

· 非主题来稿 ·

新疆喀拉昆仑山大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地质特征及矿床成因

王辉¹, 范玉海^{1,2*}, 廖友运¹, 张少鹏^{1,2}, 杨晨¹, 许将¹, 陈瑞丽¹

WANG Hui¹, FAN Yuhai^{1,2*}, LIAO Youyun¹, ZHANG Shaopeng^{1,2}, YANG Chen¹, XU Jiang¹, CHEN Ruili¹

1. 中煤航测遥感局煤航地质勘查院, 陕西 西安 710199;

2. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054

1. Geological Exploration Institute of Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau, Xi'an 710199, Shaanxi, China;

2. School of Earth Science and Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:对喀喇昆仑山大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地质特征及矿床成因进行研究,为该区找矿勘查工作部署提供依据。通过详细的野外地质调查,在总结大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地质特征的基础上,配合镜下鉴定、矿床地球化学分析,探讨矿床成因类型与成矿作用,分析成矿期后的构造变形,预测矿化体的空间就位,提出找矿方向和找矿思路。大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带含矿建造沉积环境为近陆滨-浅海碳酸盐岩台地相。矿化带处于石炭系帕斯群灰岩组(a组)上段(含矿泥质灰岩段)上部,区内延伸大于30km,西段发现2条矿化体(I-1、I-1),东段发现7条矿化体(II-1~II-7)。单矿化体一般长170~2000m,厚度10~32m,矿化体产状与地层产状一致,层控特征明显。矿石化学测试结果表明,矿化体内含Fe、Al、Ti、LREE、Nb、Ta等多种金属成矿元素。矿床成因类型为近陆滨海相沉积型。矿源为古陆源区红土型风化壳,以沉积物重力流和胶体溶液混合流体形式快速搬运,并在近陆滨岸地带以事件沉积作用快速卸载堆积而成。成矿期后,含矿建造遭受了强烈的构造改造,形成了总体呈NWW向展布的断褶带,带内发育的复式-叠加反“S”型褶皱构造构成了区内最特征的控矿构造样式。该带找矿前景好,找矿潜力大,通过进一步的矿产地质工作,有望在该带实现Fe、Al、Ti,尤其是稀有、稀土元素的重要找矿突破。

关键词:稀土-铌-铁-钛多金属矿化带;石炭系;帕斯群;浅海碳酸盐建造;大黄山;喀喇昆仑山;沉积型矿床

中图分类号:P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)06-0988-13

Wang H, Fan Y H, Liao Y Y, Zhang S P, Yang C, Xu J, Chen R L. Geology and genesis of the Dahuangshan REE-Nb-Fe polymetallic mineralization zone in Karakoram Range. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 988-1000

Abstract: The study on geology and genesis of the rare earth niobium iron titanium polymetallic mineralization zone in Dahuangshan, Kunlun Mountain, Kara can provide the basis for the exploration work in this area. Based on detailed field geological survey and summarizing of the geological characteristics of the Dahuangshan RE-Nb-Fe-Ti deposit, together with microscopic identification and geochemical analysis, the genetic types and mineralization of the iron ore are discussed. The analysis of structural deformation after metallogenic period can lead to the prediction of orebody location and prospecting target generation. The depositional environment of the ore-bearing formation in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti mineralization belt is littoral-shallow sea carbonate platform facies. The mineralization zone is located in the upper part (limestone Formation) of the Pasi Group (ore-bearing argillaceous limestone), and

收稿日期:2019-10-29;修订日期:2020-04-14

资助项目:中国地质调查局项目《西昆仑成矿带矿产资源遥感地质调查》(编号:1212011120888)、《西昆仑成矿带黑恰至三十里营房地区矿产地质调查项目》(编号:12120113046100)、《新疆皮山县哈巴坎达坂一带1:5万J43E024023、J43E024024、I43E001023、I43E001024四幅区域地质调查》(编号:K16-1-LQ07)和陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划青年项目(编号:2021JQ-984)

作者简介:王辉(1971-),男,教授级高工,从事基础地质、矿产地质、遥感地质研究。E-mail:wanghui.rock@163.com

*通信作者:范玉海(1983-),男,在读博士生,高级工程师,从事遥感地质、矿产地质及盆地分析研究。E-mail:170269854@qq.com

extends over 30 km in the area, two mineralized bodies (I-1, I-1) were found in the west section, and seven mineralized bodies (II-1~II-7) were found in the east section, Single mineralized bodies are generally 170–2000 m long and 10–32 m thick. whose attitude is consistent with strata. The ore assaying show that the mineralized bodies contain RE–Nb–Fe–Ti and other metallogenic elements. The genetic type of the deposit is offshore marine sedimentary type. The ore source is lateritic weathering crust in ancient continental area. It is presumed that the original rock is rapidly transported by mixing fluid of sediment gravity flow and colloidal solution, and rapidly unloaded and accumulated by event sedimentation in coastal zone. After the metallogenic period, the ore-bearing formation underwent intense structural transformation. The mineralized layer and the ore-bearing formation were deformed synchronously with various ore-controlling structures. The eastern part of the ore-bearing formation is characterized by a compound-superimposed fold structure, while the western part is characterized by a compression fault block-steeply dipping monoclinic structure. This area shows great prospecting potential. Through further mineral geological work, it is expected to achieve important prospecting breakthroughs for Fe, Al and Ti, especially rare and rare earth elements. After the metallogenic period, the ore-bearing structure underwent a strong structural transformation, and formed a fault-fold belt with NWW direction on the whole. The compound-superimposed inverted "S" fold structure developed in the belt constituted the most characteristic ore-controlling structural style in the area. This area shows great prospecting potential. Through further mineral geological work, it is expected to achieve important prospecting breakthroughs for Fe, Al and Ti, especially rare and rare earth elements.

Key words: REE–Nb–Fe–Ti polymetallic mineralization zone; Carboniferous; Pasi Group; shallow-sea carbonate formation; Dahuangshan; Karakorum Mountains; Sedimentary deposit

西昆仑地处欧亚板块与印度板块的结合部位,位于青藏高原西北缘与塔里木盆地西南缘之间,大地构造位置处于古亚洲洋构造域和特提斯构造域的结合部位,是秦祁昆构造带的重要组成部分^[1-3]。古元古界—中生界均有出露,是研究特提斯洋演化的重要地区^[4-8]。区内褶皱强烈,断层发育,经历了多阶段、多类型的构造事件,不同时期的地质事件互相叠加,多期岩浆作用和多期变质作用形成了复杂的岩浆岩、沉积岩、变质岩复合体。地层、构造、变质作用、岩浆活动等多种成矿地质条件优越,已发现的矿床种类繁多,矿种齐全,找矿前景良好^[9-16]。近年来,在诸多矿产地质工作者的不懈努力下,西昆仑地区已获重大找矿突破,并逐步形成一批重要的矿产资源勘查开发基地,如火烧云铅锌矿、塔什库尔干铁矿、玛尔坎苏锰矿、大红柳滩一带锂铍矿等^[17-32]。继前人重要找矿突破和找矿新进展后,笔者在哈巴克达坂以南的阿克塔河南的大黄山一带新发现稀土-铌-铁钛多金属矿化带,成矿元素多,找矿潜力大,找矿前景好,有望在今后的矿产地质工作中实现新的找矿突破。然而,该矿化带位于高寒缺氧、地形切割强烈、地势险峻、人迹罕至的区域,研究程度极低,对其地质特征及矿床成因前人未曾做过研究。

本文旨在对大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地质特征进行总结,探讨该矿化带成矿作用和矿床成因类型,分析成矿期后的构造改造作用与矿床

空间就位,分析其主要控矿因素,优化找矿标志,提出找矿方向,指导该带矿产勘查评价工作。

1 区域地质背景

大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地处西昆仑地区康西瓦结合带以南的喀喇昆仑山北缘,位于哈巴克达坂以南的大黄山—叶尔羌河一带。大地构造位置属泛华夏陆块群-塔什库尔干-甜水海地块,断裂走向以 NWW 向和 NW 向为主^[33-49](图1),以低角度逆冲为主兼剪切走滑性质。以广泛出露石炭系为特征,主要有下石炭统帕斯群和中石炭统恰提尔群,中上泥盆统落石沟组($D_{1-2}I$)零星出露。其中,下石炭统帕斯群出露范围最广,是该矿化带的主要赋矿地层。

下石炭统帕斯群自下而上可划分为3个岩性组,下部为灰岩组(C_1P^a),中部为白云岩组(C_1P^b),上部为碎屑岩组(C_1P^c),各组之间为整合接触,总体出露不全,未见底,出露厚度大于9000 m。稀土-铌-铁钛矿化带即赋存于灰岩组上段,为一套浅海相碳酸盐岩建造,岩性为粉晶灰岩、生物微晶灰岩、泥质灰岩及砂质灰岩,厚度大于2500 m。区内岩浆作用较弱,侵入岩和火山岩均不甚发育。区内地层构造变形十分强烈,但未遭受区域变质作用。

2 矿化带遥感和地质特征

大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带位于哈巴克

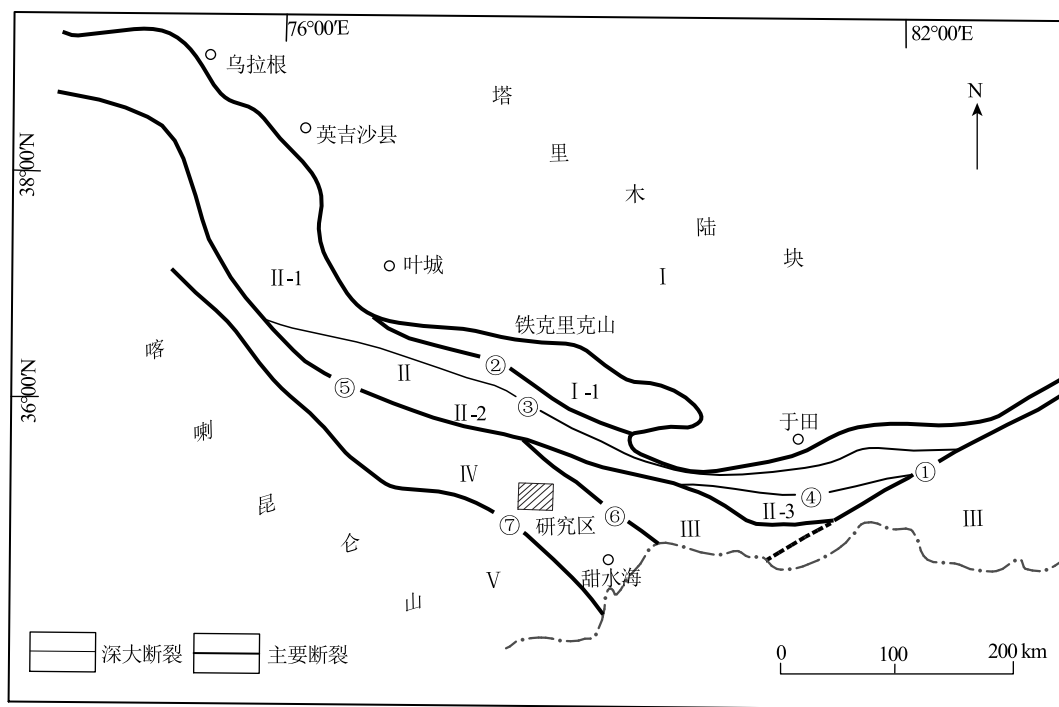


图1 区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map

I—塔里木陆块; I-1—铁克里克断隆带; II—西昆仑造山带; II-1—西昆北岩浆弧; II-2—西昆中微陆块; II-3—西昆南俯冲增生杂岩带; III—巴喀喀褶断带; IV—塔什库尔干-甜水海陆块; V—明铁盖陆块; ①—阿尔金南缘断裂带; ②—柯岗断裂带; ③—库地-其曼于特蛇构造混杂岩带; ④—苏巴什-柳什塔格蛇绿构造混杂岩带; ⑤—康西瓦-木孜塔格构造混杂岩带; ⑥—乌恰-郭扎错构造混杂岩带; ⑦—塔阿西构造混杂岩带

达坂以南的阿克塔河南岸大黄山一带,是通过中国煤炭地质总局航测遥感局 2010—2012 年承担的“西昆仑成矿带矿产资源遥感地质调查”项目发现的。该项目仅圈定了遥感找矿异常,并未开展实地验证工作; 2012—2014 年承担了“西昆仑成矿带黑恰至三十里营房 1:5 万铁铜多金属远景调查”项目,通过实地调查验证,证实遥感找矿异常,发现了阿克塔河南铁-钛矿点,圈定了阿克塔河南铁-钛矿靶区,通过样品测试,确定成矿元素主要为 Fe、V、Ti;在此基础上, 2016—2018 年承担确定“新疆皮山县哈巴坎达坂一带 1:5 万 J43E024023、J43E024024、I43E001023、I43E001024 四幅区域地质调查”项目,通过系统的地表调查和详细的重点地段观测、探槽工程揭露和样品采集与测试工作,扩大了阿克塔河南铁-钛矿点,并圈定了大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带。

2.1 含矿建造高分遥感地质特征

帕斯群遥感表征明显,有沉积岩特有的稳定的层状结构、沉积韵律及不同岩性特征构成的宽窄不同的条带状影纹,各岩性层边界清晰,连续稳定延

伸。在 IKONOS(波段组合 B4(R)B2(G)B1(B)) 高分遥感图像中,帕斯群呈灰白色、褐灰色、浅红褐色、灰蓝色等色调(图 2),矿化带呈深棕红、棕褐色调,条带状影纹结构十分明显,与围岩浅褐色调,细腻均一的影纹结构差异明显,易于直接判译和圈定。不同色调的条带同步弯曲延伸,总体表现出复杂而有序的影像图案。地层重复对称出现,转折端连续性好,褶皱构造形态及其产状要素容易判读(图 3)。

2.2 带内已发现矿化体地质特征

2.2.1 矿化体地质特征

大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带处于帕斯群 a 组(灰岩组)上段(含矿泥质灰岩段)上部,向上为帕斯群 b 组(白云岩组),向下过渡为帕斯群 a 组(灰岩组)下段(生物碎屑灰岩段),层位十分稳定,矿化带走向延伸稳定,区内延伸长度约为 30 km,带内发育 1~2 层矿(化)体。矿(化)体产状与地层产状一致,层控特征明显。通过地表追索、探槽揭露及系统采样测试,在地表共圈定了 9 个矿(化)体,

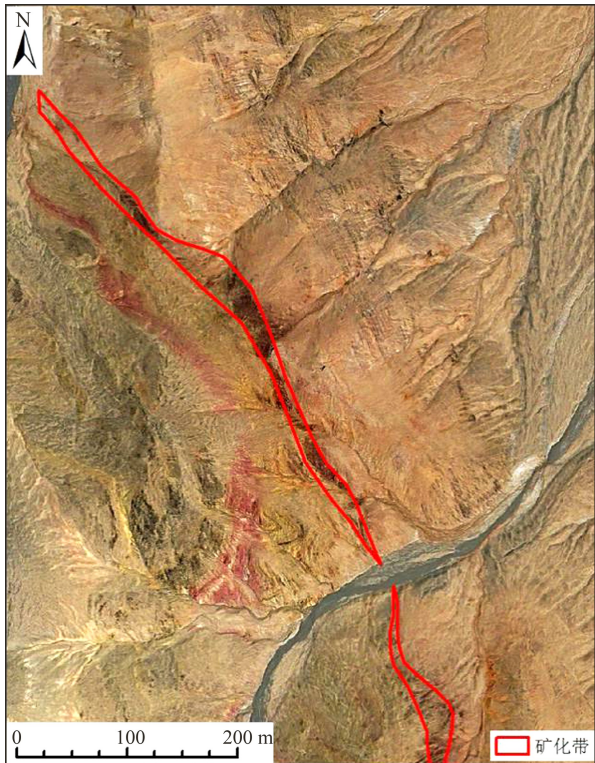


图 2 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带
IKONOS 高分遥感影像特征

Fig. 2 IKONOS high-resolution remote sensing image of the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

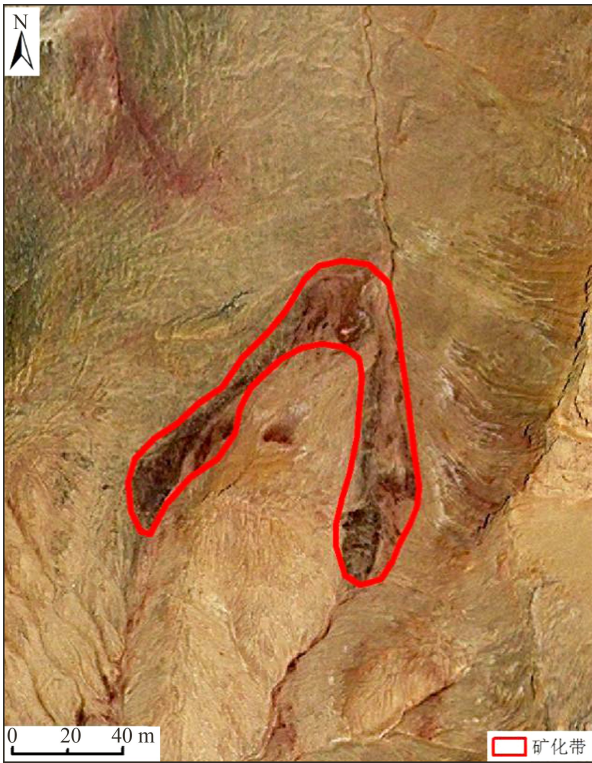


图 3 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带局部
变形 IKONOS 高分影像特征

Fig. 3 IKONOS high-resolution image of local deformation in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

西段 2 条(Ⅰ-1、Ⅰ-2),东段 7 条(Ⅱ-1、Ⅱ-2)(表 1;图 4-a),矿化带东段含矿性明显好于西段;西段矿(化)体地表出露厚度一般为 10~12 m,单矿(化)体走向延伸长度一般为 800~2000 m,累计长度 2800 m,东段矿(化)体地表出露厚度一般为 18~32 m,单矿(化)体走向延伸长度一般为 170~780 m,累计长度约 4220 m(表 1)。矿(化)体与上、下盘围岩界

线清晰,呈突变关系,底板岩性多为灰色厚层状微-细-中晶生物碎屑(礁)灰岩,顶板多为杂色中-薄层状鲕状、竹叶状微-细晶灰岩。矿(化)体尖灭处,往往底凹顶平,并迅速过渡碳酸盐岩围岩(图 4-b)。矿(化)体出露条件良好,呈黑褐色-深棕褐色-深棕红色带状展布,因矿石性脆易碎裂,差异风化作用往往形成垭口等负地形(图 5-a、b)。

表 1 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内矿(化)体基本特征
Table 1 Ore bodies in Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

序号	矿体编号	形态	产状	长度 /m	平均厚 度/m	Nb ₂ O ₅ /10 ⁻⁶	Ta ₂ O ₅ /10 ⁻⁶	REE ₂ O ₃ /10 ⁻⁶	Ti/%	TFe/%	控制手段
1	Ⅰ-1	层状	242°∠44°	800	12				4.83	33.30	地表追索+探槽
2	Ⅰ-2	层状	232°∠42°	2000	10				4.90	22.97	
3	Ⅱ-1	层状	222°∠62°	658	22				4.80	19.28	
4	Ⅱ-2	层状	245°∠81°	743	15.9	476	29	1731	4.99	20.00	
5	Ⅱ-3	层状	215°∠40°	580	32.3	276	19	918	3.35	21.45	
6	Ⅱ-4	层状	260°∠56°	660	26.1	739	42	669	4.39	19.28	
7	Ⅱ-5	层状	335°∠30°	631	22	403	23.62	544	4.01	17.88	
8	Ⅱ-6	层状	210°∠55°	170	18				5.89	23.40	
9	Ⅱ-7	层状	265°∠78°	780	20				5.36	20.45	

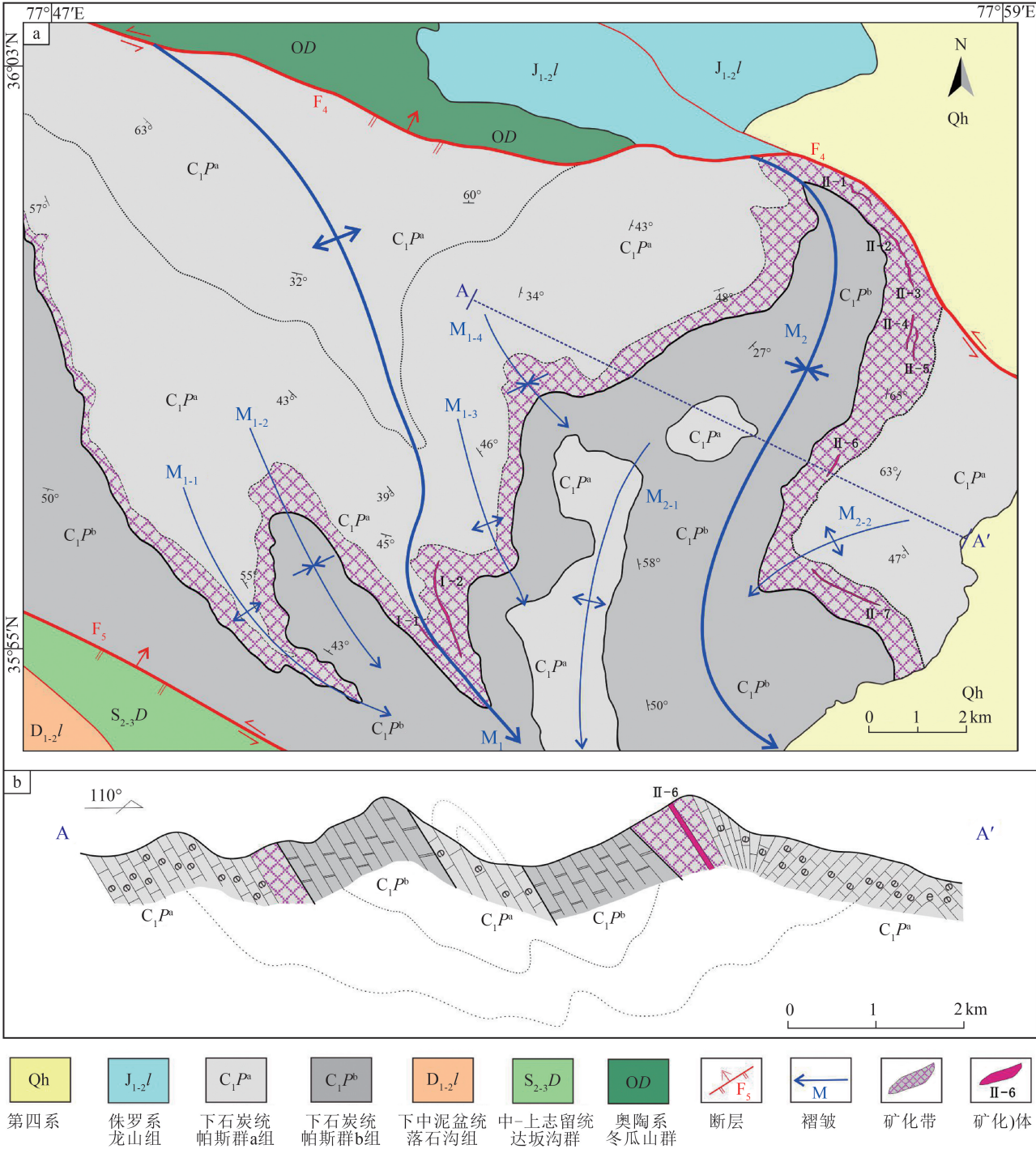


图4 研究区地质矿产图

Fig. 4 Geological map showing distribution of mineral resources in the study area

2.2.2 矿石特征

矿石颜色整体呈棕红色,风化色呈铁灰色-暗棕色(图5-a)。矿石矿物以赤铁矿、褐铁矿、水铝石为主,少量金红石、钽铌铁矿,微量钛铁矿和钛磁铁矿,未见金属硫化物;脉石矿物主要为粘土类矿物,

微量榍石、锆石。矿石主体结构为碎屑结构(包括砾状结构、砂状结构、粉砂状结构、泥状结构)及显微花岗变晶结构。其中,水铝石多呈隐晶-微晶状半自形-他形粒状结构,赤铁矿呈隐晶-微晶状,褐铁矿隐晶状,粘土质呈隐晶-细晶鳞片状。矿石构

造以致密块状构造为主, 常见铁铝质环状构造、胶状构造、鲕状构造、豆状构造等(图 5-c)。内部缺乏各类沉积层理构造, 偶见沉积粒序层理(图 5-d)。

镜下观察, 矿石呈块状构造, 豆粒、鲕粒结构。矿石主要由鲕粒、豆粒、粘土质杂基填隙物组成, 鲕粒主要为同心鲕, 圆形、椭圆形, 大小一般为 0.2~0.5 mm, 部分 0.5~1 mm, 少部分 1~2 mm, 杂乱分布, 为矿石的主体部分。豆粒主要为同心豆, 呈圆形、椭圆形, 大小一般为 2~5 mm, 呈星散状分布。成分均为水铝石、铁质。鲕粒中水铝石含量为 50%~55%, 铁质为 5%; 豆粒中水铝石为 10%~15%, 铁质为 5%。粘土质隐晶状, 常与水铝石、铁质混杂在一起分布, 少部分呈填隙状分布。填隙物为水铝石、铁质胶结物。填隙物中水铝石占 20%~25%, 铁质胶结物占 5%。水铝石多呈隐晶-微晶状半自形-他形粒状, 大小一般为 0.01~0.03 mm, 部分 0.03~0.05 mm, 少量 0.05~0.1 mm, 呈填隙状分布; 铁质(赤铁矿、褐铁矿)胶结物呈隐晶-微晶状, 填隙状分布(图 6)。

矿石含 Fe、Al、Ti、LREE、Nb、Ta 等多种成矿元素。根据地表采样和实验室测试结果, 各矿体的 TFe 品位为 13.9%~35.9%, 平均品位为 24.9%;

Al_2O_3 品位为 24.61%~48.2%, 平均品位为 36.41%; TiO_2 品位为 4.96%~8.50%, 平均品位为 6.73%; LREE 品位为 612×10^{-6} ~ 1896×10^{-6} , 平均品位为 1254×10^{-6} ; Nb 品位为 157×10^{-6} ~ 511×10^{-6} , 平均品位为 334×10^{-6} ; 各矿体的 Ta 品位为 34.7×10^{-6} ~ 13.89×10^{-6} , 平均品位为 24.30×10^{-6} 。

Ti 元素物相分析结果表明, Ti 元素的主要赋存形式是可利用的钛铁矿, 其次是可利用的金红石和钛磁铁矿, 微量榍石和其他硅酸盐钛(表 2; 图 6), 说明 Ti 元素可利用的潜在价值较高。

2.2.3 控矿构造特征和形成机制

(1) 含矿建造构造变形特征

含矿建造(帕斯群) 沉积期后经历了强烈的构造改造作用, 构造变形强烈。平面上, 形成了复杂而有序的“绸舞”构造行迹。总体的构造方位为 NW—SE 向, 与区域构造方位一致。构造型式以复式褶皱构造为特征, 背斜、向斜相间分布, 含矿地层倾角普遍较陡, 总体南倾北翘, 局部地段地层产状倒转。含矿建造夹持于阿克塔河南逆断裂(F4)和天神达坂-天文台逆断裂(F5)之间, 控制了含矿建造的空间分布格局, 形成含矿建造的自然边界, 其内部断层较少, 地层连续性好。依据含矿建

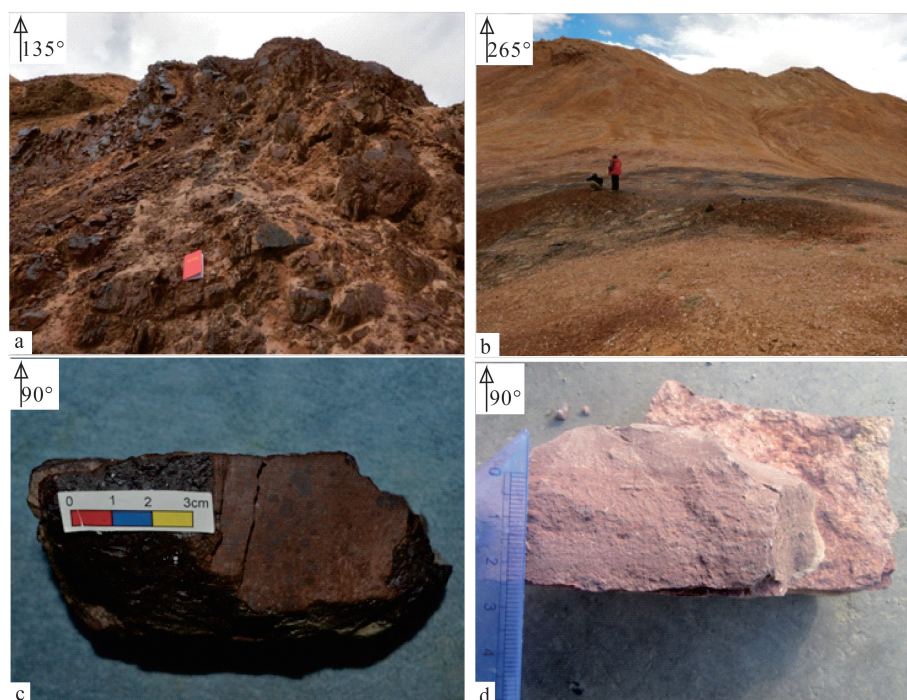


图 5 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内矿石野外露头照片

Fig. 5 Photographs of ores in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

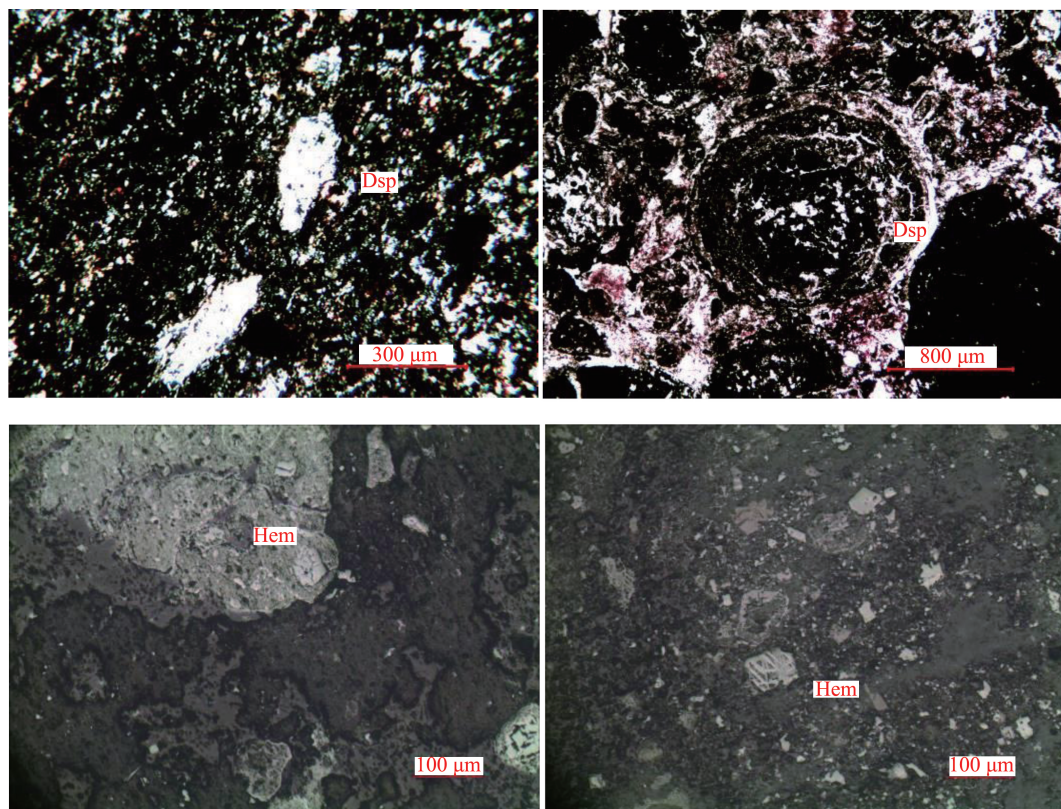


图6 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内矿石镜下光薄片特征

Fig. 6 Microphotos of ores in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

Dsp—硬水铝石; Hem—赤铁矿

造的构造变形特征和边界断裂性质,结合区域构造特征,推测含矿建造是挤压环境下形成的一条 NWW 向延伸的断褶带(图 4-a)。

(2) 控矿构造样式

矿化带产出帕斯群 a 组,矿(化)体顺层产出,与地层同步变形,产状严格受地层产状控制,矿化带作为含矿建造的一部分经历了相同的构造运动,共同卷入了统一的构造变形过程。

复式-叠加反“S”型褶皱构造构成了研究区最特征的控矿构造样式(图 2-a)。总体由一复式背斜(M_1)和一复式向斜(M_2)共同构成。复式背斜(M_1)两翼变形程度不对称,西翼变形程度最高,被次级的背斜(M_{1-1})和向斜(M_{1-2})复杂化,东翼(即 M_2 西翼)变形程度最低,发育次一级的背斜(M_{1-3})和向斜(M_{1-4});复式向斜(M_2)变形程度较复式背斜(M_1)略低,在偏西翼近核部位置发育一条与 M_2 褶轴近平行的次级背斜(M_{2-1}),东翼地层产状陡立,局部倒转,同时翼部发育小型次级背斜(M_{2-2})。 M_1 、 M_2 枢纽倾伏角为 $25^\circ \sim 30^\circ$,按照产状分类方

案, M_1 属直立倾伏褶皱, M_2 属斜歪倾伏褶皱。 M_1 及其从属次级褶皱轴迹呈 NW 向,与北界断裂呈 40° 斜交关系,与南界断裂呈 25° 斜交关系,向扬起端方向,轴迹由 NW 向 NWW 弧形偏转,与北界断裂呈近相切关系,向倾伏端方向,轴迹由 NW 向 SE 弧形偏转,与南界断裂呈近相切关系。整个轴迹呈反“S”型; M_2 轴迹总体走向为 NE 向,北部扬起端靠近北界断裂轴迹由 NE 向迅速向 NW 向偏转,与断裂呈近相切关系。向倾伏方向靠近南界断裂,轴迹由 NE 向 SE 偏转,形成反“S”型轴迹。

(3) 构造应力场与控矿构造形成机制

① 构造应力场分析与构造成因

含矿建造夹持于阿克塔河南逆断裂(F4)和天神达坂-天文台逆断裂(F5)之间,总体方位为 NWW 向。含矿建造内部构造行迹复杂,以南倾北扬的复式褶皱为特征,显然是构造联合和多期构造复合叠加作用,同时反映了构造应力场的多期性和复杂性(图 4)。根据 M_1 、 M_2 两翼对称性, M_1 、 M_2 枢纽总体方位与边界断裂的交切关系及褶轴形迹

表 2 大黄山稀土-铌-铁钛多金属矿化带内钛元素物相分析结果
Table 2 Phase analysis of titanium of ores from the Dahuangshan
REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

物相 种类	钛铁矿	金红石	钛磁铁	榍石和硅	总量
	中钛	中钛	矿中钛	酸盐中钛	
	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂
	/%	/%	/%	/%	/%
含量	4.78	1.89	1.20	<0.01	7.87
百分比/%	60.74	24.01	15.25	0	100

偏转扭动等因素判断,在 NEE 向的斜向挤压背景下,南、北边界断裂派生出左旋水平力偶,边界断裂由早期压性转变为左旋压-扭性质,在此应力作用下,其内部的含矿建造整体发生逆时针旋转,使褶皱组合呈逆时针旋转。 M_1 与 M_2 倾伏端褶轴向 SE 偏转,与 F5 呈相切关系, M_1 与 M_2 扬起端褶轴向 NW 偏转,与 F4 呈近相切关系,是边界断裂左行走滑作用持续拖曳的结果。

综上,夹持于阿克塔河南逆断裂(F4)和天神达坂-天文台逆断裂(F5)之间的含矿建造构造样式是在近 SN 向总体挤压背景下,受到左行剪切-走滑作用而形成。

②控矿构造形成机制与构造变形演化序列

帕斯群强烈的构造变形和复杂的构造行迹是青藏高原长期以来由北向南“手风琴式”的依次伸展裂解-拼合挤压-碰撞调整(逆冲推覆-剪切走滑)的结果,主要构造动力来源于南部。根据研究区石炭纪之后各地层变形程度差异和地层发育情况,并结合区域构造认识,判断帕斯群主构造变形期为晚三叠世的印支运动,此时研究区特提斯洋完全闭合,结束了演化历程,进入板内逆冲推覆-剪切走滑-消减破坏演化阶段。在随后的晚侏罗世—早白垩世帕斯群构造变形强度得到进一步增强。

根据帕斯群构造变形特征,NE 向的主压应力是研究区主导的构造动力,并伴随帕斯群构造变形的始终,在此构造应力作用下,形成 NWW 向的边界断裂和总体呈 NWW 向延伸的褶断带。在 NE 向构造应力的持续作用下,NE 向主压应力和 NWW 向延伸的边界断裂间存在交角,形成斜向挤压,派生出水平剪切走滑分量。研究区复式褶皱就是挤压背景下左旋水平力偶作用的结果, M_1 、 M_2 主褶皱倾伏、扬起端轴迹靠近边界断裂快速偏转,与

边界断裂呈(近)相切关系,是边界断裂左行走滑作用最直接、最显著的证据。 M_1 、 M_2 主褶皱最先形成(第一期),随着左行走滑作用的进一步加强, M_1 次级从属褶皱(M_{1-1} 、 M_{1-2} 、 M_{1-3} 、 M_{1-4})和 M_2 次级从属褶皱(M_{2-1} 、 M_{2-2})逐步形成(第二期)。

2.2.4 找矿标志

矿化带位于帕斯群 a 组偏顶部位置,含矿层位稳定,层控特征明显,但沿走向厚度变化较大。通过高分辨遥感解译、地表追索和工程控制,总结了以下找矿标志。

(1)遥感解译标志:矿化带遥感影像特征显著,高分影像上呈深棕红色、棕褐色色调,影纹粗糙,与灰岩围岩浅褐色色调和细腻均一的影纹差异明显。

(2)地球化学标志:矿石富集 Fe、Ti、Al、Nb、Ta 及 LREE 等多种成矿元素,1:5 万水系沉积物测量圈定出多处 Cd、Cr、Pb、Zn 为主元素的地球化学异常。

(3)地球物理标志:1:1 万磁剖面显示矿化带磁异常特征明显,矿化带与围岩磁性差异明显。 ΔT 剖面图上矿化带从每条磁测剖面异常的突变带穿过,沿矿化体在 ΔT 平面图上形成一条串珠状磁异常畸变带。

(4)地质标志:矿化带位于帕斯群 a 组偏顶部位置,地表呈特征的黑褐色-深棕褐-深棕红色色调,易与围岩区分,找矿特征明显;矿石致密坚硬,含矿岩性以深棕色-棕红色含砾粉砂质泥岩为主,与灰白色结晶灰岩、白云岩、大理岩等围岩界线截然;矿石性脆易碎,在山脊上常常形成鞍状负地形。

3 样品及测试方法

本次研究选取了大黄山稀土-铌-铁多金属矿化带中的矿石进行了主量及稀土元素的测试,测试样品采自大黄山东侧矿体控制的探槽中,取样采用刻槽法,采样规格 10 cm×10 cm×150 cm,样品重量满足测试要求。主量和微量分析测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,主量元素分析采用 XRF 方法在 RIX-2100 仪器上分析,分析精度一般优于 2%。稀土元素测定在美国 PerkinElmer 公司的四极杆 Elan 6100DCRIPC-MS 上进行,元素分析精度优于 2%~5%。详细的分析方法见参考文献[50]。

4 成矿作用与矿床成因

4.1 成矿环境

4.1.1 含矿建造岩性岩相特征与沉积环境

帕斯群灰岩组(C_1P^a)主要岩性为灰色含生物碎屑细晶灰岩、青灰色含生物碎屑灰岩、紫红色细晶灰岩、灰白色粉晶灰岩、灰白色细晶灰岩、灰白色砂屑不等晶灰岩、青灰色微晶灰岩、浅灰黄色微晶灰岩夹深灰色微晶灰岩、灰黄色弱白云石化泥晶灰岩,夹少量粉砂质泥岩,在生物灰岩中含大量腕足、珊瑚、头足、瓣鳃、腹足等化石。灰岩组岩石成分和岩石颜色指示了陆源碎屑物质由下至上逐渐增多,气候趋于炎热,形成了一套向上变浅的沉积序列,总体为浅海相沉积环境。帕斯群白云岩组(C_1P^b)主要岩性为青灰色含砂屑粉泥晶白云岩、灰白色含生屑泥晶白云岩、灰白色鸟眼状含生屑泥晶白云岩、灰黑色粉晶白云岩、杂色鸟眼状含凝块泥晶白云岩、浅灰黑色生屑泥晶白云岩、浅灰黑色角砾碎斑状泥晶白云岩、灰黄色变质粉泥晶灰岩,地层中见少量生物化石。总体沉积环境为半封闭海湾稳定沉积环境,局部发生有海水加深现象,形成少量薄层状灰岩(图7)。

综上所述,帕斯群含矿建造形成于滨浅海沉积环境。大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带即位于帕斯群灰岩组(C_1P^a)偏顶部位置。该层段陆源碎屑沉积作用逐渐增强,内生碳酸盐岩沉积作用逐渐减弱,暗示了矿源来自长期遭受风化的古陆源,而非沉积盆地内部。

4.1.2 成矿环境的地球化学制约

MnO/TiO_2 值可以较好地反映古地理沉积环境^[48]。岩石在风化作用过程中,低价锰(Mn^{2+})较活泼,易遭受淋失形成稳定化合物,随流体一起长距离搬运至深海,而 Ti 属惰性元素,一般不形成化合物转入溶液,而是被残留在原地富集起来,在流水搬运过程中,就近搬运至近陆滨浅海环境。 MnO/TiO_2 值为 0.5~3.5 时,反映远离大陆的远洋沉积环境; MnO/TiO_2 值小于 0.5 时,反映为近陆的滨浅海环境。研究区矿石 MnO/TiO_2 值为 0~0.03,远小于 0.5,说明沉积环境为近陆的滨浅海环境。研究区样品测试结果显示,Na 和 Mg 含量均小于 1%,说明沉积环境为浅水环境,受淡水影响较大,是陆源含矿流体事件性注入的结果。通常陆源成分中 TiO_2 和 Al_2O_3 的含量较高,如果 $Fe/Ti \leq 20$,

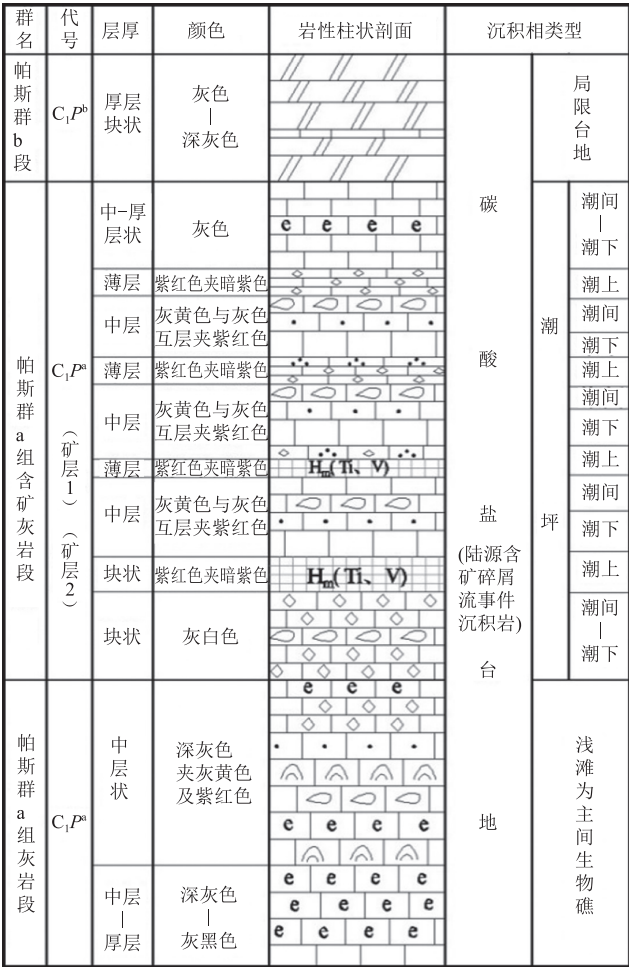


图7 帕斯群 a 组含矿建造岩相与沉积序列柱状图
Fig. 7 Lithofacies and sedimentary columnar of ore-bearing formation in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

且 $Al/(Al+Fe+Mn) \geq 0.35$,说明沉积物来自陆源组分多,受盆地内部海底喷流作用影响小^[49]。样品测试结果显示, Fe/Ti 值为 0.92~7.07,均小于 20, $Al/(Al+Fe+Mn)$ 值为 0.38~0.85,均大于 0.35,说明成矿物质主要来源于古陆区(表3)。

表3 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内
矿石地球化学测试结果

Table 3 Assaying results of ores in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone				
样品	MnO/TiO ₂	Na/Mg	Fe/Ti	Al/(Al+Fe+Mn)
D6-1	0.03	0.69	0.92	0.85
D2-1	0.01	0.92	4.76	0.47
D8-1	0.001	0.13	2.86	0.48
D9-1	0.002	6.98	1.76	0.77
D10-1	0.01	2.78	7.07	0.38
D11-1	0.01	2.69	4.57	0.43

一般来讲,海水的稀土元素配分模式可作为正常沉积的碳酸盐岩建造的配分模式^[50],正常海水沉积相的稀土元素配分曲线特征为负 Ce 异常和弱负 Eu 异常,研究区矿石的稀土元素北美页岩标准化配分曲线显示不明显的 Ce 异常和正 Eu 异常,说明成矿环境虽为滨浅海碳酸盐岩沉积建造环境,但溶矿介质并非正常海水(表 4;图 8)。

4.2 成矿作用

4.2.1 矿化体与围岩关系

矿体产于碳酸盐岩沉积建造偏顶部位置,严格受限于特定层位,顺层产出,呈层状或似层状,与围岩呈突变接触关系,矿体与围岩产状完全一致,构成了沉积建造的有机组成部分。

4.2.2 矿石结构与成矿作用

矿石呈致密块状构造,碎屑结构(砾状结构),矿石碎屑大小混杂,分异作用弱,分选性很差,矿砾为次圆状-圆状,一般为 2~5 mm,基底式胶结。矿

砾在铁铝质粘土质砂泥状基质中呈漂浮状,说明含矿流体密度和粘度大,属于沉积物重力流。按照颗粒支撑机理,指示快速搬运和快速堆积沉积作用,是陆源含矿物质事件沉积作用的结果。矿化层中偶见粒序层理(图 5-d),指示了水动力的强弱变化。

矿石中也见鲕状、豆状构造(通常被认为是胶体沉积的重要证据),鲕粒大小悬殊,为 0.2~2 mm,具明显的多圈层构造,圆形或椭圆形,多为同心鲕,核心为铁质或铝质细砂粒;豆粒大小差异明显,一般为 2~5 mm,具明显的同心圈层构造,圆形或椭圆形,中心为铁铝质砂粒。鲕粒、豆粒粒径大小不一,形态不一,可能与砂粒核心大小和形状有关。鲕粒、豆粒的发育,说明部分成矿物质呈胶体微粒的细分散系(1~100 nm),形成胶体溶液。可以看出,含矿溶液中矿质碎屑大小混杂,分选性差,属粗分散系和细分散系共存的混合溶液,以前者为主。

表 4 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内矿石稀土元素测试结果

Table 4 REE assaying results of ores from the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone
10⁻⁶

样品号	TC3-2XT WL6-1	TC2-3XT WL2-1	TC2-1XT WL8-1	TC2-1XT WL9-1	TC2-1XT WL10-1	TC3-1XT WL9-1
La	192.00	196.00	226.00	412.00	130.00	136.00
Ce	318.00	366.00	483.00	802.00	313.00	304.00
Pr	35.80	54.40	72.80	101.00	30.70	40.00
Nd	112.00	219.00	290.00	474.00	112.00	158.00
Sm	17.00	40.40	41.80	64.90	19.80	28.90
Eu	4.62	11.60	10.20	15.10	6.63	8.42
Gd	12.80	34.80	31.60	48.00	18.60	25.30
Tb	1.47	4.93	3.60	4.89	2.36	3.55
Dy	5.75	20.60	12.70	15.10	10.00	15.70
Ho	0.91	2.93	1.88	2.11	1.48	2.52
Er	2.26	6.28	4.57	5.75	3.69	6.00
Tm	0.28	0.70	0.55	0.62	0.48	0.79
Yb	1.60	4.01	3.26	3.87	3.09	4.68
Lu	0.22	0.47	0.42	0.51	0.38	0.56
Y	21.50	61.30	38.90	45.40	37.00	61.20
LREE	679.42	887.40	1123.80	1869.00	612.13	675.32
HREE	25.29	74.72	58.58	80.85	40.08	59.10
LREE/HREE	26.87	11.88	19.18	23.12	15.27	11.43
La _N /Yb _N	11.31	4.61	6.54	10.04	3.97	2.74

4.2.3 矿源

成矿元素有 Fe、Al、Ti、LREE、Nb、Ta 等,是风化壳常见的元素。矿物组成主要有水铝石、赤(褐)铁矿、粘土(高岭石、云母)等风化壳常见矿物,说明矿化带中成矿物质可能来源于古陆源长期风化作用形成的古风化壳。根据矿石物质组成特征,矿石中含水铝石、铁氧化物,富铝富铁贫硅特征判断,矿源区风化壳属风化作用强烈的红土型风化壳。

4.3 矿床成因

矿(化)体呈层状或似层状夹持于帕斯群灰岩组(C_1P)偏顶部位置,矿(化)体产出部位严格受层位限制,与上、下围岩产状一致,呈整合接触关系,显然是在含矿建造自身形成过程中同期形成的,归属于同生矿床系列。矿(化)体围岩乃至整个灰岩组内未发现碧玉岩、铁白云岩、层状重晶石等喷流岩,矿石组构也未见条带状、纹层状喷流构造,因此,判断矿床成因类型非海相沉积喷流型。

矿(化)体与底板呈突变关系,不发育由顶到底风化程度逐渐减弱,最后过渡到未风化母岩的典型风化壳剖面,矿石构造以致密块状构造为主,剖面上矿石物质成分也没有明显变化。再之,长期的沉积间断和湿热的气候环境是红土型风化作用的必要条件,而矿(化)体与顶底板呈连续沉积整合接触关系,并未有明显的沉积间断,不具备(古)风化矿床形成的必要条件。虽然矿石矿物成分和成矿元素与红土型风化壳成矿物质基本相同,但矿石的组构特征指示成矿物质经过了明显的流水搬运,也仅能说明成矿物质可能来源于古陆区红土型风化壳,因此该矿床也非(古)风化矿床成因类型。

前述的矿(化)体地质特征、矿石组构特征、矿石物质组成、矿石地球化学特征均证明,该矿床属近陆滨海相沉积矿床成因类型。

(1)矿石具有的沉积碎屑结构,表明成矿物质经过了一定距离的搬运和再沉积富集作用,是沉积作用过程中的必要阶段;铁铝质矿砾大小混杂,分选性较差,呈漂浮状悬浮于基质中(从岩石学角度可定名为砾质泥岩),杂基支撑结构(基底式胶结类型)代表着高密度流体搬运,快速堆积导致分选性

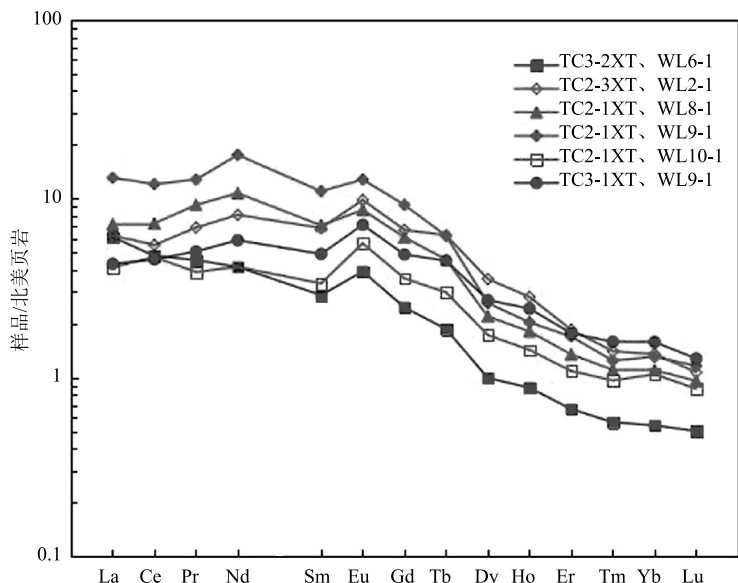


图8 大黄山稀土-铌-铁-钛多金属矿化带内矿石稀土元素北美页岩标准化分布(标准化数据引自参考文献[50])

Fig. 8 REE distribution in the Dahuangshan REE-Nb-Fe-Ti polymetallic mineralization zone

较差的沉积特征;矿石呈致密块状,内部缺乏流水成因的构造,同样说明是水流速度急剧减小,大量沉积物快速卸载的结果;局部地段矿石偶见粒序层理(粗尾递变层理),同样指示重力流(浊流)成因;矿(化)体与顶底板界面截然,是沉积物重力流中的碎屑流的典型特征。

(2)矿石具有鲕状构造、豆状构造,说明矿石中的细粒物质组分($1\sim 100\ \mu\text{m}$)以胶体溶液方式搬运,并在高能浅水沉积环境下不断生长而成,进一步说明了含矿流体是以沉积物重力流和胶体溶液混合形式搬运的。

(3)矿(化)体产出于碳酸盐岩沉积建造中,指示了成矿物质就位于侵蚀基准面以下低洼稳定的古地理环境,为陆源成矿物质从搬运状态转变为沉积就位状态提供了容矿空间。前述的岩性岩相分析结果和岩石(矿石)地球化学分析结果均显示,成矿环境为大陆斜坡近陆滨-浅海台地相沉积环境。

(4)矿石矿物成分和成矿元素表明,成矿物质来自古陆源区,矿石物质成分和矿物组成,具有明显的古陆源富铁红土型风化壳特征^[51-55],这为陆源碎屑沉积作用发生提供了必要的物源条件,也与帕斯群灰岩建造沉积序列向上,灰岩单层厚度减

薄,灰岩中陆源泥(砂)质成分逐渐增多的情况是耦合的。矿石物质组成主要由粘土矿物、氧化铝、富钛氧化铁等组成,说明古陆源风化作用已进入最后阶段,矿石中未见其他原岩岩屑和矿物碎屑(微量锆石、钛铁矿除外),表明原岩粒度细,风化作用速度快,风化作用彻底。

5 结 论

(1)太白山稀土-铌-铁钛多金属矿化带地表延伸距离长,带内已发现多个矿(化)体,单矿体地表走向延伸长,厚度大,矿石中含Fe、Al、Ti、REE、Nb、Ta等多种成矿元素;受成矿期后强烈的构造改造作用,矿(化)体与含矿建造同步变形,构成特征的复式-叠加反“S”型褶皱控矿构造样式。

(2)矿床成因类型推断为近陆滨海相沉积型。一方面暗示研究区找矿潜力大,找矿前景好;一方面明确了今后的顺层找矿思路,矿化带位于帕斯群灰岩组(C_1p^a)偏顶部位置,层位稳定,在研究区通过进一步的探矿工程控制,有望快速实现找矿重大突破。

(3)帕斯群含矿建造及矿化带向西延伸出研究区外,按照顺层找矿思路,在详细系统调查研究帕斯群含矿建造空间分布规律和构造组合特征的基础上,继续向研究区以西开展找矿工作,是今后的重要找矿方向,而地表呈深色调的铁氧化带是最直观的找矿地质标志。

致谢:成文过程中得到项目组合体成员的帮助和支持,中国地质调查局西安地质调查中心杨合群教授对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 程裕淇.中国区域地质概论[M].北京:地质出版社,1994:1-200.
- [2] 潘裕生.昆仑山区构造区划初探[J].自然资源学报,1989,4(3):196-203.
- [3] 潘裕生.青藏高原第五缝合带的发现与论证[J].地球物理学报,1994,37(2):184-192.
- [4] Wang X, Zhang X, Gao J, et al. A slab break-off model for the submarine volcanic-hosted iron mineralization in the Chinese Western Tianshan: Insights from Paleozoic subduction-related to post-collisional magmatism [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 92: 144-160.
- [5] Li W, Dong Y, Guo A, et al. Chronology and tectonic significance of Cenozoic faults in the Liupanshan Arcuate Tectonic Belt at the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 73: 103-113.
- [6] Wang C, Liu A, Wang H, et al. Recognition and tectonic implications of an extensive Neoproterozoic volcano-sedimentary rift basin along the southwestern margin of the Tarim Craton, northwestern China [J]. Precambrian Research, 2013, 257: 65-82.
- [7] Liu L, Ya B, Lei L, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China [J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58: 1513-1522.
- [8] Fan Y, Wan Y, Wang H, et al. Application of airborne hyperspectral remote sensing image data in the gold-silver-lead-zinc ore district of Huaniushan, Gansu, China [J]. Eologia Croatica, 2021, 74(1): 73-84.
- [9] 巫建华, 刘帅. 大地构造学概论与中国大地构造学纲要 [M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [10] 杨克明. 论西昆仑大陆边缘构造演化及塔里木西南盆地类型 [J]. 地质论评, 1994, 1: 9-18.
- [11] 潘裕生, 周伟明, 许荣华, 等. 昆仑山早古生代地质特征与演化 [J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 302-307.
- [12] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升 [J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 153-163.
- [13] 姜春发, 朱松年. 构造迁移论概述 [J]. 中国地质科学院院报, 1992, 25: 1-14.
- [14] 姜春发. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展(代序) [J]. 地质通报, 2002, 21(Z2): 453-455.
- [15] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑合构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 161-168.
- [16] 李涛, 王宗秀. 塔里木地块北部横向构造及断条模式 [J]. 中国地质, 2006, 33(1): 14-27.
- [17] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设 [J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 321-326.
- [18] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳 [J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225-239.
- [19] 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等. 秦祁昆造山带重要成矿事件及其构造演化响应 [C] // 陈毓川, 薛春纪, 张长青. 主攻深部挺进西部放眼世界——第九届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 15-16.
- [20] 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑西段晚古生代—中生代花岗岩岩浆作用及构造演化过程 [J]. 中国地质, 2015, 42(3): 533-552.
- [21] 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应 [J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1135-1149.
- [22] 孙海田, 李纯杰, 李锦荣, 等. 新疆西昆仑昆盖山地区铜矿资源找矿地质条件 [J]. 中国地质, 1997, 24(11): 29-30.
- [23] 王书来, 汪东波, 祝新友. 新疆西昆仑(铜)矿找矿前景分析 [J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(3): 224-229.
- [24] 西北地质矿产研究所. 西北地区矿产资源找矿潜力 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [25] 杨合群, 姜寒冰, 谭文娟, 等. 西北地区重要矿产概论 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017: 19.
- [26] 李先军, 赵祖应. 西昆仑北段矿产分布特征及找矿方向浅析 [J]. 地质与勘探, 2009, 45(2): 1-7.
- [27] 李宝强, 杨万志, 赵树铭, 等. 西昆仑成矿带成矿特征及勘查远景 [J]. 西北地质, 2006, 39(2): 128-142.

- [28] 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 365-380.
- [29] Qin Y, Feng Q, Chen G, et al. Devonian post-orogenic extension-related volcano-sedimentary rocks in the northern margin of the Tibetan Plateau, NW China: Implications for the Paleozoic tectonic transition in the North Qaidam Orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 156: 145-166.
- [30] Hou Q, Mou C, Wang Q, et al. Provenance and tectonic setting of the Early and Middle Devonian Xueshan Formation, the North Qilian Belt, China[J]. Geological Journal, 2018, 53: 1404-1422.
- [31] Fan Y, Wang H. Application of remote sensing to identify copper-lead-zinc deposits in the Heiqia Area of the West Kunlun Mountains, China[J]. Scientific Reports, 2020, (10): 12309.
- [32] Fan Y, Wang H, Yang X, et al. Application of high resolution remote sensing technology for the iron ore deposits of the West Kunlun mountains in China[J]. Eologia Croatica, 2021, 74(1): 57-72.
- [33] 董永观, 郭坤一, 肖惠良, 等. 西昆仑地区成矿远景[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 173-178.
- [34] 褚少雄. 西昆仑及其邻区成矿地质背景及成矿规律探讨[D]. 中国地质大学硕士学位论文, 2008.
- [35] 贾群子. 新疆西昆仑块状硫化物铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [36] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123-144.
- [37] 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 41-50.
- [38] 赵佳楠, 刘正军. 新疆西昆仑造山带北缘中元古代帕什托克闪长岩侵入序列及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 92-107.
- [39] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 等. 新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2013, 38(6): 1169-1182.
- [40] 贡杰, 高晓峰, 校培喜, 等. 西昆仑下石炭统乌鲁阿特组火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 587-600.
- [41] 新疆自治区地质矿产局. 新疆自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-841.
- [42] 王永, 李德贵, 肖序常, 等. 西昆仑山前晚新生代构造活动与青藏高原西北缘的隆升[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 41-47.
- [43] 于晓飞. 西昆仑造山带区域成矿规律研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2008.
- [44] 李荣社, 计文化, 杨永成, 等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-5.
- [45] 伍耀中, 乔耿彪, 陈登辉, 等. 昆仑-阿尔金成矿带金属矿产成矿条件与成矿远景预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 14.
- [46] 计文化, 陈守建, 李荣社, 等. 青藏高原及邻区古生代构造-岩相古地理综合研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014: 112-116.
- [47] Gao S, Ling W, Qiu Y, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(13/14): 2071-2088.
- [48] Sugisaki R, Yamamoto K, Adachi M. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic[J]. Nature, 1982, 298(5875): 644-647.
- [49] Murray R W, Buchholtz T B, Marilyn R, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. Geology, 1990, 18(3): 268.
- [50] Brookins D G. Aqueous geochemistry of rare earth elements[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 201-225.
- [51] 刘平, 廖友常, 张雅静. 黔中—渝南石炭纪铝土矿含矿岩系中的海相沉积特征[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 641-654.
- [52] 刘长龄, 覃志安. 我国铝土矿中微量元素的地球化学特征[J]. 沉积学报, 1991, (2): 25-33.
- [53] 巴多西 G. 等著, 顾皓民, 等译. 红土型铝土矿[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993.
- [54] 张启明, 江新胜, 秦建华, 等. 黔北—渝南地区中二叠世早期梁山组的岩相古地理特征和铝土矿成矿效应[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 558-568.
- [55] 刘平, 廖友常. 黔中—渝南沉积型铝土矿区域成矿模式及找矿模型[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2063-2082.