

# 西昆仑塔什库尔干赞坎铁矿成矿物质来源的锶钕同位素约束

周振菊<sup>1,2</sup>, 陈衍景<sup>2</sup>, 汤好书<sup>3</sup>, 吴艳爽<sup>4</sup>, 陈正乐<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;
3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011

**摘要:**西昆仑赞坎铁矿是塔什库尔干地区新发现的大型富铁矿,其赋矿围岩为布伦阔勒群火山—沉积变质岩系。矿体主要呈层状和似层状分布,矿石具有条带状、浸染状和块状构造。通过研究该矿床赋矿地层、矿石的硫化物钕和锶同位素组成特征,获得矿石硫化物  $I_{Sr}=0.7100\sim 0.7111$ ,平均值为0.7103;  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.511555\sim 0.512223$ ,平均值为0.511827;赋矿围岩布伦阔勒群  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.511552$ 。Sr-Nd同位素特征表明,成矿物质来源具有壳幔混合特征,主要来自海底火山喷发活动。赞坎铁矿属与海底热液有关的铁矿床,形成于早古生代原特提斯洋向南俯冲的岛弧环境。

**关键词:**Sr-Nd同位素;成矿物质来源;硫化物;矿石;布伦阔勒群;赞坎铁矿;塔什库尔干;西昆仑

中图分类号:P618.31 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2018)04-0454-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2018.04.454  
引用格式:ZHOU Zhenju, CHEN Yanjing, TANG Haoshu, et al. Sr-Nd Isotope Constraints on the Source of Ore-forming Elements of Zankan Iron Deposit in the Taxkorgan Terrane of West Kunlun Orogen[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(4): 454-464.  
周振菊, 陈衍景, 汤好书, 等. 西昆仑塔什库尔干赞坎铁矿成矿物质来源的锶钕同位素约束[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 454-464.

塔里木南缘的西昆仑塔什库尔干铁矿带是我国新近发现的重要富铁矿带之一[图1(a), 1(b)]。目前该区已发现铁矿床10余个[图1(b)], 探明铁矿石资源量大于 $6\times 10^8$  t, 预测铁矿石资源量达 $15.56\times 10^8$  t<sup>[1-2]</sup>。本区铁矿床以条带状磁铁矿为主, 规模大且品位高, 代表性矿床有赞坎、老并、叶里克、塔阿西、莫拉赫和莫喀尔等大、中型矿床。不同于前寒武纪条带状铁建造, 其以条带状硅铁矿石为主, 可见明显的硅铁分离特征; 这些矿床具“硫化物(黄铁矿为主)、硫酸盐(石膏)、磁铁矿”3类矿物组合互层

形成的层控或层状铁建造, 世界罕见, 独具特色。有关该区铁矿成矿时代和矿床类型等方面的研究取得了不少认识, 但同时也存在一些争议。主要观点如下: ①赋矿地层布伦阔勒群及铁矿床的形成时代为古元古代, 矿床类型属BIF或沉积变质型<sup>[3-6]</sup>; ②该矿带发育石膏—磁铁矿建造, 含铁岩系形成时代为早古生代, 矿床类型属海相火山岩型<sup>[7-9]</sup>。

赞坎铁矿床是目前塔什库尔干地区探明资源量最大的铁矿之一[图1(b)], 初步估算铁矿石资源量为 $1.8\times 10^8$  t, 矿石品位TFe为28.3%~58.8%<sup>[1-2, 10]</sup>。

收稿日期:2018-05-04; 修订日期:2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目“西南天山阿沙哇哇造山型金矿构造—流体控矿作用研究”(编号:41772085)、“西昆仑塔什库尔干赞坎铁矿成矿作用研究”(编号:41402061)、“帕米尔地区塔什库尔干铁矿带黄铁矿—石膏/重晶石—磁铁矿建造成因研究”(编号:41672086)、“中—新生代天山造山带再造过程与砂岩型铀矿成矿作用”(编号:U1403292)和“十二五”国家科技支撑计划项目“西南天山金铀成矿系统与靶区优选评价”(编号:2015BAB05B04)联合资助

作者简介:周振菊(1984-), 女, 广西荔浦人, 助理研究员, 从事矿床学研究工作。zhenjuzhou@126.com

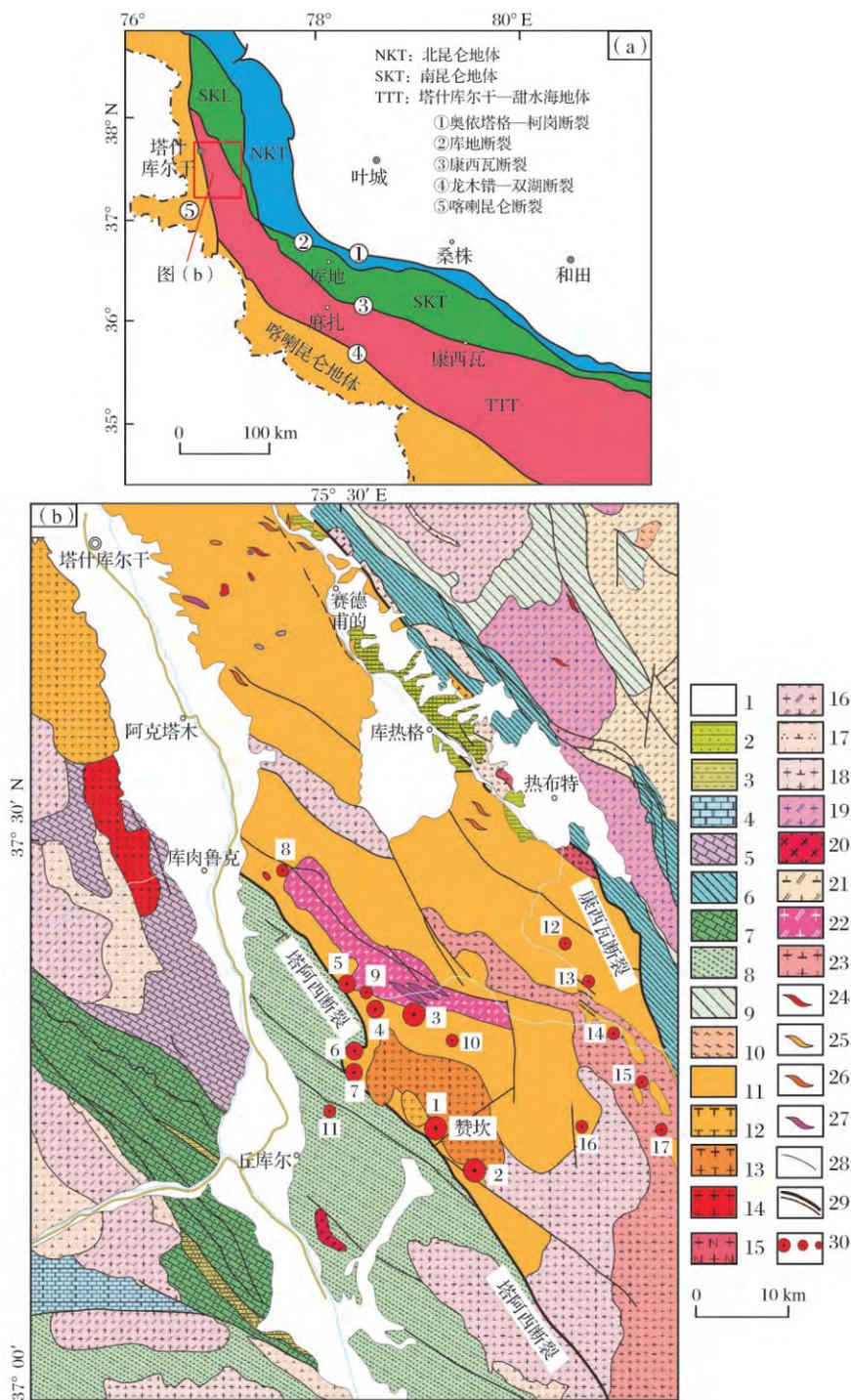


图1 (a)西昆仑地区地质简图<sup>[28]</sup>; (b)塔什库尔干地区铁矿分布地质简图<sup>[4,8]</sup>

Fig.1 (a)Tectonic subdivision of the West Kunlun Orogen<sup>[28]</sup>, showing the location of the Taxkorgan iron ore belt; (b)simplified geologic map of the Taxkorgan iron ore belt<sup>[4,8]</sup>

1. 第四系; 2. 下白垩统拉夫底群; 3. 下白垩统; 4. 中—下侏罗统龙山组; 5. 中三叠统; 6. 上石炭统; 7. 下石炭统恰提尔群; 8. 下志留统温泉沟群; 9. 奥陶—志留系; 10. 中元古界库浪那古群; 11. 前泥盆纪布伦纳杂岩; 12. 新生代正长岩; 13. 新生代正长花岗岩; 14. 中生代花岗岩; 15. 中生代斜长花岗岩; 16. 中生代二长花岗岩; 17. 中生代石英闪长岩; 18. 中生代花岗闪长岩; 19. 晚古生代二长花岗岩; 20. 早古生代辉长岩; 21. 早古生代石英二长闪长岩; 22. 元古宙石英二长岩; 23. 元古宙花岗闪长岩; 24. 花岗岩; 25. 石英闪长岩; 26. 伟晶岩; 27. 橄辉岩; 28. 地质界线; 29. 断裂; 30. 铁矿床 (1-赞坎, 2-莫喀尔, 3-老井, 4-叶里克, 5-协尔波利, 6-阿依里希, 7-吉尔铁克沟, 8-塔阿西, 9-塔辖尔, 10-莫亚古尼孜, 11-果尔德库勒, 12-卡拉本, 13-莫拉赫, 14-喀来子, 15-塔德尔, 16-其克尔克, 17-河克兰尔)

前人研究表明,赞坎铁矿形成时代为早古生代<sup>[11]</sup>,成矿流体主要为海底高温热液和海水<sup>[12-13]</sup>。然而,关于赞坎铁矿成矿物质的研究较薄弱。锶、钕等同位素组成是研究成矿流体和成矿物质来源的有效示踪剂<sup>[14-27]</sup>,因此通过开展赞坎铁矿赋矿地层和矿石硫化物的锶、钕同位素地球化学研究,探讨成矿流体和成矿物质的来源,从而揭示赞坎铁矿的矿床成因和成矿机制。

## 1 区域地质背景

塔什库尔干地区处于印度板块与塔里木板块结合部位的西昆仑造山带(图1),跨越多个构造单元,区内深大断裂发育,其东界为麻扎—康西瓦断裂,西界为塔阿西断裂(图1),这些主边界断裂不仅控制着塔什库尔干地区的构造格局分布,而且控制了该区次级断裂的发育。

区内出露地层主要为前泥盆纪布伦阔勒群和志留系温泉沟群。其中,布伦阔勒群是最主要的含矿地层,已发现有赞坎、老并、塔阿西、孜落依和切列克其等一系列的大型铁矿(图1)。其原岩为一套沉积型火山岩—碎屑岩—碳酸盐岩建造,岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩和大理岩等<sup>[4,28]</sup>。布伦阔勒群总体变质较深,内部可见多条较大规模的构造混杂岩带,显示内部混有不同时代的构造块体<sup>[28-31]</sup>。目前布伦阔勒群的形成时代还存在争议,学者们在布伦阔勒群获得了大量的U-Pb同位素年代学数据,年龄范围从古元古代至古生代,主体集中于古元古代和早寒武世,其次为中—新元古代<sup>[11,32-36]</sup>。温泉沟群出露在布伦阔勒群的西部,二者呈断层接触关系,为一套碎屑岩—碳酸盐岩建造,岩性组合为粉砂岩、泥(板)岩、灰岩、石英砂岩、硅质砾岩和千枚岩等。

区内岩浆岩活动强烈,岩石类型主要有基性—超基性岩和中酸性岩,以及少量的碱性岩,其侵入时代从元古宙至中生代。岩浆活动以中生代最为强烈,古生代和新生代次之,元古宙最弱(图1)。

## 2 矿床地质特征

赞坎铁矿床位于西昆仑造山带塔什库尔干—甜水海地体北部[图1(b)]<sup>[1-2,11]</sup>。矿区出露地层主

要有前泥盆纪布伦阔勒群和志留系温泉沟群(图2)。布伦阔勒群在矿区内大面积分布,岩石类型主要为黑云石英片岩、斜长角闪片岩和阳起石石英片岩等。矿体主要赋存于布伦阔勒群火山—沉积变质岩系中。志留系温泉沟群主要分布在矿区南西角,与布伦阔勒群不整合接触,岩石类型主要为石英砂岩、大理岩和石英岩等。矿区构造简单,以单斜为主,总体向NE倾斜,倾角为25°~40°,沿走向延伸较为稳定。局部发育一系列逆冲断层及由逆冲断层牵引的褶皱。由于断层作用的影响,地层常被挤压变形,可见小褶曲构造,局部有小的层间错动<sup>[11]</sup>。矿区中酸性侵入岩发育,主要分布于矿区中部和东北部,岩性包括霏细岩、花岗斑岩、斜长花岗岩和闪长岩等(图2),其中花岗岩侵入时代为(504±26)Ma<sup>[37]</sup>。矿区发育中酸性火山岩,主要岩性为安山岩、英安岩和英安斑岩,在空间上和成因上与铁矿床关系密切(图2),火山岩具弧火山岩特征,锆石U-Pb年龄为ca.536 Ma<sup>[11,36]</sup>。

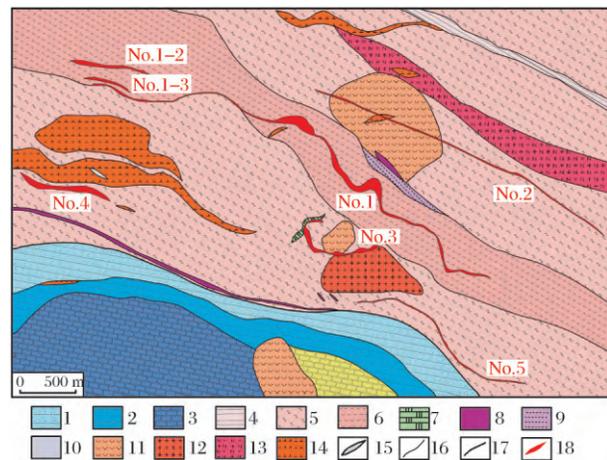


图2 赞坎铁矿矿区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of Zankan iron deposit

1. 下志留统温泉沟群石英岩;2. 下志留统温泉沟群石英砂岩;3. 下志留统温泉沟群中薄层状大理岩;4. 前泥盆纪布伦阔勒群含阳起石石英片岩;5. 前泥盆纪布伦阔勒群黑云母石英片岩夹斜长角闪片岩、片麻岩等;6. 前泥盆纪布伦阔勒群黑云母石英片岩、斜长(角闪)片岩;7. 石膏岩;8. 石英岩;9. 符山石角闪岩;10. 大理岩;11. 中酸性火山岩;12. 花岗斑岩;13. 斜长花岗岩;14. 闪长岩;15. 石英脉;16. 地质界线;17. 断层;18. 矿体

赞坎铁矿先后发现7个工业矿体,矿体延长通常为30~560 m,宽度为6~84 m,1号和3号矿体规模较大,总体倾向NE,倾角17°~88°<sup>[5]</sup>。矿体一般

呈层状和似层状展布,与围岩多呈渐变过渡关系(图3)。矿石矿物主要为磁铁矿,其次为黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿等。脉石矿物主要有石英、石膏、角闪石、阳起石、云母、长石、绿泥石、榍石和磷灰石等。矿石构造以条带状、浸染状和块状为主(图4)。磁铁矿是主要的金属矿物,占矿区金属矿物总量的90%以上。磁铁矿多呈自形一半自形—他形粒状[图5(a)],粒径一般在0.06~0.50 mm之间,局部颗粒较大,达到2 mm,可见与黄铁矿、石膏共生[图5(b),5(c)]。黄铁矿呈半自形—他形粒状结构,粒径一般在0.01~0.90 mm之间,与磁铁矿构成浸染状[图4(b)]、纹层状构造[图4(c),4(d)],表明与磁铁矿同时形成,系沉积成因。磁黄铁矿为矿区内仅次于黄铁矿的硫化物,多呈他形粒状,偶见半自形粒状[图5(d)],粒径一般在0.02~0.60 mm之间,多与黄铁矿、磁铁矿等金属矿物共生[图5(d)]或交代磁铁矿[图5(e)]。黄铜矿在矿石中少见,呈他形粒状零星分布在磁铁矿中,常交代黄铁矿和磁黄铁矿[图5(e),5(f)]。

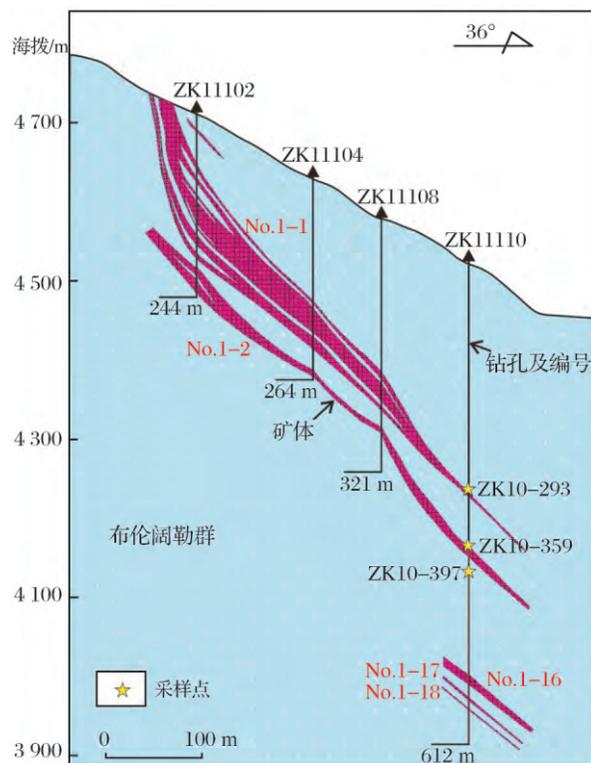


图3 赞坎矿区111勘探线剖面图

Fig.3 Geological section of No.111 prospecting line at Zankan iron deposit

### 3 样品处理及分析方法

本研究共采集4件磁铁矿矿石和1件围岩布伦阔勒群的代表性样品,进行了同位素地球化学研究。首先,将样品粉碎,经筛分、清洗晾干和磁选后,在双目镜下挑选出纯度为99%的硫化物样品,然后将挑选出的硫化物样品(黄铁矿和磁黄铁矿)研磨至200目。硫化物Sr-Nb同位素的分离和纯化工作在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室超净分离实验室完成。样品用 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$ 溶解后上离心机离心,元素分离采用传统阳离子交换柱法,选用不同质量浓度的稀HCl来控制淋洗<sup>[22]</sup>。同位素测试工作在天津地质矿产研究所完成,所用仪器为TRITON热电离固体同位素质谱仪。Sr、Nd同位素测试过程中分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行校正。在本次样品分析过程中,标样NBS-987的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 多次平均检测值为 $0.710229 \pm 20(2\sigma)$ ,标样LRIG Nd的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 多次平均检测值为 $0.512198 \pm 2(2\sigma)$ ,以同样化学流程处理的BCR-2标样测试值如下: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512634 \pm 2(2\sigma)$ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704980 \pm 7(2\sigma)$ 。

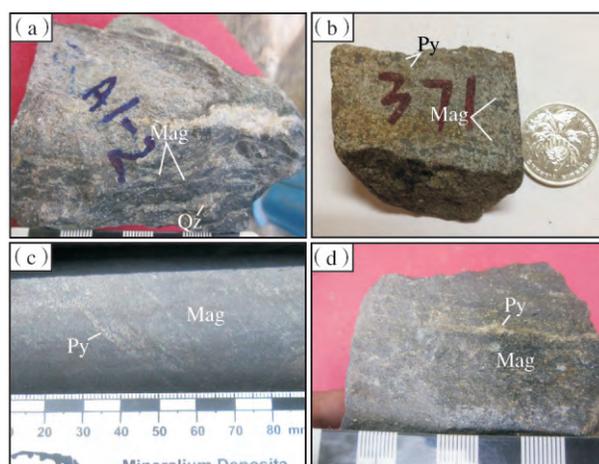


图4 赞坎铁矿矿石类型

Fig.4 Ore types of Zankan iron deposit

(a)条带状矿石;(b)浸染状矿石,黄铁矿呈浸染状分布;(c),(d)块状矿石,黄铁矿呈纹层状分布  
Py-黄铁矿;Mag-磁铁矿;Qz-石英

### 4 Sr-Nd同位素地球化学

Sr同位素分析结果见表1。表1中的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 是根据实测的样品元素含量和同位素比值计算所

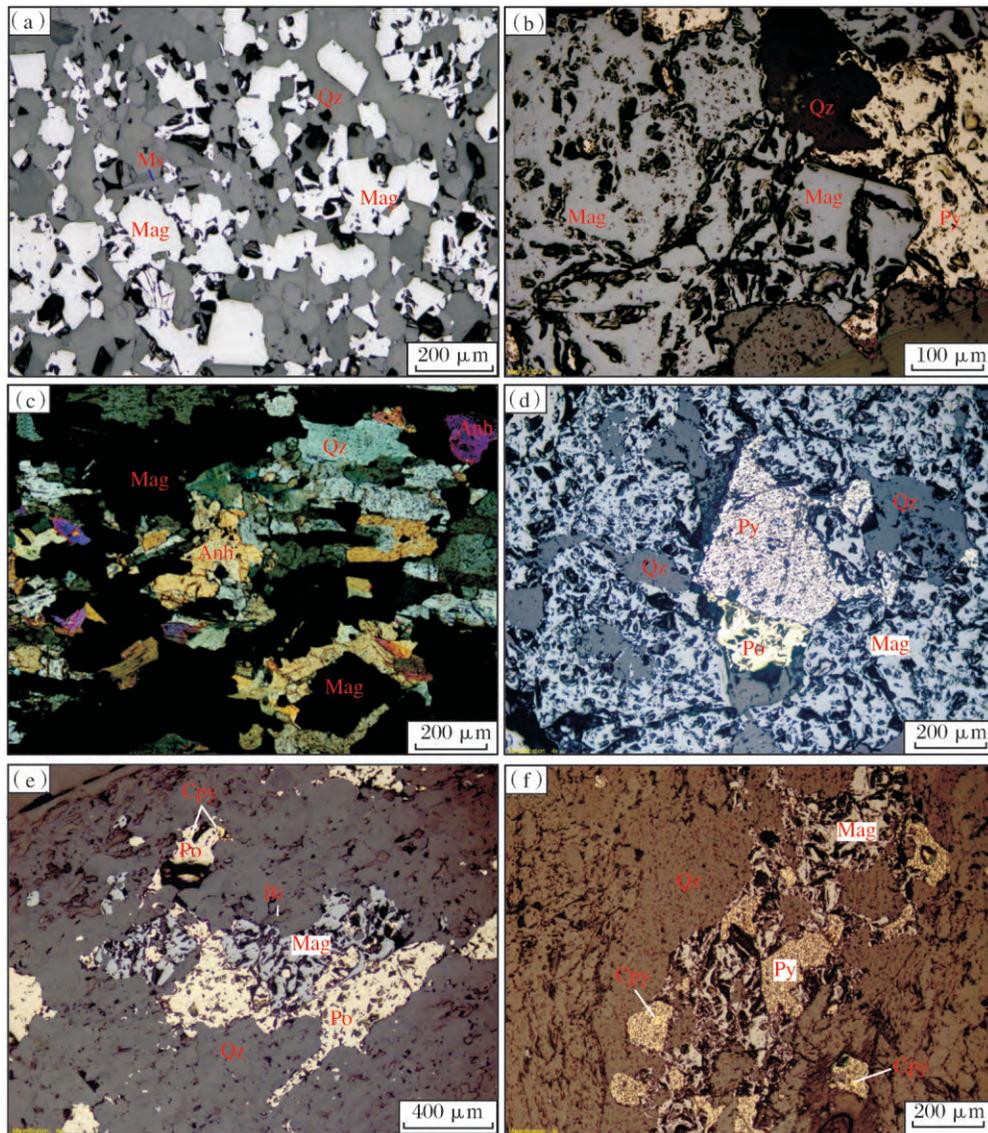


图5 赞坎铁矿矿石矿物结构特征

Fig.5 Photomicrographs of the ore minerals at Zankan iron deposit

(a) 磁铁矿呈自形一半自形晶(反射光);(b) 他形黄铁矿与磁铁矿共生(反射光);(c) 磁铁矿与石膏共生(正交偏光);(d) 磁黄铁矿呈半自形粒状,磁黄铁矿与黄铁矿共生(反射光);(e) 磁黄铁矿交代磁铁矿,黄铜矿交代磁黄铁矿(反射光);(f) 黄铁矿交代磁铁矿,而后又被黄铜矿交代(反射光)

Anh-石膏;Bi-黑云母;Cpy-黄铜矿;Mag-磁铁矿;Ms-白云母;Po-磁黄铁矿;Py-黄铁矿;Qz-石英

得,成矿年龄采用矿区内含铁岩系中火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄(约为 536 Ma)<sup>[11,36]</sup>。将测得的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素比值返算回 536 Ma 时的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值  $I_{sr}$ ; 初始 Sr 计算公式:  $I_{sr} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_m(e^{\lambda t} - 1)$ 。

赞坎铁矿床矿石黄铁矿的  $I_{sr}$  值范围为 0.7100~0.7111,平均值为 0.7103。赋矿围岩布伦阔勒群黑

云母石英片岩 Rb/Sr 比值大于 1(表 1),可能导致  $I_{sr}$  值(0.697)小于其真实值,本文不予讨论。赞坎铁矿矿石硫化物的<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 比值均小于 1,故其  $I_{sr}$  值可以用来示踪成矿物质和流体的来源。矿石黄铁矿的  $I_{sr}$  值高于 0.701,表明矿石中的 Sr 具有壳源特征,来自于放射性成因 Sr 较高的物源区。早古生代海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值不超过 0.710<sup>[38]</sup>,低于赞坎铁

表 1 赞坎铁矿金属硫化物 Sr 同位素组成  
Table 1 Sr isotope composition of metal sulfides from Zankan iron deposit

样品编号	样品名称	测试对象	Rb/( $\times 10^{-6}$ )	Sr/( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$I_{\text{Sr}}(536 \text{ Ma})$
ZK10-293	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.12	1.33	0.2556	0.712000	0.7100
ZK10-359	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.14	0.82	0.4828	0.714769	0.7111
ZKPM11-2	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.09	2.18	0.1208	0.710982	0.7101
ZKPM11-4	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.23	7.67	0.0870	0.710668	0.7100
平均值( $n=4$ )							0.7103
布伦阔勒群							
ZK10-397	黑云母石英片岩	磁黄铁矿	0.40	0.53	2.2202	0.714251	0.6973

矿的矿石硫化物,表明矿石中的 Sr 不可能由单一的海水提供。赞坎火山岩  $I_{\text{Sr}} = 0.7109 \sim 0.7202$ <sup>[36]</sup>, 放射性成因 Sr 含量高, 矿石硫化物  $I_{\text{Sr}}$  值低于火山岩(图 6), 表明硫化物中高放射性成因 Sr 主要来自于火山岩。

赞坎铁矿床金属硫化物 Nd 同位素分析结果见表 2。表 2 中的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  是根据实测的样品元素含量和同位素比值计算所得, 成矿年龄采用矿区内含铁岩系中火山岩锆石 U-Pb 同位素年龄(ca.536 Ma)<sup>[11,36]</sup>, 将测得的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  同位素比值换算回 536 Ma 时的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  和  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值; 初始 Nd 计算公式:  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m (e^{\lambda t} - 1)$ 。计算过程中, 球粒陨石(CHUR) Nd 同位素参数采用  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} =$

$0.512638$ <sup>[39]</sup>,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ <sup>[40]</sup>。

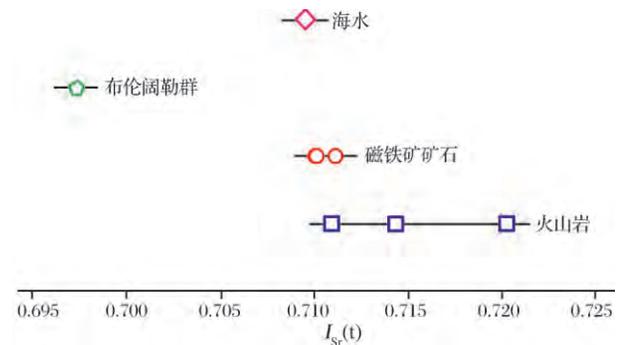


图 6 赞坎铁矿床金属硫化物及相关地质体 Sr 同位素组成 (海水和火山岩的数据分别引自[38],[36])

Fig.6 Sr isotope composition of metal sulfides and related geological bodies in Zankan iron deposit (data for seawater from [38], and volcanic rocks from [36])

表 2 赞坎铁矿床金属硫化物 Nd 同位素组成  
Table 2 Nd isotope composition of metal sulfides from Zankan iron deposit

样品编号	样品名称	测试对象	Sm/( $\times 10^{-6}$ )	Nd/( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(536 \text{ Ma})$
ZK10-293	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.24	1.32	0.1096	0.512088	0.511703	-4.8
ZKPM11-4	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.93	4.36	0.1291	0.512676	0.512223	5.4
ZKPM11-2	磁铁矿矿石	黄铁矿	0.16	1.05	0.0918	0.511877	0.511555	-7.7
平均值( $n=3$ )							0.511827	-2.4
布伦阔勒群								
ZK10-397	黑云母石英片岩	磁黄铁矿	0.13	0.70	0.1078	0.511931	0.511552	-7.7

赞坎铁矿矿石和围岩布伦阔勒群硫化物的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} < 1$  (表 2), 故其 Sm/Nd 比值可以代表成矿流体系统。矿石黄铁矿的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511555 \sim 0.512223$ , 平均值为 0.511827,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.7 \sim 5.4$ , 平均值为 -2.4 (表 2)。围岩布伦阔勒群的样品  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  为 0.511552,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 -7.7 (表 2)。

布伦阔勒群的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值低于矿石黄铁矿的最低值(0.511555), 说明黄铁矿中的 Nd 不可能仅由围岩布伦阔勒群黑云母石英片岩提供。若布伦阔勒群作为源区之一, 尚需  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值高于硫化物另一个端元的物质来源, 即放射性成因 Nd 较高的物质端元, 指示可能有幔源的贡献。矿石硫化物的

$\epsilon_{Nd}$  (536 Ma) 高达 5.4, 只有亏损地幔才能满足这一要求 (图 7)。通常, 当初始成矿流体或岩浆是由亏损地幔脱水或交代作用所形成的, 就会记录下具有含较高放射性成因 Nd 的亏损地幔特征, 这种成矿流体或岩浆向上运移并与上地壳物质发生混染或相互作用时所形成的矿床 (或岩体) 就会表现出壳幔混合同位素特征。赞坎火山岩轻稀土富集, 重稀土相对亏损, 富集 LILE, 而相对亏损 HFSE, 呈现出典型的岛弧火山岩的微量元素变化特征, 系来自受俯冲流体交代的地幔源区<sup>[36]</sup>。在图 7 中, 矿石硫化物  $\epsilon_{Nd}(t)$  值与火山岩 (-6.2 ~ -5.5) 重叠, 表明成矿流体可能有海底火山作用的贡献。

### 5 矿床成因讨论

综合矿床地质特征、矿石元素以及同位素地球化学研究, 赞坎铁矿应属于与海底热液有关的铁矿床, 其理由包括: ①发育由“磁铁矿、黄铁矿、(硬)石膏”3类矿物互层组成的层状铁建造; ②矿体受地层及岩性控制明显, 矿体顶底板围岩以黑云母石英片岩为主, 在空间上可见部分矿体产于侵入岩中 (如赞坎 M3 号矿体等), 或与海相火山岩的关系十分密切<sup>[42]</sup>; ③矿床具原始沉积构造特征, 矿体主要呈层状和似层状 (图 2, 图 3), 矿石可见条带状和条纹状构造 [图 4(a), 4(c), 4(d)], 且条带、条纹平行于围岩沉积层理; ④部分矿石样品呈 LREE 富集, Eu 正异常, 表现出高温热液的特征<sup>[13]</sup>; ⑤磁铁矿具有高的 Al、Ti 和 V 含量, 表明其与相对还原的富 Al-Ti 海底热液活动有关<sup>[12]</sup>; ⑥赞坎铁矿  $\Delta\delta^{57}\text{Fe}_{\text{py-mag}} = 0.2\%$

1.1‰, 指示矿床形成于较高温环境 ( $\geq 236\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[12]</sup>; ⑦硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于 3.2‰~32.8‰ 之间, 表明成矿物质来源于岩浆热液和海相硫酸盐<sup>[13]</sup>; ⑧磁铁矿的  $\delta^{18}\text{O}$  值为 3.9‰~7.8‰<sup>[7]</sup>, 具有沉积磁铁矿特征 ( $\delta^{18}\text{O} = 1.3\text{‰} \sim 6.8\text{‰}$ )<sup>[43]</sup>; ⑨Sr-Nd 同位素特征表明, 其成矿物质来源具壳幔混合特征, 成矿流体有火山作用的贡献; ⑩赞坎铁矿的成矿年龄为 ca.536 Ma, 与原特提斯洋向南俯冲时间一致<sup>[11]</sup>。

根据以上地球化学研究, 并结合前人研究成果, 提出如下成矿模式: 早古生代期间, 原特提斯洋向南俯冲到南昆仑和塔什库尔干—甜水海地体, 强烈的岛弧火山喷发作用不仅带来了大量必须的铁质等成矿物质, 而且火山作用也进一步促进了海水萃取火山岩中的成矿物质的能力, 通过火山活动与海水之间的相互作用, 诱发了赞坎铁矿成矿系统的发育 (图 8)。

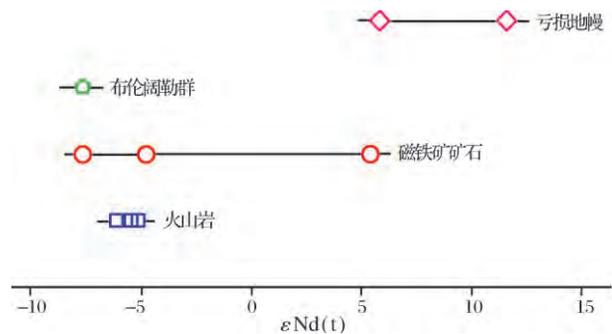


图 7 赞坎铁矿床金属硫化物及相关地质体 Nd 同位素组成 (亏损地幔和火山岩的数据分别引自 [41], [36])

Fig.7 Nd isotope composition of metal sulfides and related geological bodies in Zankan iron deposit (data for depleted mantle from [41], and volcanic rocks from [36])

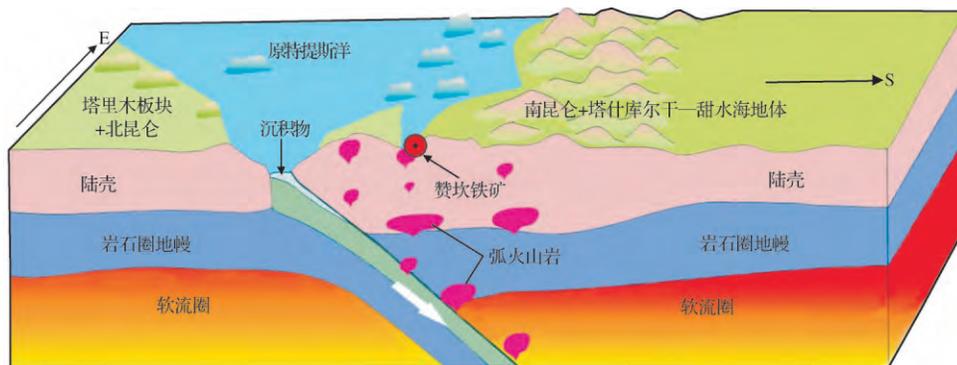


图 8 赞坎铁矿成矿模式

Fig.8 Metallogenic model for Zankan iron deposit

## 6 结论

(1)赞坎铁矿体主要赋存于布伦阔勒群火山—沉积变质岩系中,呈层状和似层状分布。铁矿物以沉积磁铁矿为主,与(硬)石膏、黄铁矿同生。

(2)赞坎铁矿矿石硫化物Sr-Nd同位素特征显示,其成矿物质具壳幔混合特征,主要源自海底火山喷发作用,同时还有布伦阔勒群和海水的贡献。

(3)赞坎铁矿形成于早古生代原特提斯洋向南俯冲的岛弧环境,属与海底热液有关的铁矿床。

**致谢** 野外工作得到了新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局董连慧研究员和屈迅高级工程师以及赞坎铁矿同行们的大力支持,审稿人提出了宝贵的修改建议,在此一并致以诚挚感谢!

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 董连慧,冯京,庄道泽,等.新疆地质矿产勘查回顾与展望[J].新疆地质,2011,29(1):1-6.  
Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, et al. Xinjiang geological mineral exploration retrospect and prospect [J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 1-6.
- [ 2 ] 董连慧,冯京,庄道泽,等.新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J].新疆地质,2011,29(4):416-422.  
Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, et al. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(4): 416-422.
- [ 3 ] 陈俊魁,燕长海,张旺生,等.新疆塔什库尔干地区磁铁矿床地质特征与找矿方向[J].地质调查与研究,2011,34(3):179-189.  
Chen Junkui, Yan Changhai, Zhang Wangsheng, et al. Geological characteristics and prospecting direction of the magnetite iron deposits in the Taxkorgan, Xinjiang [J]. Geological Survey and Research, 2011, 34(3): 179-189.
- [ 4 ] Ji W H, Li R S, Chen S J, et al. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of northwest China and its geological significance [J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54(1): 61-72.
- [ 5 ] 陈勇,吴亮,张春江,等.新疆西昆仑塔什库尔干赞坎铁矿矿床地质特征初探[J].山东国土资源,2013,29(2):18-22.  
Chen Yong, Wu Liang, Zhang Chunjiang, et al. Primary study on geological characteristics of Zankan iron deposit in Tashkurgan in western Kunlun in Xinjiang Uygur Autonomous Region [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2013, 29(2): 18-22.
- [ 6 ] 钱兵,高永宝,李侃,等.塔什库尔干地区赞坎铁矿矿物学特征与成因[J].地质与勘探,2014,50(4):630-640.  
Qian Bing, Gao Yongbao, Li Kan, et al. Mineralogy and genesis of the Zankan iron deposit in Taxkorgan area, Xinjiang [J]. Geology and Exploration, 2014, 50(4): 630-640.
- [ 7 ] 燕长海,曹新志,张旺生,等.帕米尔式铁矿[M].北京:地质出版社,2012.  
Yan Changhai, Cao Xinzhi, Zhang Wangsheng, et al. The "Pamir-type" Iron Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [ 8 ] 燕长海,陈曹军,曹新志,等.新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J].地质通报,2012,31(4):549-557.  
Yan Changhai, Chen Caojun, Cao Xinzhi, et al. The discovery of the "Pamir-type" iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 549-557.
- [ 9 ] 陈曹军.新疆塔什库尔干地区铁矿床成矿规律及找矿方向研究[D].武汉:中国地质大学,2012.  
Chen Caojun. Study of Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Iron Deposit in Taxkorgan Area, Xinjiang Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [ 10 ] 冯昌荣,吴海才,陈勇.新疆塔什库尔干县赞坎铁矿地质特征及成因浅析[J].大地构造与成矿学,2011,35(3):404-409.  
Feng Changrong, Wu Haicai, Chen Yong. Geological characteristics and genesis of the Zankan iron deposit in Taxkorgan Xinjiang [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3): 404-409.
- [ 11 ] 林尚康,汤好书,任涛.西昆仑赞坎铁矿区英安斑岩锆石U-Pb年龄[J].河南地质,2015,33(6):986-992.  
Lin Shang Kang, Tang Haoshu, Ren Tao. In-situ U-Pb ages and Hf isotopic analyses of zircons from rhyodacite in

- Zankan, west Kunlun area[J]. *Henan Geology*, 2015, 33(6):986-992.
- [12] Zhou Z J, Tang H S, Chen Y J, et al. Trace elements of magnetite and iron isotopes of the Zankan iron deposit, westernmost Kunlun, China: A case study of seafloor hydrothermal iron deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80:1191-1205.
- [13] Zhou Z J, Tang H S, Wu Y S, et al. Geology, geochemistry and genesis of the Zankan iron deposit in the west Kunlun Orogen, Xinjiang, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, DOI:10.1016/j.oregeorev.2017.09.009.
- [14] Chen Y J, Li C, Zhang J, et al. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2000, 43(Supp.):82-94.
- [15] Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39:560-575.
- [16] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids in the Jiaodong province, eastern China [J]. *International Geology Review*, 2005, 47:530-549.
- [17] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. The Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33:252-266.
- [18] Chen Y J, Pirajno F, Li N, et al. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35:245-261.
- [19] 祁进平, 赖勇, 任康绪, 等. 小秦岭金矿田成因的铍同位素约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(10):2543-2550.  
Qi Jinping, Lai Yong, Ren Kangxu, et al. Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaoqingling gold field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(10):2543-2550.
- [20] 祁进平, 宋要武, 李双庆, 等. 河南省栾川县西沟铅锌银矿床铍同位素研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11):2843-2854.  
Qi Jinping, Song Yaowu, Li Shuangqing, et al. Rb-Sr isotopic composition of the Xigou Pb-Zn-Ag deposit, Luan-chuan, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11):2843-2854.
- [21] 张莉, 杨荣生, 毛世东, 等. 阳山金矿床铍同位素地球化学与成矿物质来源[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11):2811-2822.  
Zhang Li, Yang Rongsheng, Mao Shidong, et al. Sr and Pb isotope geochemistry and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11):2811-2822.
- [22] Ni Z Y, Chen Y J, Li N, et al. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the fluid source of the Dahu Au-Mo deposit in Qinling Orogen, central China, and implication for Triassic tectonic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 46:60-67.
- [23] Deng X H, Chen Y J, Bagas L, et al. S-Pb-Sr-Nd isotope constraints on the genesis of the ca. 850 Ma Tumen Mo-F deposit, Qinling Orogen, China [J]. *Precambrian Research*, 2015, 266:108-118.
- [24] Deng X H, Chen Y J, Santosh M, et al. Re-Os and Pb-Sr-Nd isotope constraints on source of fluids in the Zhifang Mo deposit, Qinling Orogen, China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 30:132-143.
- [25] Zhou Z J, Chen Y J, Jiang S Y, et al. Geology, geochemistry and ore genesis of the Wenyu gold deposit, Xiaoqingling gold field, southern margin of North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 59:1-20.
- [26] Zhou Z J, Liu Z W, Qin Y. Geology, geochemistry and genesis of the Huachangou gold deposit, western Qinling Orogen, central China [J]. *Geological Journal*, 2014, 49:424-441.
- [27] Zhou Z J, Chen Y J, Jiang S Y, et al. Isotope and fluid inclusion geochemistry and ore genesis of the Qiangma gold deposit, Xiaoqingling gold field, Qinling Orogen, southern margin of North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 66:47-64.
- [28] Yang W Q, Liu L, Cao Y T, et al. Geochronological evidence of Indosinian (high-pressure) metamorphic event and its tectonic significance in Taxkorgan area of the Western Kunlun Mountains, NW China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53:1445-1459.
- [29] 王建平. 西昆仑塔什库尔干混杂岩的地质特征及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 2008, 27(12):2057-2066.  
Wang Jianping. Geological features and tectonic significance of melange zone in the Taxkorgan area, west Kunlun [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(12):

- 2057-2066.
- [30] 许志琴,戚学祥,刘福来,等.西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义[J].地质学报,2004,78(6):733-743.  
Xu Zhiqin, Qi Xuexiang, Liu Fulai, et al. The Kangxiwar Caledonian Khondalite Series in west Kunlun, China, and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6):733-743.
- [31] 曲军峰,张立飞,艾永亮,等.西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义[J].中国科学:地球科学,2007,37(4):429-441.  
Qu Junfeng, Zhang Lifei, Ai Yongliang, et al. High-pressure granulite from western Kunlun, northwestern China: Its metamorphic evolution, zircon SHRIMP U-Pb ages and tectonic implication [J]. Science in China: Earth Sciences, 2007, 37(4):429-441.
- [32] 孙海田,李纯杰,吴海,等.西昆仑金属成矿省概论[M].北京:地质出版社,2003.  
Sun Haitian, Li Chunjie, Wu Hai, et al. Overview of Metallogenesis on Western Kunlun [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [33] 张传林,陆松年,于海峰,等.青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化:来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J].中国科学:地球科学,2007,37(2):145-154.  
Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, et al. Tectonic evolution of western Kunlun orogenic belt: Evidences from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb ages [J]. Science in China: Earth Sciences, 2007, 37(2):145-154.
- [34] 杨文强.西昆仑塔县—康西瓦构造带印支期变质、岩浆作用及布伦阔勒岩群的形成时代[D].西安:西北大学,2013.  
Yang Wenqiang. The Indosinian Metamorphism, Magmatism and Formation Age of Bunlunkuole Rock Group in Taxkorgan-Kangxiwar Tectonic Belt, Western Kunlun [D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [35] 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,2013,38(6):1169-1182.  
Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei, et al. Origin of the volcanic rocks from the Ta'axi region, Taxkorgan Xinjiang and its geological significance [J]. Earth Science, 2013, 38(6):1169-1182.
- [36] 董连慧,陈衍景,李基宏,等.环塔里木前寒武纪成矿作用及大型找矿靶区调查[R].乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区地质调查院,2016.  
Dong Lianhui, Chen Yanjing, Li Jihong, et al. Precambrian mineralization and exploration targeting in the circum Tarim area [R]. Urumqi: Geological Survey Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2016.
- [37] 李智泉,张连昌,薛春纪,等.西昆仑赞坎铁矿地质和地球化学特征及矿床类型探讨[J].地质科学,2015,50(1):100-117.  
Li Zhiqian, Zhang Lianchang, Xue Chunji, et al. Geological and geochemical characteristics of Zankan iron deposit in the west Kunlun Mountains [J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1):100-117.
- [38] 韦刚健.海水中 Sr 同位素组成变化的环境意义与 Sr 同位素地层学[J].海洋科学,1995,19(1):23-25.  
Wei Gangjian. Evolution of the Sr isotope of the sea-water: Implications for palaeoenvironment and application of the strontium isotope stratigraphy [J]. Marine Sciences, 1995, 19(1):23-25.
- [39] Hamilton P J, Evensen N M, O' Nions R K. Sm-Nd systematics of Lewisian gneisses: Implications for the origin of granulites [J]. Nature, 1979, 277(5691):25-28.
- [40] Jacobsen S B, Wasserburg G J. Sm-Nd Isotopic Evolution of Chondrites [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1):139-155.
- [41] 李曙光.  $\epsilon\text{Nd-La/Nb}$ 、 $\text{Ba/Nb}$ 、 $\text{Nb/Th}$  图对地幔不均一性研究的意义——岛弧火山岩分类及 EMII 端元的分解 [J]. 地球化学, 1995, 23(2):105-114.  
Li Shuguang. Implications of  $\epsilon\text{Nd-La/Nb}$ ,  $\text{Ba/Nb}$ ,  $\text{Nb/Th}$  diagrams to mantle heterogeneity-classification of island arc basalts and decomposition of EMII component [J]. Geochimica, 1995, 23(2):105-114.
- [42] 陈登辉,伍跃中,李文明,等.西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿矿床特征及其成因[J].大地构造与成矿学,2013,37(4):671-684.  
Chen Denghui, Wu Yuezhong, Li Wenming, et al. Geological characteristics and genesis of the iron deposits in the Taxkorgan area, west Kunlun [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4):671-684.
- [43] 李万亨,杨昌明.冀东滦县地区前震旦纪海底火山沉积变质铁矿的古构造及地球化学环境[J].地球科学,1983(3),117-126.  
Li Wanheng, Yang Changming. Palaeotectonic and geo-

chemical environment of Precambrian submarine volcanic sedimentary metamorphic iron ore in Luanxian of the

eastern Hebei Province [J]. Earth Science, 1983 (3): 117-126.

## Sr-Nd Isotope Constraints on the Source of Ore-forming Elements of Zankan Iron Deposit in the Taxkorgan Terrane of West Kunlun Orogen

ZHOU Zhenju<sup>1,2</sup>, CHEN Yanjing<sup>2</sup>, TANG Haoshu<sup>3</sup>, WU Yanshuang<sup>4</sup>, CHEN Zhengle<sup>1</sup>

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Orogen and Crustal Evolution, Peking University, Beijing 100871, China;

3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China;

4. Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China

**Abstract:** Zankan iron deposit is a recently discovered large iron deposit in the Taxkorgan terrane of the west Kunlun Orogen. The deposit is hosted in the metamorphosed volcanic and sedimentary rocks of the Bulunkuole Complex. The orebodies are stratiform or stratoid. The ores are uniquely composed of magnetite, pyrite and anhydrite at various ratios, and show banded, disseminated and massive structures. This paper reports Sr and Nd isotopic composition of ores and ore-hosting rocks of Bulunkuole Group to constrain sources of ore-forming material. The ores yield  $I_{Sr}$  of 0.7100~0.7111, with an average of 0.7103;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$  of 0.511555~0.512223, with an average of 0.511827. The biotite-quartz schists of Bulunkuole Group yield  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$  of 0.511552. The Sr-Nd isotope systematic shows a source of mixing crust and mantle. Therefore, it is concluded that the ore-forming materials mainly originated from volcanic rocks in the Bulunkuole Complex, and Zankan iron deposit was formed from an Early Cambrian seafloor hydrothermal system related to southward subduction of Proto-Tethyan plate.

**Key words:** Sr-Nd isotope; source of ore-forming materials; sulfide; ore; Bulunkuole group; Zankan iron deposit; Taxkorgan; west Kunlun Orogen

### 山东黄金集团荣获2017年度“中国黄金矿产金十大企业”称号

2018年7月26日,在北京国家会议中心举行的中国国际黄金大会上,山东黄金集团被授予2017年度“中国黄金矿产金十大企业”,山东黄金冶炼公司被授予2017年度“中国黄金冶炼十大企业”。此外,山东省被授予2017年度“中国黄金十大产金省(区)”。

“十三五”以来,山东黄金高举新时代中国特色社会主义思想伟大旗帜,全面实施新旧动能转换重大战略工程,努力推进“争做国际一流,勇闯世界前十”的“十三五”战略规划,各项经济指标大幅攀升,品牌影响力与核心竞争力不断提升。2017年,集团产金近44 t,成功跃居中国第一产金企业,所属焦家

金矿、玲珑金矿率先成为中国黄金产量超百吨的“双子星”;集团效益增幅达到66%以上,资产总额首次突破千亿大关。2018年上半年,实现黄金产量23.24 t,同比增加3.5 t,增幅17.47%,约占全省总产量的60%,约占全国总产量的15%;实现利润总额11.75亿元,同比增加4.22亿元,增幅55.94%;资产总额达到1071.99亿元,同比增幅6%。

未来,山东黄金将进一步解放思想、更新观念,进一步提升境界、自我加压,进一步完善措施、狠抓落实,团结带领全体员工抢抓机遇、乘势而上,同心同德、锐意进取,为打造具有全球竞争力的世界一流黄金企业不懈奋斗。

(来源:山东黄金集团有限公司)