热液阶段^[6,42]。岩浆演化阶段主要体现在不同于一般花岗岩造岩矿物的结晶顺序,含矿碱性花岗岩长石、石英在先,含铁硅酸盐矿物在后,各种副矿物及稀有稀土矿物大多偏后^[43]。碱性花岗质岩浆演化后期往往形成伟晶岩或碳酸岩,在内蒙古巴尔哲“八〇一”稀土矿区内可见含矿碱性岩体的岩相变化特征为岩体内部为伟晶岩,向外依次为强钠长石化钠闪石花岗岩带、中钠长石化钠闪石花岗岩带、弱钠长石化钠闪石花岗岩带、似斑状碱性花岗岩带。由此可见,伟晶岩浆活动是碱性花岗质岩浆活动分异演化直至成矿的一部分。微山县郝山稀土矿包裹体证明硅酸盐岩浆演化晚期,逐渐分异出富碳酸盐、硫酸盐而贫硅的熔体^[6]。

岩浆热液型稀土矿床热液蚀变及流体作用显著发育,如内蒙古巴尔哲矿体发育显著的钠长石化蚀变^[17],山东郝山稀土矿床的碱质交代现象(钾长石化、钠长石化等)和其他诸如碳酸盐化、重晶石化、萤石化、硫化物矿化、稀土矿化等蚀变。矿体内部脉石矿物包裹体多可见熔融包裹体、含矿物子晶(重晶石、萤石、天青石等)包裹体、富 CO_2 包裹体及气液两相包裹体,表明热液来源于岩浆。含矿热液阴离子包括 F^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} ,阳离子主要为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 和稀土元素阳离子,其中 F^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 对稀土元素有很强的络合作用^[44]。多期次隐爆角砾活动导致大气降水和碳酸岩中脱出的 CO_2 的加入,使得成矿流体的密度和压力逐渐降低,直至稀土矿物析出沉淀成矿。

2.4 伟晶岩型稀土矿

华北地区伟晶岩型稀土矿主要集中在山东地区,以莱西市塔埠头小型稀土矿、五莲大珠子稀土矿点、内蒙古察汗沟矿点、山道坝矿点、沙波子矿点、召林沟矿点、捣拉窑子矿点和查干陶勒盖矿点为代表。该类矿床矿体直接赋存于伟晶岩内,发育较弱的蚀变作用,可见钠长石化、钾长石化、碳酸盐化、蛭石化

及黄铁矿化等,稀土、稀有和放射性等多种有益元素的矿化以褐帘石、氟碳铈镧矿、锆石、榍石、钍石等矿物产出。赋存于花岗伟晶岩内的矿体呈板状,矿体长 30~60 m 不等,平均厚度 1.57~7.47 m,延深 7~43 m。

含矿不等粒伟晶花岗岩的侵位受控于 NE 向、NW 向断裂及荆山群野头组大理岩的层间裂隙,其同位素年龄 (SHRIMP U-P) 为 (154 ± 6) Ma、 (160 ± 3) Ma,属中生代侏罗纪,由此认为该稀土矿的成矿时代为燕山早期。燕山早期花岗质岩浆沿断裂构造侵入,稀土矿物从花岗伟晶岩期开始产生矿化。在伟晶岩浆内部还产生了钾、钠等交代作用。随着温度的进一步下降,伟晶岩浆中的稀土矿物开始结晶、分异和富集,最终形成具有工业价值的稀土矿。

2.5 离子吸附型稀土矿

华北地区离子吸附型稀土矿床的经济意义虽较内生成因稀土矿床低,但由于其主要赋存于华北地区广泛分布的铝土矿内且缺少足够的注意,因此对华北地区各铝土矿床的稀土元素重新进行检测分析有望扩大该类矿床规模。伴随铝土矿化事件,华北地区离子吸附型稀土矿主要产在山西省内沁园大峪、平陆曹川、阳泉地区、五台白家庄等铝土矿区,河南西部郁山、陕县、渑池、新安、济源等铝黏土矿区,河北省内暴庄铝土矿区。铝土—稀有—稀土矿化层产于中石炭统底部,与中奥陶及下奥陶统灰岩呈平行不整合接触。山西省平陆曹川铝土岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (318.9 ± 3) Ma^[26],代表了稀土元素矿化时期为晚石炭世早期。

3 成矿规律

3.1 时间分布特征

华北地区稀土矿床成矿历史悠久,多个地质时代、多种构造背景下均发育有稀土金属矿化事件,成矿作用呈多期次性。根据主要典型矿床的成矿年代学研究结果显示,华北地区稀土金属成矿期主要形成于新太古代、古元古代、中元古代、石炭纪、华力西期及燕山期。

新太古代稀土成矿期主要为岩浆分异演化成矿,成矿岩浆为新太古代—古元古代基性—酸性岩脉。该期基性岩脉或酸性岩脉内发育富集稀土元素的有用矿物磷灰石,含稀土磷灰石富集程度高达工业品位构成矿体。该成矿期以三道沟小型磷稀土矿 6 号脉、棋杆梁磷稀土矿为主,矿化发育在含磷透辉岩脉及透辉钾长岩脉内。稀土元素赋存于磷灰石

内,有用矿物呈细脉状、透镜状、团块状产于透辉岩脉及钾长岩脉内。含稀土磷透辉岩脉和透辉钾长岩脉侵入至中太古界集宁岩群变质建造中,同时被南梁山平移断层和半沟村北平移断层切割。磷灰石内稀土元素富集是岩浆分异演化晚期产物,矿化时间与基性岩脉同期,形成于新太古代至古元古代。

古元古代稀土成矿期发育有岩浆岩型巴音敖包、伊很查汗矿点、沉积变质型桃花拉山小型稀土矿、都拉沟北矿点和伟晶岩型察汗沟、山道坝、沙波子、召林沟、捣拉窑子等稀土矿点。桃花拉山小型稀土矿为与火山活动有关的同沉积成矿,稀有、稀土等有益成矿物质由火山活动中挥发分搬运,在碳酸岩结晶成岩过程中富集成矿,后期岩浆热变质事件可能导致成矿物质进一步富集。矿体呈似层状、透镜状产于古元古界二道凹群下岩组上段的条带状大理岩夹角闪片岩、薄层状钙质片岩内。矿体特征显示明显的同沉积矿化特征,因此矿化时间与沉积事件同期。二道凹群内黑云角闪片岩 Rb-Sr 等时线年龄为 1 773 Ma,黑云石英片岩中锆石 U-Pb 年龄为 1 732 Ma、2 120 Ma,含黑云斜长石英岩和角闪黑云片岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $(2\,389.9 \pm 46)$ Ma^[45],因此二道凹群同沉积矿化年龄为新元古代。

中元古代稀土成矿期与位于华北克拉通北部中元古代岩浆活动有关,该期岩浆活动形成大量基性火山岩墙和火成碳酸岩浆^[46]。中元古代时期,华北克拉通北部发育有中元古代渣尔泰—白云鄂博裂谷系,其构造背景被认为是哥伦比亚超大陆于中元古代 (~1.4 Ga) 发生裂解的响应^[47]。华北地区该期成矿事件以白云鄂博超大型稀土矿床为代表,明确矿床地质特征为矿体呈层状产于碳酸岩内。关于含矿碳酸岩是火成碳酸岩浆成因还是组成白云鄂博群的“H8”白云岩;矿床成因方面,矿化是碳酸岩浆成矿^[48]还是类似于上文“桃花拉山”火山喷溢—沉积成矿^[49]亦或其他成矿模式;成矿时代方面,是中元古代成矿^[5]还是加里东期成矿^[10]亦或多期成矿,都存在争议。白云鄂博矿区成矿元素具多样性,多种元素的成矿规模为世界罕见的超大型,其所处构造环境自古元古代哥伦比亚超大陆裂解以来,显生宙又受兴蒙造山作用影响,因此认为其成矿时代可能具多期性。大裂谷环境下火成碳酸岩是稀土矿化的有利条件^[42],因此初步认为白云鄂博稀土矿床为中元古代碳酸岩浆型矿床。

石炭纪稀土成矿期为分布于华北克拉通内部的铝土—稀有—稀土矿化事件,石炭纪风化林滤地质作用不仅产生了华北地区 G 层铝土矿化层,同时伴

有稀土稀有元素的矿化。华北地区铝土矿内的稀土稀有元素矿化,多是在原铝土矿层内经过此后勘探而发现。稀有稀土元素以离子状态吸附于铝土或粘土矿物表面,因此成矿类型为离子吸附型稀土稀有矿床。该期稀土元素的风化淋滤成矿作用主要产在山西省内沁园大峪、平陆曹川、阳泉地区、五台白家庄等铝土矿区,河南西部郁山、陕县、渑池、新安、济源等铝黏土矿区,河北省内暴庄铝土矿区。华北克拉通内 G 层铝土矿为奥陶系马家沟组灰岩之上的铝土矿层,是我国铝土资源重要的产出层位^[50]。该层铝土—稀有—稀土矿化层产于中石炭统底部,与中奥陶及下奥陶统灰岩呈平行不整合接触。山西省平陆曹川铝土岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 (318.9 ± 3) Ma^[26],代表了稀土元素矿化时期为晚石炭世早期。

燕山期是我国北方岩浆型稀土稀有矿床的主要成矿时代,稀土金属成矿多与该期广泛产出的正长岩类和碱性花岗岩类相关。目前发现的该成矿期的矿产地包括山东微山县郝山中型稀土矿、淄博市西石马小型稀土矿、苍山县龙宝山小型稀土矿、莱西望城塔阜头小型稀土矿和五莲大珠子矿点。燕山期是华北地区构造体制转折的关键时期,区域上由挤压构造体制转化为伸展构造体制,由 EW 向转变为 NNE 向的盆岭构造格局^[40]。构造体制转变导致在华北东部形成大量中生代岩浆岩^[51],其中具稀土金属矿化的岩浆岩包括鲁西郝山—龙宝山碱性杂岩体、莱芜碱性岩、莱西市花岗伟晶岩,内蒙东部巴尔哲碱性花岗岩、武川赵井沟正长花岗岩,河南方城北碱性岩体,河北兴隆麻地和迁西汉儿庄碱性花岗岩等。碱性岩体成岩时代多集中于 120~130 Ma^[19,52],而稀土成矿年龄介于 110~135 Ma^[15,53-54],成矿元素的富集由于岩浆内富稀土矿物的直接结晶演化或岩浆期后热液内含矿挥发分的分解。

3.2 空间分布特征

整体而言,华北地区稀土金矿矿床主要分布于阿拉善右旗—白云鄂博—扎鲁特旗一带、方城北—微山一带及华北克拉通内部,呈点状分布,形成 3 大稀有金矿矿化带。其中,前两者稀有金矿矿化带与华北陆块周缘构造缝合带密切相关,阿拉善右旗—白云鄂博—扎鲁特旗稀土金矿矿化带沿华北克拉通北缘或陆缘增生带分布,而方城北—微山稀土金属矿化带沿秦岭—大别造山带分布。

阿拉善右旗—白云鄂博—扎鲁特旗一带稀土矿床的 EW 向展布特征与该区显生宙构造单元格局显示良好的吻合关系,它们均处近 EW 展布的华北克拉通北缘或陆缘增生造山带内部。其中,桃花拉山

稀土金属矿床于桃花拉山复式背斜的南翼,沙口—吊吊山—查干德尔斯压扭性断裂带内,大地构造位置处龙首山地块南缘,南为华北克拉通,北部阿拉善地块以查干楚鲁蛇绿岩带与兴蒙造山带相连^[55]。白云鄂博稀土矿大地构造位置处于乌兰布拉克以南与白银角拉克—宽沟大断裂交汇处^[7],而乌兰布拉克断裂被认为华北克拉通边缘断裂^[56]。“八〇一”稀土矿古生代大地构造位置处于苏左旗—西乌旗晚古生代弧盆系内^[17],为华北陆块与西伯利亚板块之间的增生造山带内部。阿拉善右旗—白云鄂博—扎鲁特旗一带经历了前寒武纪陆缘裂谷、古生代复杂增生造山作用,并于燕山期受到古太平洋俯冲影响,构造—岩浆热作用活跃,尤其在裂谷构造背景及后造山阶段内形成大量高分异碱性花岗岩或正长花岗岩,该类岩浆及热液是形成区域稀土稀有矿化的有利条件。

方城北—鲁西—莱州一带稀土金属矿化带与秦岭—大别造山带的展布方向较为一致,均位于秦岭—大别造山带北侧华北陆块南缘区域内。该成矿带 EW 向连续产出有莱西塔埠头伟晶岩型稀土矿、莱芜胡家庄碱性岩—碳酸岩型稀土矿、龙宝山碱性岩型稀土矿、微山县郝山稀土矿以及位于河南省内方城北碱性岩型稀土矿化。这些稀土金属的矿床矿体赋存于相应的碱性正长岩和碱性花岗岩内,全岩矿化或以含矿萤石脉、石英重晶石脉或石英方解石脉等脉状形式产出。因此,矿床的 EW 向带状分布受控于华北板块南缘侏罗—白垩纪期间剧烈发育的碱性岩浆活动。含矿侵入岩体多为板内伸展体制下具高度分异演化的特征,地球化学具极度富碱,稀土总量高且轻稀土高度富集,微量元素富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Zr 等高场强元素,具富集地幔来源的特征^[39],这类岩浆活动可能是华北地区中生代伸展构造体制下克拉通减薄作用的结果^[40]。

华北克拉通内部点状分布的稀土金矿矿床属于伴生于铝土矿的外生金属矿床,成矿类型为离子吸附型。该类矿床的分布没有明显的方向性,主要与区域内部已发现的铝土矿区地点有关,可能受控于古地理位置和古地形等因素^[57-58]。华北克拉通内部离子吸附型矿床或矿化点在山西、河南和河北内部产出较多,例如山西省沁园大峪、平陆曹川、阳泉地区、五台白家庄等铝土矿区、豫西地区的郁山、陕县—渑池—新安—济源等地,均产在已发现铝土矿内。相对而言,处于板块缝合带附近的山东、河南南部、河北北部及内蒙古未见此类矿床的报道。

4 控矿因素与找矿方向

华北地区稀土资源储量丰富,成矿类型众多。不同成因类型稀土矿床的形成是不同的构造背景、沉积及岩浆等综合作用下的结果。通过对华北地区各类成因类型典型矿床的控矿要素的整理分析,总结了区域构造、地层及岩浆等方面的控矿意义,在今后稀土矿床的勘探研究中可以作为有利的成矿条件进行勘探部署工作。

4.1 地球动力学背景与稀土金属成矿

华北地区地质演化历史悠久,不同的地球动力学背景下形成具有独特的构造—沉积—岩浆—变质事件组合,为不同类型稀土矿床的产生提供了良好条件。华北地区古老基底发育太古宙高级变质岩,是赋存透辉石型磷—稀土矿的有利岩石条件,形成了三道沟岩浆热液型稀土矿床。在太古宙—古元古代陆块边缘发育裂隙槽或裂谷带,是形成古元古代沉积变质型铈稀土矿的有利条件。中元古代伴随哥伦比亚超大陆裂解,在华北陆块北缘形成白云鄂博裂谷,海相基性—中酸性火山喷发活动及火成碳酸岩浆剧烈,是火成碳酸岩型或喷流—沉积型铁铈稀土矿床的有利构造条件。华北地区于中生代受滨西太平洋活动大陆边缘构造环境的强烈影响,壳幔作用剧烈,形成了雄伟的大兴安岭火山—岩浆构造带,大量地球深部成矿物质在岩浆—热液作用下活化、迁移,是与陆相中酸性火山—侵入岩浆热液相关的铈稀土等矿床的有利条件。

4.2 区域性深大断裂与稀土金属成矿

矿床的形成过程中,成矿流体的运移和成矿物质的沉淀、定位空间以及其形成的保存条件都与构造息息相关,因此构造是成矿控制地质因素中的首要因素。

区域性深断裂构造带对稀土金属成矿的控制作用显著。区域性深断裂构造带均为超壳断裂,有的甚至切穿了岩石圈,所以它们是地幔物质上涌的通道。而与其有生成联系的次断裂或裂隙构造带往往就是成矿物质沉淀定位的空间。另一方面,这些深断裂构造带具有活动时间长的特点,所以在其一侧或两旁常分布形成不同时代的矿床。例如巴尔哲含稀土碱性花岗岩来源于上地幔;华北板块北缘深断裂带两侧分布不同时代形成的铁、铈、稀土矿床、铁、铜、镍、铅、锌、金、萤石等矿床。

4.3 火山—沉积作用与稀土金属成矿

地槽发育初期,剧烈火山岩浆作用带来大量的

挥发组分和稀有、稀土等有益元素,在同沉积过程中成矿物质就地卸载沉淀,沉积成岩过程中直接伴随稀土、稀有金属的矿化。随着褶皱隆起及区域变质和蚀变作用等因素,原沉积物发生进一步变化,CO₂与H₂O沿裂隙或破碎带流动,使成矿物质再次活化、迁移、富集。华北地区,阿拉善群中桃花拉山铈稀土矿床即在地槽发育初期,剧烈火山岩浆与沉积作用下形成。

4.4 岩浆及期后热液与稀土金属成矿

华北地区与岩浆及期后热液有关的内生稀土金属矿床众多,其中白云鄂博铁铈稀土矿床与碳酸岩浆喷发活动有直接关系,巴尔哲铈稀土矿的含矿母岩为碱性花岗岩,山东郯山岩浆热液型稀土矿床受济南造山中期侵入岩亚相、郯山后造山正长岩组合、郯山细粒含霓辉石英正长岩控制。塔埠头式伟晶岩型稀土矿床受招远造山早期侵入岩亚相、玲珑—昆嵛山造山早期片麻状花岗岩组合、笔架山伟晶不等粒花岗岩的控制,矿体主要赋存于该岩体晚期形成的伟晶岩脉内。碱性正长岩或碱性花岗岩类是十分有利的稀土金属的成矿物质来源,这类岩浆在演化后期形成富含挥发分的岩浆热液,并携带稀土元素构成含矿热液,稀土金属矿体往往赋存于碱性正长岩和碱性花岗岩杂岩体内的蚀变带部位,因此碱性杂岩体内的钠—氟蚀变带是寻找岩浆热液型稀土矿床的有利部位。

4.5 元素地球化学背景与稀土金属成矿

稀土元素地球化学性质稳定,在岩浆、变质等地质作用过程中其含量相对稳定。也正因如此,稀土元素在地球表层生态地质作用过程中可以得到很好的富集,且不同岩石构造单元其背景值出现分化差异^[59]。唐坤等^[60]创新性地研究了华北地球化学走廊内稀土元素富集与大地构造单元、土壤类型、自然景观和降雨量之间的关系:兴蒙造山带→华北克拉通→南苏鲁造山带稀土背景依次升高;半干旱草原区→山地丘陵区→冲积平原区稀土背景依次升高;棕壤—褐土较灰钙土—棕钙土带和黑钙土—栗钙土—黑垆土带稀土背景值高;华北北方降雨量低,其稀土背景值低于华北南部降雨量高处。因此,华北克拉通南部、南苏鲁造山带、棕壤—褐土较灰钙土—棕钙土带和冲积平原区、降雨量高处是有利的稀土矿地球化学背景。区域汇水域沉积物背景值也是稀土矿化良好找矿指标,全国圈定了华北地区稀土地球化学远景区,王学求等^[61]在此基础上丰富了远景区,包括白云鄂博—乌拉特后旗稀土远景区、内蒙古根河—额尔古纳稀土远景区、山东微山—威海稀土

远景区、山西古县—河南洛阳稀土远景区、河南嵩县稀土远景区、内蒙古阿拉善右旗—甘肃永昌稀土远景区。

5 结语

1) 华北地区稀土矿床成矿时代集中于新太古代成矿期、古元古代成矿期、中元古代成矿期、石炭纪成矿期及燕山期成矿期;构造位置上,华北地区稀土矿床主要分布在阿拉善右旗—白云鄂博—扎鲁特旗一带、方城北—微山一带及华北克拉通内部点状分布,形成华北地区 3 大稀有金矿化带。

2) 华北地区稀土矿床成矿类型主要包括沉积变质型、火成碳酸岩浆型、岩浆热液型、伟晶岩型和离子吸附型,其中沉积变质型稀土矿以桃花拉山稀土矿为代表,火成碳酸岩浆型以白云鄂博稀土矿床为代表,岩浆热液型以微山—郛山稀土矿和巴尔哲“八〇一”稀土矿为代表,伟晶岩型以莱西阜头山稀土矿为代表,华北地区离子吸附型稀土矿与铝土矿相伴生。

3) 华北地区及周缘构造单元演化复杂多样,在古老变质基底、太古宙—古元古代陆块边缘裂谷带、中元古代陆缘裂谷带、燕山期滨西太平洋活动陆缘均是稀土矿床成矿的有利地球动力学背景。区域深大断裂、地槽发育初期的火山—沉积事件及碱性正长岩和碱性花岗岩类岩浆活动,是寻找各类稀土矿床的有利构造—沉积—岩浆条件。降雨量高、冲积平原、棕壤—褐土分布区具备良好的稀土矿成矿地球化学背景。

参考文献 (References):

[1] 高凤平,张璞,刘大成,等.国际稀土市场新格局与中国稀土产业战略选择[J]. 国际贸易问题,2019(7):63-81.
Gao F P, Zhang P, Liu D C, et al. The rare earths global market updates and the rare earths industry master plan of the united states and its allies [J]. Journal of International Trade, 2019(7): 63-81.

[2] 王登红,王瑞江,孙艳,等.中国三稀矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报,2016,37(5):569-580.
Wang D H, Wang R J, Sun Y, et al. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 569-580.

[3] 王登红.关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报,2019,93(6):1189-1209.
Wang D H. Study on critical mineral resources; Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation

[J]. Acta Geological Sinica, 2019, 93(6): 1189-1209.

[4] 王登红.战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 2019,41(2):65-72.
Wang D H. Discussion on issues related to strategic key mineral resources [J]. Geology of Chemical Minerals, 2019, 41(2): 65-72.

[5] 范宏瑞,胡芳芳,陈福坤,等.白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿区碳酸岩墙的侵位年龄——兼答 Le Bas 博士的质疑[J]. 岩石学报,2006,22(2):519-520.
Fan H R, Hu F F, Chen F K, et al. Intrusive age of No.1 carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia: With answers to comment of Dr. Le Bas [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2): 519-520.

[6] 李健康,袁忠信,白鸽,等.山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约[J]. 矿物岩石,2009,29(3):60-68.
Li J K, Yuan Z X, Bai G, et al. REE-forming fluid evolution and its controlling to REE (AG) mineralizing in the Weishan deposit, Shandong [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(3): 60-68.

[7] 刘健,凌明星,李印,等.白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿床的稀土成矿模式综述[J]. 大地构造与成矿学,2009, 33(2):270-28.
Liu J, Ling M X, Li Y, et al. REE ore-forming models of giant Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit: A review [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(2): 270-28.

[8] 于学峰,唐好生,韩作振,等.山东郛山—龙宝山地区与碱性岩有关的稀土矿床地质特征及成因[J]. 地质学报,2010,84(3):407-417.
Yu X F, Tang H S, Han Z Z, et al. Geological characteristics and origin of rare earth elements deposits related with alkaline rock in the Chishan' Longbaoshan area, Shandong Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(3): 407-417.

[9] 李六权,安林,上官中江.小秦岭某地硷性火山岩型稀有、稀土矿化特征及资源潜力[J]. 陕西地质,2017, 35(2):1-6.
Li L Q, An L, Shanguan Z J. Mineralization characteristics, resource potential and prospecting significance of rare and rare earth minerals in alkaline volcanic rocks in small qinling mountains [J]. Geology of Shaanxi, 2017, 35(2): 1-6.

[10] 章雨旭,江少卿,张绮玲,等.论内蒙古白云鄂博群和白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床成矿的年代[J]. 中国地质,2008,35(6):1129-1137.
Zhang Y X, Jiang S Q, Zhang Q L, et al. A discussion on forming time of the Bayan Obo group and ore-forming time of the Bayan Obo giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1129-1137.

[11] 杜青松,赵力颖,李志华,等.内蒙古中部花岗岩型稀有金属矿床特征与找矿标志[J]. 中国钼业,2018,42(2):8-14.
Du Q S, Zhao L Y, Li Z H, et al. Ore characteristics and prospecting marks of granite type rare metal deposits in the middle of the Inner Mongolia autonomous region [J]. China Molybdenum Industry, 2018, 42(2): 8-14.

[12] 郝美珍,赵永岗,张顺,等.白云鄂博超大型 Nb-Fe-REE 矿床主矿体形态变化及深部找矿方向的探讨[J]. 地质调查与研究,2018,41(3):167-175.
Hao M Z, Zhao Y G, Zhang S, et al. Study on the variation of the main ore body form and deep prospecting direction of the giant

- Bayan Obo Nb-Fe-REE iron ore deposit [J]. Geological Survey and Research, 2018, 41(3): 167–175.
- [13] 费晓杰, 曾普胜, 颜春军, 等. 从同位素年龄看白云鄂博稀土—铌—铁矿床区域地质演化历史[J]. 地质与勘探, 2019, 55(2): 461–471.
- Fei X J, Zeng P S, Yan C J, et al. The regional geological evolution history of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit derived from isotopic ages [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(2): 461–471.
- [14] 徐颖, 孟万涛. 河北省稀有、稀土矿床类型分析[J]. 矿产勘查, 2019, 10(2): 249–252.
- Xu Y, Meng W T. Types of rare and rare earth deposits in Hebei [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(2): 249–252.
- [15] 田京祥, 张日田, 范跃春, 等. 山东祁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.
- Tian J X, Zhang R T, Fan Y C, et al. Geological characteristics and relation with rare earth elements of alkalic complex in Chishan of Shandong Province [J]. Geology of Shandong, 2002, 18(1): 21–25.
- [16] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 等. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床成矿过程中的流体不混溶作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 163–166.
- Fan H R, Hu F F, Yang K F, et al. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the super large REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 163–166.
- [17] 朱京占, 张国辉, 杜青松, 等. “八〇一”稀有稀土矿床碱性花岗岩的含矿性、矿化规律及成因分析[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 207–214.
- Zhu J Z, Zhang G H, Du Q S, et al. Ore potentiality, mineralization laws and genesis of alkaline granite in 801 rare ree deposit [J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 207–214.
- [18] 叶松, 周宝霞, 叶德隆, 等. 稀有金属花岗岩的特征及其成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 767–776.
- Ye S, Zhou B X, Ye D L, et al. Characteristics of the rare metal granite and its mineralization [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2015, 34(5): 767–776.
- [19] 梁雨薇, 赖勇, 胡弘, 等. 山东省微山稀土矿正长岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(4): 652–666.
- Liang Y W, Lai Y, Hu H, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics study of syenite from Weishan REE deposit, Western Shandong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(4): 652–666.
- [20] 吴成斌, 侯广顺, 向世红, 等. 东秦岭岳池正长岩体岩石地球化学特征及稀有金属元素、稀土元素矿化[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 58–64.
- Wu C B, Hou G S, Xiang S H, et al. Geochemical characteristics of Yuchi syenites from East Qinling and the rare metal elements, rare earth element mineralization [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(2): 58–64.
- [21] 程细音, 祝新友, 邹滔. 大兴安岭中南段与花岗岩相关稀有金属矿地质地球化学标志[C]// 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2019.
- Cheng X Y, Zhu X Y, Zou T. Geological and geochemical indication of granite-related rare metal deposits in the middle and southern section of the Great Xing'an Mountains [C]// The 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods, 2019.
- [22] 李俊建. 华北地区重要矿种区域成矿规律研究成果报告[R]. 天津地质调查中心, 2013.
- Li J J. Research results on regional metallogenic regularity of important minerals in North China [R]. Tianjin Center, China Geological Survey, 2013.
- [23] 董广莹. 苍山龙宝山地区碱性杂岩体金成矿特征研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2011.
- Dong G Y. Study of gold mineralization features of alkaline complex rock mass in longbaoshan area of cangshan country [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [24] 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 东秦岭北部富碱侵入岩钽、铌、铅同位素特征及构造意义[J]. 地球化学, 2000, 29(5): 455–461.
- Zhang Z W, Zhu B Q, Chang X Y, et al. Nd, Sr, Pb isotopic geochemistry of the alkali-rich intrusive rocks in East Qinling, central China and its tectonic significance [J]. Geochimica, 2000, 29(5): 455–461.
- [25] 梁涛, 白凤军, 卢欣祥, 等. 河南省方城北部正长岩岩体稀有金属、稀土元素的矿化[J]. 资源导刊: 地球科技版, 2014(1): 9–12.
- Liang T, Bai F J, Lu X X, et al. Mineralization of rare metal elements and rare earth elements in syenite bodies from Northern Fangcheng County, Henan Province [J]. Resources Guide: Earth Science and Technology, 2014(1): 9–12.
- [26] 王银喜, 李惠民, 杨杰东, 等. 华北古风化壳型稀有稀土矿床的发现及意义[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 605–606.
- Wang Y X, Li H M, Yang J D. Discovery of Paleoeathering type rare earth deposits in North China and its significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(4): 605–606.
- [27] 李中明, 赵建敏, 冯辉, 等. 河南省郁山古风化壳型稀土矿层的首次发现及意义[J]. 矿产与地质, 2007, 21(2): 177–180.
- Li Z M, Zhao J M, Feng H, et al. First discovery of palaeo-weathering crust type REE deposit in Yushan area of Henan province and its significance [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(2): 177–180.
- [28] 李俊建, 付超, 唐文龙, 等. 内蒙古东乌旗沙麦钨矿床的成矿时代[J]. 地质通报, 2016, 35(4): 68–74.
- Li J J, Fu C, Tang W L, et al. The metallogenic age of the Shamai wolframite deposit in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(4): 524–530.
- [29] 王树庆, 胡晓佳, 赵华雷. 内蒙古苏左旗洪格儿地区新发现晚石炭世碱性花岗岩[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(2): 81–85.
- Wang S Q, Hu X J, Zhao H L. New discovery of Late Carboniferous alkaline granite in Hongger area, Suzuo Banner, Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 2019, 42(2): 81–85.
- [30] 李俊建, 付超, 党智财, 等. 蒙古国矿产资源概况[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 19–29.
- Li J J, Fu C, Dang Z C, et al. Overview of mineral resources in Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(1): 19–29.
- [31] 邢光福, 洪文涛, 张雪辉, 等. 华东地区燕山期花岗岩质浆与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1571–1590.
- Xing G F, Hong W T, Zhang X H, et al. Yanshanian granitic magmatism and their mineralizations in East China [J]. Acta Pet-

- rologica Sinica, 2017, 33(5): 1571–1590.
- [32] 周振玲,李功元,宋同云,等.内蒙古白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨[J].地质论评,1980,26(1):35–44.
Zhou Z L, Li G Y, Song T Y, et al. Geological characteristics and genesis of dolomite carbonate rocks in Bayan Obo, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 1980, 26(1): 35–44.
- [33] 杨晓勇.白云鄂博铁—稀土—铌矿床地质特征及其研究中存在的科学问题——兼论白云鄂博超大型矿床的成因[J].地质学报,2015,89(12):2323–2350.
Yang X Y. Geological characteristics and their scientific problems of the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit: Discussion on the origin of Bayan Obo super-large deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(12): 2323–2350.
- [34] Hoefs J. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin: Springer, 1997.
- [35] 陶克捷,杨志明,张培善,等.白云鄂博矿区周围火成碳酸岩岩墙地质特征[J].地质科学,1998,33(1):73–83.
Tao K J, Yang Z M, Zhang S P, et al. Systematic geological investigation on carbonatite dykes in Bayan Obo, Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Geology, 1998, 33(1): 73–83.
- [36] Yang X M, Yang X Y, Zheng Y F, et al. A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China [J]. Mineralogy and Petrology, 2003, 78: 93–110.
- [37] 孟庆昌, Drew L J. 白云鄂博碳酸岩矿床的成因特征[J].地质与勘探,1981,17(3):11–15.
Meng Q C, Drew L J. Genetic characteristics of the Bayan Obo carbonate deposit [J]. Geology and Exploration, 1981, 17(3): 11–15.
- [38] 倪振平,田京祥,王来明,等.山东省重要矿产区域成矿规律[M].济南:山东科学技术出版社,2016.
Ni Z P, Tian J X, Wang L M, et al. Metallogenic regularity of important mineral resources in Shandong Province [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2016.
- [39] 王涛,刘燊,胡瑞忠,等.苏鲁造山带碱性岩的成因研究——主微量元素地球化学证据[J].矿物学报,2010,30(2):194–206.
Wang T, Liu Y, Hu R Z, et al. Petrogenesis of alkaline rocks in the Sulu orogen: Evidence from elemental geochemistry [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(2): 194–206.
- [40] 翟明国,孟庆任,刘建明,等.华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J].地学前缘,2004,11(3):285–297.
Zhai M G, Meng Q R, Liu J M. Geological features of mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 285–297.
- [41] 夏庆霖,高燕,王小哈.鲁西龙宝山金矿成矿流体特征与矿床成因模型[J].黄金科学技术,2002,10(3):13–17.
Xia Q L, Gao Y, Wang X H. Characteristics of metallogenic fluid and genesis model of the longbao mountain gold mine in western shandong province [J]. Gold Science & Technology, 2002, 10(3): 13–17.
- [42] 刘琰,陈超,舒小超,等.青藏高原东部碳酸岩—正长岩杂岩体REE矿床成矿模式——以大陆槽REE矿床为例[J].岩石学报,2017,33(7):1978–2000.
Liu Y, Chen C, Shu X C, et al. The formation model of the carbonatite-syenite complex REE deposit in the east of Tibetan Plateau: A case study of Dalucao REE deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(7): 1978–2000.
- [43] 白鸽,袁忠信,丁孝石,等.吉林巴尔哲稀有金属碱性花岗岩的成岩成矿作用讨论[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集,1980.
Bai G, Yuan Z X, Ding X S, et al. Discussion on the diagenesis and mineralization of the rare metal alkaline granite in Balzhe, Jilin [C]//Proceedings of Institute of Mineral Deposits Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 1980.
- [44] Richards J P, McCulloch M T, Chappell B W, et al. Sources of metal in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: Evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, 55: 565–580.
- [45] 内蒙古自治区地质矿产局.内蒙古自治区岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources. Petrostratigraphy of Inner Mongolia autonomous region [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [46] 翟明国,彭澎.华北克拉通元古代构造事件[J].岩石学报,2007,23(11):2665–2682.
Zhai M G, Peng P. Paleoproterozoic events in the North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2665–2682.
- [47] 刘超辉,刘福来.华北克拉通中元古代裂解事件:以渣尔泰—白云鄂博—化德裂谷带岩浆与沉积作用研究为例[J].岩石学报,2015,31(10):3107–3128.
Liu C H, Liu F L. The Mesoproterozoic rifting in the North China Craton: A case study for magmatism and sedimentation of the Zhaertai-Bayan Obo-Huade rift zone [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 3107–3128.
- [48] 周振玲,李功元,宋同云,等.内蒙古白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨[J].地质论评,1980,26(1):35–43.
Zhou Z L, Li G Y, Song T Y, et al. Geological characteristics and genesis of dolomite carbonate rocks in Bayan Obo, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 1980, 26(1): 35–43.
- [49] 涂光炽.试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床[J].中国科学: D 辑,1998(S2):1–6.
Tu G C. Discussion on some peculiarities of the formation mechanism of the geological setting of the material composition of the unconventional super-large deposits: a preliminary discussion on the unconventional super-large deposits [J]. Science in China: Series D, 1998 (S2): 1–6.
- [50] 常全明.华北地台 G 层铝土矿控矿条件初探[J].唐山工程技术学院学报,1991,13(3):41–46.
Chang Q M. Preliminary study on ore-controlling conditions of bauxite in G bed of North China platform [J]. Rise and Development of Modern Industrial Education in Tangshan, 1991, 13(3): 41–46.
- [51] 赵新福,李占轲,赵少瑞,等.华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆—热液成矿系统[J].地球科学,2019,44(1):52–68.
Zhao X F, Li Z K, Zhao S R. Early cretaceous regional-scale magmatic-hydrothermal metallogenic system at the southern margin of the North China Craton [J]. Earth Science, 2019, 44(1): 52–68.
- [52] 李志丹,李效广,崔玉荣,等.内蒙古赵井沟铌钽矿床燕山期成矿:来自 LA-MC-ICP-MS 独居石、锆石 U-Pb 和黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar

年龄的证据[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2019,44(1): 238-251.

Li Z D, Li X G, Cui Y R, et al. Yanshanian mineralization of Zhaojinggou Nb-Ta deposit, Inner Mongolia: Evidences from the Monazite and Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb and biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar Geochronology [J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2019, 44(1): 238-251.

[53] 储同庆.山东碳酸岩磷灰石的特征及其研究意义[J]. 矿物岩石,1992,12(3):5-12.

Chu T Q. The characteristics of apatite from carbonatite in shandong and its researching significance [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1992, 12(3): 5-12.

[54] 张敏,袁忠信.内蒙“八〇一”稀有元素碱性花岗岩氧同位素地球化学[C]// 中国地质科学院矿床地质研究所文集(21), 1988.

Zhang M, Yuan Z X. Oxygen isotope geochemistry of the “801” rare elements alkaline granite in Inner Mongolia[C]// Proceedings of Institute of Mineral Deposits Geology, Chinese Academy of Geological Sciences(21),1988.

[55] 天津地质调查中心.阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查成果报告[R].天津地质调查中心,2018.

Tianjin Geological Survey Center.Research result on geological and mineral investigation in Xiaolongshan and Yabulai areas of Yinshan metallogenic belt [R]. Tianjin Center, China Geological Survey, 2018.

[56] 周建波,郑永飞,吴元保.苏鲁造山带西北缘五莲花岗岩中锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].科学通报,2002,47(22):67-72.

Zhou J B, Zheng Y F, Wu Y B. Zircon U-Pb ages of Wulian granites in the northwestern margin of the Sulu orogenic belt and their geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(22): 67-72.

[57] 李俊建,何玉良,张彦启,等.豫西成矿带成矿区划研究进展[J].矿床地质,2014,33(S1):803-804.

Li J J, He Y L, Zhang Y Q, et al. Research progress of metallogenic regionalization in western Henan metallogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2014,33(S1): 803-804.

[58] 李俊建,党智财,付超,等.华北陆块晋冀 Al-Fe-Au-Pb-Zn-Ag-Cu-煤成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J].地质学报, 2016,90(7):1482-1503.

Li J J, Dang Z C, Fu C, et al. Geological characteristics and mineral resource potential of the Jin-Ji Al-Fe-Au-Pb-Zn-Ag-Cu-coal metallogenic belt in the North China Block [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7): 1482-1503.

[59] 刘东盛,周建,严桃桃,等.腾冲地块稀土地球化学背景与泥岩中稀土超常富集特征[J].地球学报,2020,41(6):759-769.

Liu D S, Zhou J, Yan T T, et al. Geochemical background of REEs: Super-enrichment in argillaceous rocks in Tengchong Block [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6): 759-769.

[60] 唐坤,王学求,迟清华,等.兴蒙-华北地球化学走廊带稀土元素含量与空间分布[J].地球科学,2018,43(3):655-671.

Tang K, Wang X Q, Chi Q H, et al. Concentration and spatial distribution of REE in geochemical transect of Xingmeng orogenic belt, North China Craton [J]. Earth Science, 2018, 43(3): 655-671.

[61] 王学求,周建,迟清华,等.中国稀土元素地球化学背景与远景区优选[J].地球学报,2020,41(6):747-758.

Wang X Q, Zhou J, Chi Q H, et al. Geochemical background and distribution of rare earth elements in China: Implications for potential prospects [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6): 747-758.

Geological characteristics and prospecting direction of rare earth element deposits in North China

ZHAO Ze-Lin¹, LI Jun-Jian¹, ZHANG Tong², NI Zhen-Ping³, PENG Yi⁴, SONG Li-Jun⁵

(1.Tianjin Center of China Geological Survey,Tianjin 300170,China; 2.Inner Mongolia Autonomous Institute of Region Geological Survey,Hohhot 010020,China; 3.Shandong Institute of Geological Survey,Jinan 250013,China; 4.Henan Institute of Geological Survey,Zhengzhou 450007,China;5.Hebei Provincial Bureau of Geological Survey,Shijiazhuang 050081,China)

Abstract: Based on the systematic collection of information of rare earth element (REE) deposits in North China, this paper analyzes the current situation of REE resources and the temporal-spatial distribution regulation of REE deposits in North China.The mineralization types of the REE deposits in North China mainly include sedimentary and metamorphic type, igneous carbonate magma type, magmatic hydrothermal type, pegmatite type, and andion-adsorption type. Given thegeotectonic locations and ore-controlling factors of REE deposits in North China, the geodynamic background favorable for the formation of the REE deposits includes the ancient metamorphic basement, Archean-Paleoproterozoic rift zones on continental margins, Middle Proterozoic rift zoneson continental margins, and Yanshanian active continental margins in coastal areas of the West Pacific. The tectonic-sedimentary-magmatic prospecting favorable conditions include volcanic-sedimentary events during the early development of regional deep faults and geosynclines and the magmatic activities of alkaline syenites and alkaline granites. Meanwhile, the geochemical background favorable for REE mineralization consists of high precipitation amount, alluvial plains, and brown soil distribution areas.

Key words: North China Plate and its periphery; rare earth element deposits; mineralization type; prospecting direction

(本文编辑:蒋实)