

陕西紫阳柞木沟铁矿床岩石地球化学特征 及成矿指示意义

王坤明, 王宗起, 张英利, 王刚, 武昱东

中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

内容提要: 陕西紫阳县柞木沟矿床位于北大巴山腹地, 赋矿岩体岩性为辉绿岩, 从岩体的下盘到上盘, 未见大规模层状侵入体所具有的层状构造及堆晶结构。矿体赋存于岩体中部暗色含矿带内, 矿体的产状与赋矿辉绿岩体产状一致, 矿石为典型浸染状构造。矿石矿物为钛磁铁矿、钛铁矿, 脉石矿物为辉石、斜长石、角闪石、黑云母等, 蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、钠长石及榍石等。本文运用全岩岩石地球化学分析, 对柞木沟矿床赋矿岩体和矿石分别进行主量元素和微量元素分析。赋矿辉绿岩与矿体具有相似的矿物组成, 微量元素、稀土元素及地幔源区特征相近, 二者具有相近的岩浆来源, 为同一岩浆作用下的产物。矿区的地幔源区性质为软流圈地幔与富集岩石圈地幔混合源区, 且指示矿区岩浆活动可能与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。矿床地质特征、矿石结构构造特征以及岩石地球化学特征共同指示柞木沟矿床属于岩浆型铁矿床。矿床形成构造环境为弧后板内拉张环境, 早志留世弧后拉张作用导致下部岩浆上涌进而完成该矿床的成矿作用。

关键词: 南秦岭; 北大巴山; 柞木沟铁矿床; 辉绿岩

北大巴山地区位于南秦岭造山带的南段—城口断裂以北, 汉旺断裂以南的区域, 其中发育一系列区域性北西—南东走向基性岩墙群或岩脉(王存智等, 2009), 并向东出露于武当地块及湖北枣阳—随州一带, 构成在我国大陆造山带中少见的长达近千米的大规模岩墙群或岩脉(张成立等, 2002), 近年来, 在其中部分岩墙群中发现有官元铁矿、朱溪河铁矿和铁佛寺等少量铁矿床, 前人从岩相学、矿相学、矿石组构(哉仲和等, 1975; 高建利等, 2008; 刘林等, 2010; 刘林, 2010; 李方舟, 2012; 刘林等, 2012)、矿石矿物的矿物化学及年代学方面(王坤明等, 2014)对区域矿床进行了部分研究, 但其研究成果尚不能系统阐明区域矿床的成矿作用, 特别是针对单一矿床内部岩浆作用与成矿作用关系研究薄弱, 表现为赋矿岩体的岩浆作用与矿体的成矿作用之间的成因联系缺少系统的地球化学验证, 而且矿体产于岩体中部, 矿体内部蚀变强烈而围岩几乎未有蚀变的特征不符合典型岩浆分异矿床的特征, 岩浆活动在成矿作用过程中的作用关系如何? 同时, 矿区的成矿构

造环境研究薄弱, 其是否与区域岩体的构造环境一致? 同样需要进一步验证。

众所周知, 全岩地球化学方法目前仍然是岩石学研究的基本工具, 测试方法成熟, 结果可靠, 对于反演岩浆作用和成岩成矿构造环境方面, 得到了大范围应用(邓晋福等, 2015a, b)。同时, 柞木沟矿床位于北大巴山腹地, 矿区岩体及矿体出露情况较好, 矿石品位较好, 是进行区域相关矿床研究最具代表性以及最理想的矿床。因此, 选择柞木沟矿床进行系统全面的岩石地球化学研究以及相应的成矿指示研究对完善区域矿床的成矿作用及指导区域找矿工作都具有重要的科学意义及现实意义。本文试图在前人研究基础上重点针对柞木沟铁矿区内赋矿岩体及矿石进行系统的地球化学研究。考虑到微量元素受分离结晶作用和蚀变作用影响较弱, 重点从赋矿岩体与矿体微量元素地球化学角度对矿床的岩浆作用与成矿作用关系研究以及矿区的成矿构造环境进行深入探讨, 同时结合初步的矿床成因指示研究以期对区域相关矿床的成矿作用研究提供参考和借

注: 文为中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120114009401; DD20160176)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41302080)和中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号: K1313)的成果。

收稿日期: 2015-09-01; 改回日期: 2016-05-23; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.04.004

作者简介: 王坤明, 男, 1984年生。博士后。矿产普查与勘探专业。Email: kunming12345678@163.com。通讯作者简介: 王宗起, 男, 1960年生。研究员, 博士生导师。主要从事大地构造与成矿学研究。Email: kcwzq@vip.sina.com。

鉴。

1 区域地质背景

北大巴山地区主要出露早古生界地层,从南到北依次为寒武系鲁家坪组、箭竹坝组、毛坝关组、八卦庙组、黑水河组,奥陶系高桥组、权河口组、芭蕉口组,志留系陡山沟组和五峡河组,其中毛坝关组和高桥组为区域矿床的赋矿地层,其中柞木沟矿床就位于毛坝关组之中。

镁铁质岩体多呈脉状体分布,其次有岩墙、岩床和岩席等,岩体多数沿断裂、层间破碎带产出,呈切层或顺层产出。脉状岩体长轴方向与区域构造线方向一致,呈 NW—SE 向产出,主要岩石类型为辉绿岩、辉长岩、辉绿玢岩、辉长辉绿岩及辉石闪长岩等,其中部分辉绿岩脉是区内矿床的赋矿岩体。近年来研究表明区内镁铁质岩体形成于板内拉张环境(黄月华等,1992;夏祖春等,1992;张成立等,2002;晏云翔,2005;王存智等,2009;王宗起等,2009;李夫杰,

2009;张欣,2010;邹先武等,2011;王刚,2014),近年来 Shrimp U-Pb 和 LA-ICP-MS 年代学测试证实成岩年代主要为早志留世(张成立等,2002,2007;晏云翔,2005;王存智等,2009;李夫杰,2009;张欣,2010;邹先武等,2011;Wang Kunming et al. , 2015)。

2 矿区地质特征

矿区出露地层为寒武系中统毛坝关组,岩性自下而上依次为深灰色薄层一中厚层状泥质灰岩夹深灰色薄层状钙质灰岩、炭质灰岩,青灰—灰色中厚层灰岩夹深灰色薄层炭质灰岩和硅质灰岩以及灰黑色中薄层炭质灰岩夹泥质灰岩。偶夹炭质岩及硅质灰岩透镜体。地层呈一向南东倾伏的背斜,核部为毛坝关组下段(图 1)。

矿区赋矿岩体的岩性为辉绿岩,沿桃园—鲁家坪背斜近核部顺层侵入,走向与区域构造线方向一致,为北西西方向,岩体长 <3000 m,厚为 100 ~ 200 m,最厚可达 300m,出露面积约 0.5km²。岩体与两

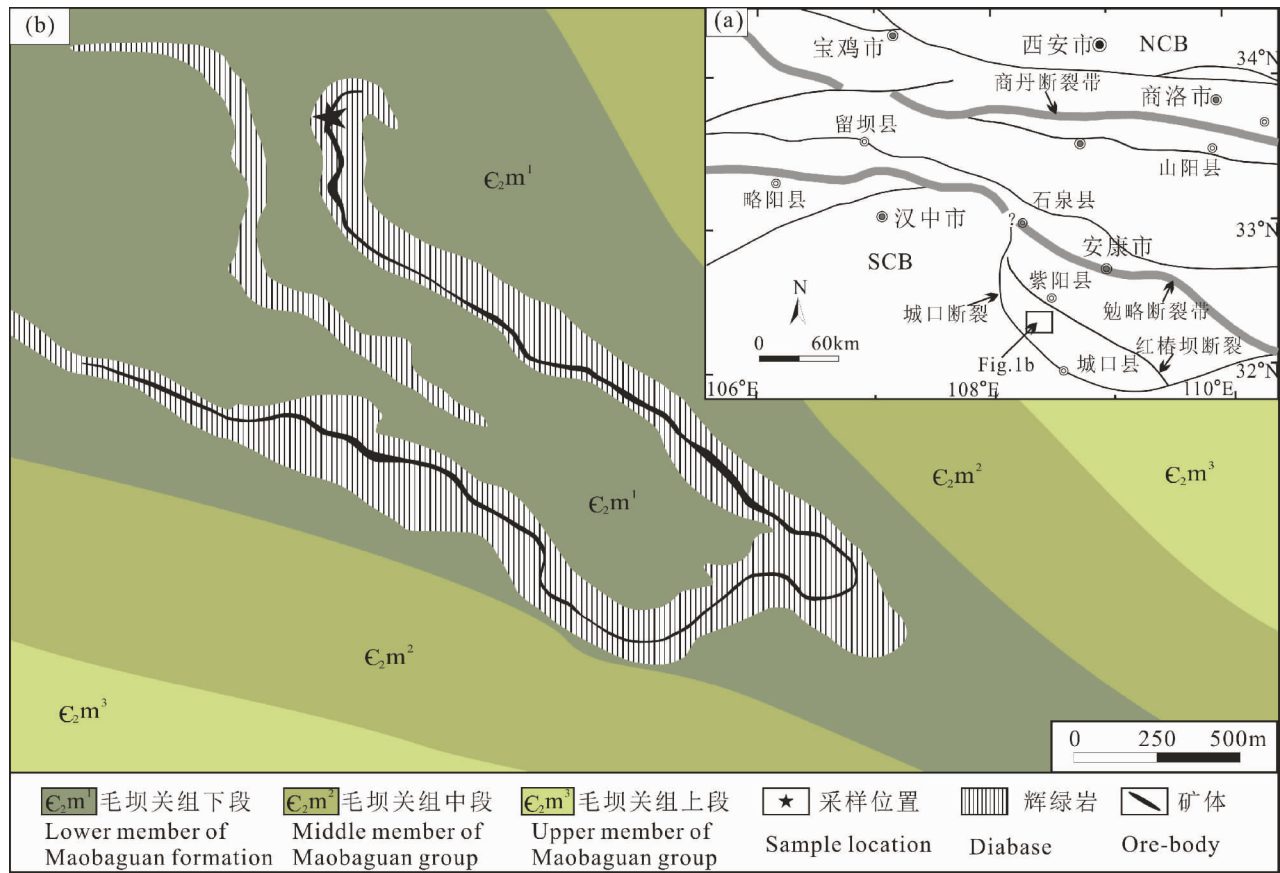


图 1 秦岭造山带大地构造简图(a) (据王宗起等,2009 简编)和紫阳柞木沟铁矿床矿区地质图 (据高建利等^①和战仲和等^②修编)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Qinling Orogenic Belt (a) (Modified after Wang Zongqi et al. , 2009&) and simplified geological map for Zhamugou iron deposit, Ziyang County (b) (Modified after Gao Jianli et al. ^① and Zhai Zhonghe et al. ^②).

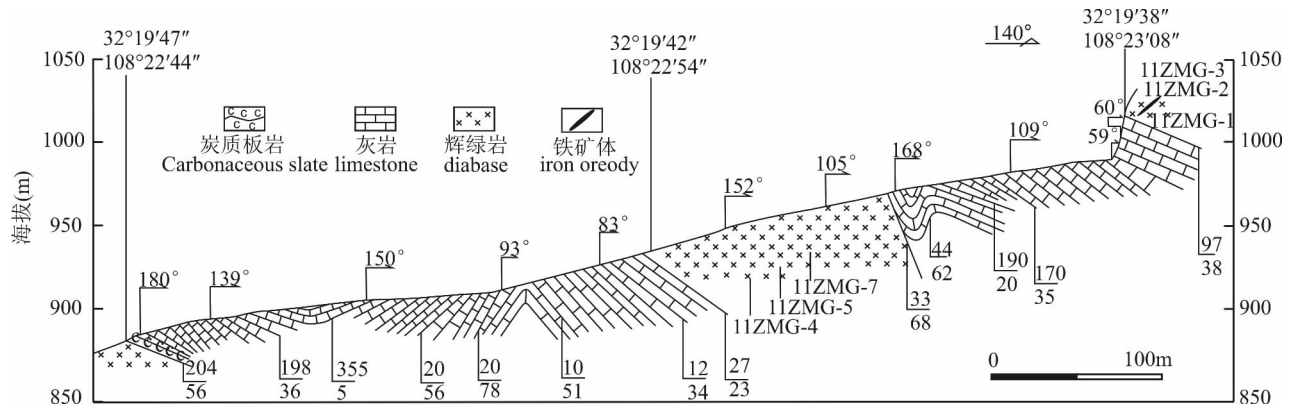


图 2 紫阳柞木沟矿区实测剖面图

Fig. 2 The survey cross-section for Zhamugou iron deposit, Ziyang County

侧地层接触面平直、界面明显(图 3a、b),可见明显冷凝边。岩体从边部到中部矿物粒度明显变粗,根据颜色、结构与及矿化的关系,自岩体边部到岩体中心可划分为边缘带、浅色非含矿带及暗色含矿带,彼此之间呈渐变过渡,从岩体的下盘到上盘未见大规模层状侵入体所具有的层状构造及堆晶结构。矿体赋存于辉绿岩中部的暗色含矿带内,矿体展布与赋矿辉绿岩体走向大致平行,赋矿岩体既是母岩又是矿体的围岩(图 2),矿体与赋矿围岩呈渐变过渡,矿体分布稳定,多呈透镜状或似层状,为浸染型矿体,矿石量为 1940.85 万吨。矿体平均厚度 10.03 m,矿石铁品位较低($TFe = 15.52\% \sim 23.90\%$;平均为 19.65%),钛品位较高($TiO_2 = 5.82\% \sim 9.16\%$)。

3 岩石学及矿相学特征

矿区赋矿岩体本身无明显的岩相分带和韵律构造,从边部到中部仅表现为岩石粒度的变化及颜色变化。整体岩性主要为辉绿岩,与区域上镁铁质岩的岩石类型多样性相区别。其中边缘带以细粒辉绿岩为主,未见矿化,浅色非含矿带岩性为辉绿岩,含少量钛磁铁矿化、钛铁矿化,暗色含矿带为主要赋矿层位,钛磁铁矿、钛铁矿含量较浅色含矿带明显增加,表现为明显的浸染型矿体。赋矿岩体辉绿岩呈黑绿色、辉绿结构、块状构造(图 3c),主要矿物为单斜辉石($35\% \sim 40\%$)和斜长石($45\% \sim 50\%$);副矿物为少量铁钛氧化物($\sim 8\%$)、榍石、磷灰石($\sim 1\%$)组成。辉石主要呈自形一半自形晶,粒径集中为 $1 \sim 2\text{mm}$,部分颗粒发生绿泥石化;斜长石主要呈短长条状及板状,粒径为 $0.7 \sim 1.2\text{mm}$,部分发生钠长石化,长石包含于辉石颗粒内部形成典型的嵌晶

含长结构,另外,可见少量长石穿插辉石颗粒现象,可能说明这部分辉石来自深部岩浆房,这是因为同源的镁铁质岩浆在深部可能是辉石先结晶,在浅部则是斜长石先结晶,也暗示着造岩矿物的形成可能存在着两期。铁钛氧化物主要为钛磁铁矿和钛铁矿,粒径为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$,部分蚀变为榍石;磷灰石呈短柱状,粒径 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 。

矿石类型为浸染状矿石,表现为均匀浸染状的中—细粒矿石,矿物粒度主要为 $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 。矿石矿物主要为钛磁铁矿、钛铁矿(图 3e),脉石矿物主要为辉石、斜长石,少量角闪石、黑云母、磷灰石、黄铁矿、黄铜矿,蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、钠长石、黝帘石、榍石。钛磁铁矿为主要含铁矿物,呈半自形晶颗粒独立产出或与钛铁矿紧密共生,且磁铁矿颗粒内部有叶片状钛铁矿出溶(图 3f)。矿石结构主要为硅酸盐矿物包含铁钛氧化物形成的包含结构以及铁钛氧化物分布于造岩矿物颗粒内部或颗粒之间的嵌晶结构(图 3e、g),分别表明铁钛氧化物结晶时间早于硅酸盐矿物和晚于硅酸盐矿物,矿石构造主要为稀疏浸染状、浸染状。钛磁铁矿和钛铁矿粒度均匀,一般粒径 $0.3 \sim 0.8\text{mm}$,呈密度均等的浸染状分布,未见明显定向性分布或沿裂隙分布、充填的钛磁铁矿和钛铁矿。矿床围岩蚀变主要表现为矿体内部蚀变强烈,而赋矿岩体围岩没有蚀变,蚀变类型主要有斜长石的钠长石化(图 3g)、钠黝帘石化,辉石、角闪石大量绿泥石化、少量阳起石化(图 3h),怀疑是由铁、镁硅酸盐矿物遭受后期热液蚀变所致。

根据矿石组构和矿物共生组合特征,划分为岩浆成矿期和热液蚀变期。岩浆成矿期,早期为钛铁矿 + 钛磁铁矿组合,中期为单斜辉石 + 斜长石 + 角

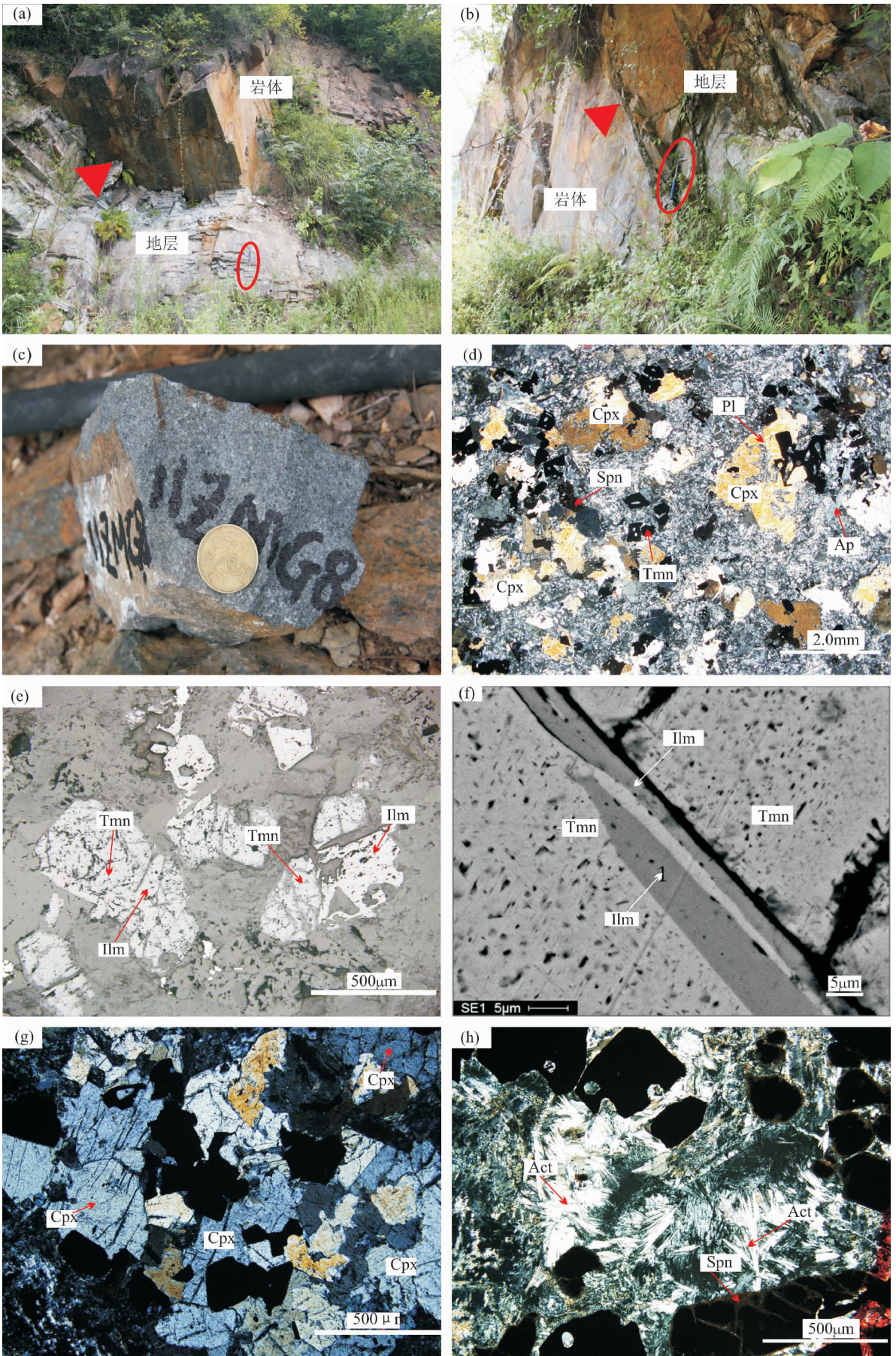


图 3 紫阳柞木沟铁矿床矿石镜下显微照片

Fig. 3 The photomicrographs of the ore in Zhamugou iron deposit, Ziyang County

(a) 岩体与地层接触关系;(b) 岩体与地层接触关系;(c) 辉绿岩手标本;(d) 嵌晶含长结构,单偏光;(e) 钛铁矿与钛磁铁矿共生,单偏光;(f) 钛铁矿在钛磁铁矿内部叶片状出溶,单偏光;(g) 铁钛氧化物产于辉石内部,正交偏光;(h) 矿石内部阳起石化,正交偏光;Ilm—钛铁矿;Tmn—钛磁铁矿;Cpx—单斜辉石;Pl—斜长石;Ab—钠长石;Act—阳起石;Spn—榍石;
(a) The contact of intrusion and strata; (b) The contact of intrusion and strata; (c) diabase hand specimen; (d) poikilophitic texture, crossed light; (e) intergrowth of ilmenite and titanium magnetite, plane-polarized light; (f) the ilmenite foliated soluble in titanomagnetite, plane polarized light; (g) the Fe—Ti oxide in pyroxene, crossed light; (h) the actinolite in ore, crossed light; Ilm—ilmenite; Tmn—titanomagnetite; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Ab—albite; Act— actinolite; Spn—sphene

闪石,其中单斜辉石呈半自形晶,长石呈长条状包含于辉石颗粒内部,晚期则为钛铁矿 + 钛磁铁矿 + 少量黑云母。热液蚀变期矿物组合为阳起石—钠长石—黝帘石—绿帘石—黄铁矿—黄铜矿—绿泥石等。早期中高温热液蚀变,以辉石的阳起石化,斜长石的钠长石、钠黝帘石化为特征,晚期则为铁镁硅酸盐矿物的中低温热液蚀变(绿泥石化)以及金属硫化物(黄铁矿、黄铜矿)的结晶。

4 地球化学特征

分别选取柞木沟矿床赋矿岩体内不含矿辉绿岩样品及暗色含矿带的矿石样品进行岩石地球化学测试。新鲜未蚀变的辉绿岩手标本从不含矿辉绿岩边部到中部依次选取,矿石样品则从暗色含矿带边缘到中部依次选取,其中部分矿石样品普遍存在蚀变现象。样品采样点地理坐标为: N32°19'38", E108 ° 23'08"。

4.1 分析方法

首先将岩石样品送廊坊河北省区域地质矿产调查研究所实验室磨成 200 目以下的岩石粉末,进而将其送国土资源部国家地质实验测试中心进行主量元素、微量元素和稀土元素分析测试。主量元素分析用 XRF(X 荧光光谱仪 PW4400)方法测试,Fe₂O₃ 和 FeO 用湿化学法单独分析,检测方法依据为:

Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、SiO₂、TiO₂按 GB/T14506. 14-1993 标准,FeO 按 GB/T14506. 14-1993 标准,烧失量按 LY/T1253-1999 标准;微量元素(Cu、Pb、Zn、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni、Ba、Cr、Ga、Nb、Rb、Sr、Zr)和稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、G d、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y)采用等离子体质谱仪(ICP-MS-Excell)测试,检测方法依据为 DZ/T0223-2001 标准。主量元素分析中 SiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO、MgO、K₂O、Na₂O 绝对误差为 1%,Fe₂O₃、P₂O₅、TiO₂、MnO 的分析绝对误差为 10%;微量元素和稀土元素中含量大于 10 × 10⁻⁶ 的元素相对误差为 5%,而小于 10 × 10⁻⁶ 的元素相对误差为 10%。

4.2 主量元素特征

矿床的主量元素组成见表 1,赋矿岩体主量元素含量明显高于矿石,表现为 SiO₂ = 42. 26% ~ 45. 42%, MgO = 5. 83% ~ 8. 11%, Al₂O₃ = 12. 3% ~ 14. 06%,表现高 TiO₂ (3. 50% ~ 5. 58%)、高 Fe₂O₃ (14. 18% ~ 17. 03%)、低 K₂O (0. 67% ~ 1. 42%)、低 Na₂O (2. 53% ~ 3. 37%) 以及较高的全碱含量(K₂O + Na₂O = 3. 56% ~ 4. 79%) 特征,样品 Mg#变化范围为 39 ~ 59,指示岩浆经过高度演化。矿石样品的主量元素组成可能受到矿床内部的矿化作用和蚀变作用影响,导致 SiO₂ 含量明显较低(仅为 30%

表 1 紫阳柞木沟铁矿床主量元素组成(%)

Table 1 Major element concentration for the Zhamugou iron deposit, Ziyang County(%)

	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总量
赋矿岩体	11ZMG4	45.42	3.76	14.06	14.18	0.19	6.73	7.09	3.37	1.42	0.68	2.75	99.65
	11ZMG5	44.15	3.5	13.5	14.82	0.2	8.11	8.38	2.71	1.08	0.64	2.73	99.82
	11ZMG7	42.42	5.55	13.17	16.04	0.2	5.83	9.92	2.89	0.67	0.53	2.15	99.37
	11ZMG8	42.26	5.58	12.3	17.03	0.22	6.15	9.07	2.53	1.37	0.61	2	99.12
矿石	11ZMG3-5	31.29	7.90	12.89	30.86	0.23	4.10	7.44	1.53	0.93	0.26	2.24	99.67
	11ZMG3-6	33.72	7.25	13.57	27.59	0.22	4.25	8.14	1.82	0.88	0.27	2.54	100.25
	11ZMG3-7	30.64	8.12	12.90	31.54	0.23	4.07	7.80	1.22	0.86	0.25	2.72	100.35

左右),而 TFe_2O_3 与 CaO 含量之和则大于 30%。

4.3 微量元素、稀土元素特征

考虑到微量元素受分离结晶作用和蚀变作用影响较弱,对柞木沟矿床内赋矿岩体及矿石的微量元素进行测试及标准化计算。稀土元素总体总量较低,轻稀土元素富集,轻重稀土存在明显的分异(赋矿岩体: $\Sigma\text{LREE} = 120.99\mu\text{g/g} \sim 159.95\mu\text{g/g}$, $\Sigma\text{HREE} = 19.31\mu\text{g/g} \sim 22.76\mu\text{g/g}$, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 6.18 \sim 7.09$; 矿石: $\Sigma\text{LREE} = 80.06\mu\text{g/g} \sim 92.88\mu\text{g/g}$, $\Sigma\text{HREE} = 11.49\mu\text{g/g} \sim 13.4\mu\text{g/g}$, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 6.91 \sim 6.97$),且轻稀土分异程度弱于重稀土分异(赋矿岩体: $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 1.99 \sim 2.36$; $\text{Gd}_\text{N}/\text{Lu}_\text{N} = 3.24 \sim 3.52$; 矿石: $\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N} = 2.25 \sim 2.30$; $\text{Gd}_\text{N}/\text{Lu}_\text{N} = 3.55 \sim 3.80$),在稀土元素球粒陨石标准化的配分曲线上(图 4),两者均呈明显右倾模式,赋矿辉绿岩相对矿石明显富集稀土元素,二者均呈现弱 Eu 正异常(赋矿岩体: $\delta\text{Eu} = 1.0 \sim 1.15$; 矿石 $\delta\text{Eu} = 1.28 \sim 1.33$),指示矿床内斜长石整体的结晶作用不明显,与辉绿岩为快速就位结晶的特征相一致。在微量元素及稀土元素标准化图解上(图 4),赋矿岩体及矿石配分曲线近于平行,且二者都表现为类 OIB 的配分曲线模式,暗示二者可能具有一致的岩浆来源,赋矿岩体呈现明显的 Ba、Ti 正异常,尤其是具有明显的 Ti 异常,表明具有一定的成矿物质基础。赋矿岩体 Sr 亏损,而矿石 Sr 正异常,则说明岩体内长石分离结晶程度较矿石明显。

岩体内 P 正异常,而矿石 P 负异常明显,指示矿石内部磷灰石分离结晶程度较岩体明显,与矿石内磷灰石含量较高的特征相一致。赋矿岩体相对矿石具有明显的 Zr 正异常,说明赋矿辉绿岩锆饱和度强于矿石。

5 讨论

5.1 岩浆成因及源区

矿区辉绿岩既是矿床的母岩又是围岩,矿体与赋矿岩体围岩呈渐变过渡状态,而且岩相学研究表明柞木沟矿床的赋矿辉绿岩与矿体在矿物组成方面具有明显的成因联系,主要表现为矿石矿物为赋矿辉绿岩的副矿物,而主要脉石矿物(辉石和长石)为赋矿辉绿岩的主要造岩矿物。赋矿岩体及矿石的微量元素及稀土配分曲线与典型 OIB 近于一致,指示二者具有相近的岩浆来源。区域岩浆在上侵过程中没有经历显著的地壳物质混染(张成立等,2002),其地球化学特征可以指示地幔源区的性质。矿床所有样品较低的 Th/Ce 比值(赋矿岩体: $0.040 \sim 0.044$; 矿石: $0.033 \sim 0.034$)相对于 MORB (0.016)和 OIB (0.052)提供了类似 OIB 的富集地幔源区的证据(Taylor and Mc Lennan,1981)。在 Nb/Th—Zr/Nb 图解和 Zr/Nb—Nb/Y 图解中(Condie,2005),赋矿岩体及矿石落于 HIMU、EMI 和 EMII 地幔混合区域(图 5),总体显示明显的富集地幔特征,指示二者可能为同一岩浆来源。矿床的地质特征以

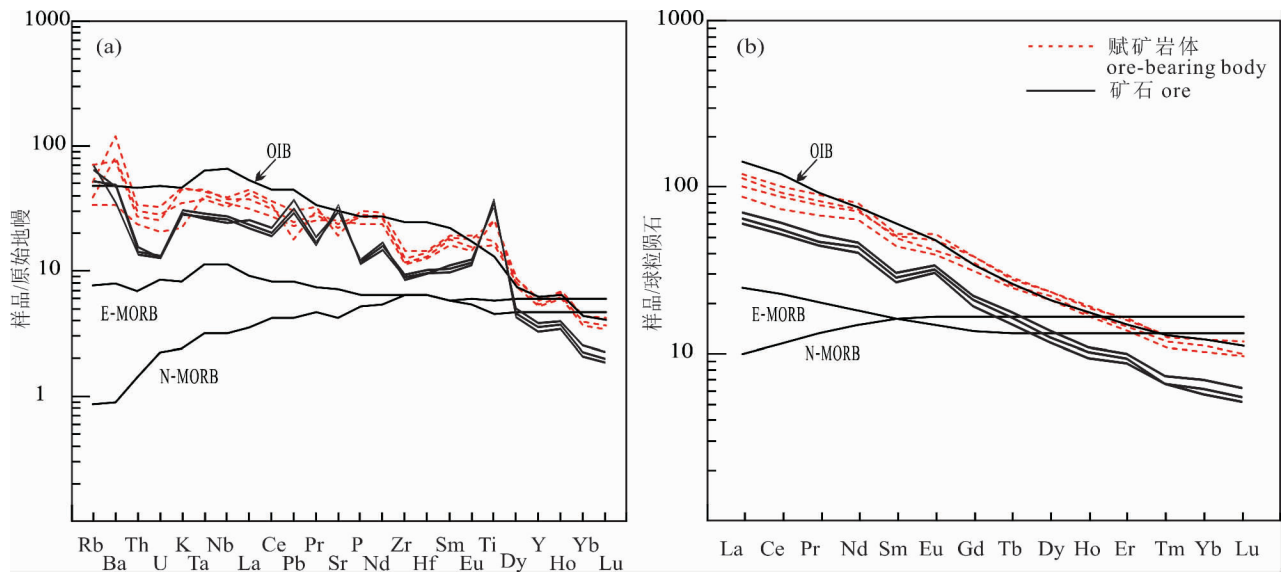


图 4 紫阳柞木沟铁矿床微量元素原始地幔标准化(a)及稀土元素球粒陨石标准化(b)图解

Fig. 4 Primitive mantle normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized rare earth element patterns of the Zhamugou iron deposit, Ziyang County (b). Normalization values and ocean island basalts are from Sun and McDonough (1989)

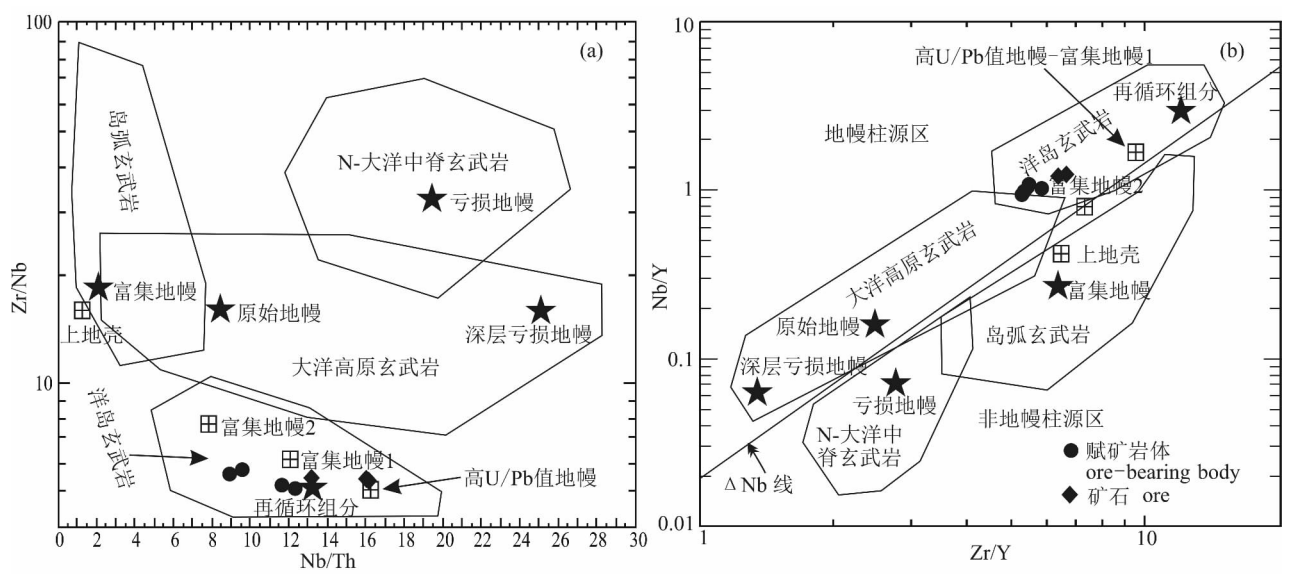


图 5 紫阳柞木沟矿床 Nb/ Th—Zr/Nb(a) 和 Zr/Y—Nb/Y(b) 图解 (据 Condie, 2005)
Fig. 5 Nb/ Th v s. Zr / Nb (a) and Zr/Y v s. Nb/Y (b) binary diagrams for Zhamugou iron deposit, Ziyang County (after Condie, 2005)

PM—原始地幔; UC— 上地壳; DM— 亏损地幔; HIMU— 高(U/Pb) 地幔源; EM1 和 EM2— 富集地幔; ARC— 弧相关玄武岩; N-MORB— 亏损大洋中脊玄武岩; DEP—深部亏损地幔; EN— 富集组分; REC— 循环组分
PM—primary mantle; UC— upper crust; DM— depleted mantle; HIMU— high mu (U/Pb) mantle source; EM1 和 EM2— enriched mantle; ARC— arc-related basalt; N-MORB— normal Mid-ocean basalt; DEP— deep depleted mantle; EN— enriched component; REC— recycled component

及二者岩石地球化学特征相似性指示矿区岩浆作用与成矿作用为同一岩浆作用下的产物。

微量元素蛛网图及稀土配分曲线样式显示类 OIB 地球化学特征,指示亏损的软流圈物质参与到地幔源区的演化,如果是单纯的软流圈地幔上涌并部分熔融引起镁铁质岩浆作用,其产物必然具有 MORB 型微量元素分布 (Salters and Stracke, 2004; Workman and Hart, 2005)。结合微量元素蛛网图及稀土配分曲线样式明显区别于 MORB 型曲线样式且地幔源区具有富集地幔混合的特征,对于矿床的地球化学特征合理的解释应该是存在着下部上涌的亏损软流圈与上部富集岩石圈地幔的混合,矿区岩体的地幔源区应该是由软流圈地幔与富集岩石圈地幔混合而成。同时考虑到 EM1 富集地幔端元主要是由洋脊玄武岩地幔与俯冲带入的洋壳(深海)沉积物熔融交代作用而形成的,而 EMII 地幔端元组分为古板块俯冲带入的陆源沉积物,进而通过壳幔流体交代作用而形成的 (Hart, 1988; Menzies, 1989; Weaver, 1991), HIMU 地幔端元则可能是由脱水洋壳循环作用形成的 (Salters et al., 1998; Woodhead, 1996)。综合研究区表现为 HIMU、EM1 和 EMII 地

幔混合富集地幔的特征,表明矿区岩浆活动可能与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。

5.2 矿床成因指示意义

与 Busheveld、攀枝花及河北大庙等典型典型岩浆分异矿床和矿浆贯入型铁矿相比,该矿区赋矿辉绿岩规模较小(出露面积约 0.5km²)、岩性单一、矿体产于岩体中部的暗色含矿带,而且从岩体的下盘到上盘都不具备典型岩浆分异矿床赋矿岩体(层状侵入体)所具有的韵律结构、堆晶结构及层状构造等诸多地质特征,基本排除其属于岩浆分异矿床的可能性。与同样产出于辉绿岩体内的新疆磁海铁矿床相比,柞木沟矿区岩石组合单一,而磁海铁矿的岩石组合为一套辉绿岩—辉长岩—橄榄辉长岩。同时磁海矿床的围岩除了黑云母辉绿岩外还有石榴子石透辉石矽卡岩,且围岩整体多呈矽卡岩化,主要表现为由辉绿岩侵入产生的矽卡岩—热液矿化,总体为岩浆期后热液交代充填成矿,与此相反,柞木沟矿区地层为一套炭质板岩及泥质灰岩,且地层与岩体接触部位未见矽卡岩化等明显的蚀变作用,不具备形成矽卡岩及热液交代的条件,使得其形成过程与磁海铁矿床亦不相同。

表 2 陕西紫阳柞木沟矿床微量元素组成 ($\mu\text{g/g}$)Table 2 Trace element concentration ($\mu\text{g/g}$) of Zhamugou mineral deposit, Ziyang, Shaanxi

	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Zr
岩石	11ZMG4	31.4	66.9	9.2	40.6	8.59	3.26	8.47	1.14	6.36	1.13	2.81	0.34	2.21	0.3	27.9	164
	11ZMG5	28.9	61.9	8.43	37.7	8.08	2.63	7.7	1.03	5.93	1.02	2.55	0.32	1.99	0.27	25.1	133
	11ZMG7	22.4	49.4	7.06	32.4	7.26	2.47	6.92	0.98	5.6	0.99	2.42	0.29	1.85	0.26	23.8	131
	11ZMG8	26.1	57.6	8.13	36.7	8.39	3.04	8.38	1.11	6.42	1.17	2.75	0.35	2.16	0.32	26.9	143
矿石	11ZMG3-5	16.3	36.3	4.74	21.7	4.67	1.98	4.61	0.66	3.4	0.62	1.66	0.18	1.12	0.15	16.4	106
	11ZMG3-6	17.7	39.8	5.22	23.1	4.97	2.09	4.88	0.71	3.74	0.66	1.77	0.2	1.27	0.17	17.7	96
	11ZMG3-7	15.2	34	4.5	20.1	4.37	1.89	4.23	0.6	3.18	0.57	1.55	0.18	1.04	0.14	15.1	101
	样品号	Hf	Li	V	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Nb	Cs	Ba	Ta	Pb
岩石	11ZMG4	4.63	30.7	336	19.8	117	50.3	82.2	61.2	22.3	33.2	415	28.4	0.77	852	1.83	2.17
	11ZMG5	4.1	32.1	329	20.2	196	55.7	107	64	21.3	25.5	512	23.7	1.4	580	1.58	1.28
	11ZMG7	3.98	18.9	505	29.8	5.85	53.6	52.9	90	20.8	21.9	540	25.6	1.62	240	1.7	1.64
	11ZMG8	4.35	18.9	504	31.2	5.02	56.8	46	62.2	21.9	45.9	482	27.3	2.51	549	1.85	1.77
矿石	11ZMG3-5	3.18	20.4	1352	23.2	11.3	120	41	66.2	33.8	41.1	636	19.7	6.07	331	1.19	2.26
	11ZMG3-6	2.97	17.4	1107	24.3	9.03	105	26.8	62.5	31.7	33.5	636	17.5	4.65	343	1.08	2.64
	11ZMG3-7	3	18.3	1339	22.4	10.4	126	39.8	70.3	34.1	44.2	714	18.6	7.42	245	1.12	2.08
	样品号	Th	U	REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$	δEu	Zr/Nb	Nb/Th	Nb/Y	Zr/Y	Rb/10	3 * Ta	La/Nb
岩石	11ZMG4	2.97	0.69	182.71	159.95	22.76	7.03	2.36	3.49	1.15	5.77	9.56	1.02	5.88	3.32	5.49	1.11
	11ZMG5	2.66	0.6	168.45	147.64	20.81	7.09	2.31	3.52	1	5.61	8.91	0.94	5.30	2.55	4.74	1.22
	11ZMG7	2.08	0.44	140.3	120.99	19.31	6.27	1.99	3.29	1.05	5.12	12.31	1.08	5.50	2.19	5.10	0.88
	11ZMG8	2.35	0.54	162.62	139.96	22.66	6.18	2.01	3.24	1.1	5.24	11.62	1.01	5.32	4.59	5.55	0.96
矿石	11ZMG3-5	1.22	0.28	98.09	85.69	12.4	6.91	2.25	3.80	1.29	5.38	16.15	1.20	6.46	4.11	3.57	0.83
	11ZMG3-6	1.33	0.27	106.28	92.88	13.4	6.93	2.30	3.55	1.28	5.49	13.16	0.99	5.42	3.35	3.24	1.01
	11ZMG3-7	1.16	0.27	91.55	80.06	11.49	6.97	2.25	3.73	1.33	5.43	16.03	1.23	6.69	4.42	3.36	0.82

表 2 陕西紫阳柞木沟矿床微量元素组成 (μg/g)

Table 2 Trace element concentration (μg/g) of Zhamugou mineral deposit, Ziyang, Shaanxi

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Zr
11ZMG4	31.4	66.9	9.2	40.6	8.59	3.26	8.47	1.14	6.36	1.13	2.81	0.34	2.21	0.3	27.9	164
11ZMG5	28.9	61.9	8.43	37.7	8.08	2.63	7.7	1.03	5.93	1.02	2.55	0.32	1.99	0.27	25.1	133
11ZMG7	22.4	49.4	7.06	32.4	7.26	2.47	6.92	0.98	5.6	0.99	2.42	0.29	1.85	0.26	23.8	131
11ZMG8	26.1	57.6	8.13	36.7	8.39	3.04	8.38	1.11	6.42	1.17	2.75	0.35	2.16	0.32	26.9	143
11ZMG3-5	16.3	36.3	4.74	21.7	4.67	1.98	4.61	0.66	3.4	0.62	1.66	0.18	1.12	0.15	16.4	106
11ZMG3-6	17.7	39.8	5.22	23.1	4.97	2.09	4.88	0.71	3.74	0.66	1.77	0.2	1.27	0.17	17.7	96
11ZMG3-7	15.2	34	4.5	20.1	4.37	1.89	4.23	0.6	3.18	0.57	1.55	0.18	1.04	0.14	15.1	101
样品号	Hf	Li	V	Se	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Nb	Cs	Ba	Ta	Pb
11ZMG4	4.63	30.7	336	19.8	117	50.3	82.2	61.2	22.3	33.2	415	28.4	0.77	852	1.83	2.17
11ZMG5	4.1	32.1	329	20.2	196	55.7	107	64	21.3	25.5	512	23.7	1.4	580	1.53	1.23
11ZMG7	3.98	18.9	505	29.8	5.85	53.6	52.9	90	20.8	21.9	540	25.6	1.62	240	1.7	1.64
11ZMG8	4.35	18.9	504	31.2	5.02	56.8	46	62.2	21.9	45.9	482	27.3	2.51	549	1.85	1.77
11ZMG3-5	3.18	20.4	1352	23.2	11.3	120	41	66.2	33.8	41.1	636	19.7	6.07	331	1.19	2.26
11ZMG3-6	2.97	17.4	1107	24.3	9.03	105	26.8	62.5	31.7	33.5	636	17.5	4.65	343	1.03	2.64
11ZMG3-7	3	18.3	1339	22.4	10.4	126	39.8	70.3	34.1	44.2	714	18.6	7.42	245	1.12	2.03
样品号	Ti	U	REE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Sm) _n	(Gd/Ln) _n	δE ₁	Zr/Nb	Nb/Tb	Nb/Y	Zr/Y	Rb/0	3*Ta	La/Nb
11ZMG4	2.97	0.69	132.71	159.95	22.76	7.03	2.36	3.49	1.15	5.77	9.56	1.02	5.88	3.32	5.49	1.11
11ZMG5	2.66	0.6	168.45	147.64	20.81	7.09	2.31	3.52	1	5.61	8.91	0.94	5.30	2.55	4.74	1.22
11ZMG7	2.08	0.44	140.3	120.99	19.31	6.27	1.99	3.29	1.05	5.12	12.31	1.08	5.50	2.19	5.10	0.83
11ZMG8	2.35	0.54	162.62	139.96	22.66	6.18	2.01	3.24	1.1	5.24	11.62	1.01	5.32	4.59	5.55	0.96
11ZMG3-5	1.22	0.28	98.09	85.69	12.4	6.91	2.25	3.80	1.29	5.38	16.15	1.20	6.46	4.11	3.57	0.83
11ZMG3-6	1.33	0.27	106.28	92.88	13.4	6.93	2.30	3.55	1.28	5.49	13.16	0.99	5.42	3.35	3.24	1.01
11ZMG3-7	1.16	0.27	91.55	80.06	11.49	6.97	2.25	3.73	1.33	5.43	16.03	1.23	6.69	4.42	3.36	0.82

如前所述,柞木沟矿床赋矿岩体岩浆活动与矿体的成矿作用为同一岩浆作用下的产物,而且钛磁铁矿和钛铁矿呈半自形晶颗粒且紧密共生,钛磁铁矿颗粒内部含有叶片状钛铁矿出溶(图 3f),指示其明显的岩浆成因。钛磁铁矿和钛铁矿粒度较小且呈密度均等的浸染状分布,未见明显定向性分布或沿裂隙充填的钛磁铁矿和钛铁矿,进一步排除了其热液成因的可能性。而且矿石的浸染状构造和显微镜下可见的含金属矿物的共结结构(图 3g)是正岩浆矿床所特有的结构构造,同时也是确定含矿流体通道的可靠岩石学标志(罗照华等,2010)。辉绿岩初始岩浆富水(以明显的含水矿物——角闪石为标志),具有析出含矿流体的条件,同时大量流体组分的存在能够有效降低岩浆的粘度和密度(Giordano and Dingwell, 2003; Hui and Zhang, 2007; Whittington et al., 2009),从而成为流体进一步注入的通道(罗照华等,2010)。考虑到矿区岩体规模中等,矿体产于辉绿岩床的中间部位,两侧辉绿岩围岩未见矿化的特征,合理的解释就是岩体边部因与地层相接触而快速固结,而岩体中部相对边部固结速度较慢,矿区早期辉绿岩初始岩浆析出的大量含矿流体组分又使得岩体中部熔融岩浆的粘度降低($\text{SiO}_2 = 42.26\% \sim 45.42\%$),为后期含矿流体进一步注入

提供了通道,而且结合矿物共结结构确定含矿流体通道的认识,进一步确定辉绿岩岩体中部应该为该矿区含矿流体注入的通道。考虑到辉石、长石等造岩矿物以及钛钛氧化物都形成于两个阶段,更为重要的是通过共生磁铁矿和钛铁矿矿物对计算的主成矿温度均明显低于岩浆中主要脉石矿物和早期矿石矿物的结晶温度近 300℃ (王坤明等,2014),进一步指示成矿过程中可能存在一期富铁质流体的注入。而热液蚀变与成矿作用关系表现为赋矿岩体规模较小,未有明显的围岩蚀变分带现象,蚀变类型与矿化的富集没有成因联系;矿石内部钛磁铁矿为岩浆成因,未见热液成因钛磁铁矿产出;后期热液作用导致脉石矿物和矿石矿物部分发生蚀变,表现为脉石矿物的绿泥石化、钠黝帘石化、阳起石化,钛磁铁矿的边部或裂隙被交代形成榍石,共同指示矿体内的热液蚀变作用与成矿作用无成因联系。综上所述,综合野外地质特征、铁钛氧化物产出状态、钛磁铁矿颗粒内叶片状钛铁矿出溶、含金属矿物的共结结构和浸染状构造以及岩石地球化学特征共同指示柞木沟矿床属于与辉绿岩相关的岩浆型矿床,同时结合矿体产出位置、矿石结构构造以及钛磁铁矿和钛铁矿形成于两个阶段,则暗示成矿过程中存在着一期富铁质流体的注入,并且成矿后期热液蚀变作用对成矿作用起着明显的破坏作用。

5.3 成矿构造环境及成矿过程探讨

鉴于微量元素受分离结晶作用和蚀变作用影响较弱,在判别构造环境方面更有优势,因此,尝试从

赋矿岩体及矿石微量元素角度进行矿区构造环境的判别。在 Zr/Y—Zr 图解中所有样品落于板内环境,然而 Pearce (1983) 提出大陆弧也可落于 Zr/Y—Zr 图的板内环境 (图 6a),同时邓晋福等 (2015a) 也强调这种情况的前提必须首先鉴别和确认样品本身为火山弧特征。但是,该区所有样品在 Nb/Th—Zr/Nb 和 Zr/Y—Nb/Y 图解 (图 5a、b) 中都没落于火山弧区域,基本排除了其具有火山弧特征的可能,而且在 La/Nb—La 图解中所有样品都落于洋岛玄武岩区域 (图 6b),因此,种种证据显示矿区赋矿岩体及矿石都形成于板内环境。目前岩浆铁矿床主要的产出环境主要为大陆裂解拉张环境 (王正允等,1982;李德慧等,1982;卢纪仁等,1988;宋谢炎等,2005;王玉往等,2013),具体细分为大陆裂谷、大陆边缘裂谷以及大火成岩省,而且矿床类型以岩浆分异型铁矿床 (代表的矿床主要有南非 Busheveld、中国攀枝花铁矿床) 和矿浆贯入型铁矿 (河北大庙铁矿) 最为典型。近年来研究表明在后碰撞结束 (或克拉通化) 环境下也产有岩浆铁矿床,主要代表为新疆磁海铁矿床等 (王玉往等,2005,2013),可能是受到地幔柱 (宋谢炎等,2001) 或地幔柱的远程力学效应影响 (Sharma, 1997)。

柞木沟矿床地质特征区别于 Busheveld、攀枝花等典型岩浆分异矿床和矿浆贯入型铁矿进而基本排除大陆裂谷、大陆边缘裂谷以及大火成岩省等构造环境的可能性。柞木沟矿床成因区别于新疆磁海铁矿床,而且区域上缺乏早古生代与地幔柱有关的沉

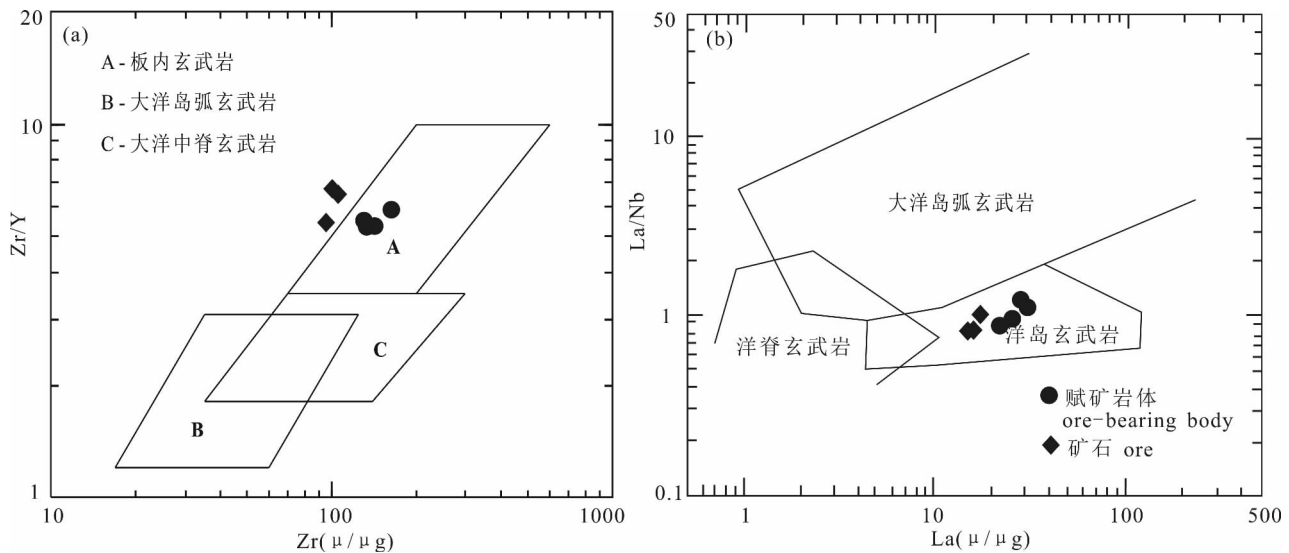


图 6 紫阳柞木沟铁矿床构造环境判别图解 (Pearce and Norry, 1979)

Fig. 6 The tectonic setting discrimination diagrams for Zhamugou iron deposit, Ziyang County (after Pearce and Norry, 1993)

积—岩浆—构造响应的记录(张欣,2010),使得柞木沟铁矿形成环境又区别于与地幔柱或地幔柱的远程力学效应影响有关的后碰撞结束(或克拉通化)环境。更为重要的是柞木沟矿床成矿时代早志留世(王坤明等,2014),矿区岩体形成于板内环境,矿区岩浆活动与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。同时结合前人提到的研究区北侧存在安康—平利古岛弧,同时岛弧北侧的古秦岭洋在志留纪时期发生了南向俯冲,此时的北大巴山地区为弧后盆地且发生了明显弧后拉张作用(王宗起等,2009)的认识,本文综合认为柞木沟矿床形成环境应该为与俯冲消减作用相关的弧后板内拉张环境。考虑到赋矿岩体岩浆作用与矿体的成矿作用为同一岩浆作用下的产物,且区域镁铁质岩体的形成环境同样为与俯冲相关的弧后拉张环境(Wang Kunming et al., 2015),二者相互验证,共同说明早志留纪古秦岭南向俯冲引起的北大巴山弧后拉张作用对区域成岩成矿作用的控制作用。

北大巴山地区早志留世弧后拉张作用导致矿区间下部幔源岩浆沿着断裂上涌,早期结晶出少量铁钛氧化物以及辉石、长石、角闪石等铁镁硅酸盐矿物,其中铁镁硅酸盐矿物包含铁钛氧化物形成典型的包含结构。随着拉张作用的加剧,下部富铁质岩浆随之沿断裂大规模上涌,随着温度降低,辉石、长石、角闪石等铁镁硅酸盐矿物才开始大量结晶。早期初始岩浆析出的流体对熔体的强相互作用可以降低熔体的黏度以及降低液相线和固相线温度,导致岩浆具有快速运动的能力,表现为与熔体耦合在一起形成熔体—流体流(罗照华,2011),而且快速上升的熔体—流体流具有更大的成矿潜力(罗照华等,2010)。随后,岩浆成矿系统在地壳浅部就位,岩浆与地层接触带迅速形成冷凝边,在岩浆体边部形成流体阻隔层,而岩体中部因为固结较慢和粘度较低,其作为含矿流体注入的通道,使得后续含矿流体从岩体中部进一步注入。鉴于岩浆体的体积较小,随着整个岩体从边缘向中部逐渐冷却固结,使得部分注入的富铁质流体被圈闭在岩浆体中部,同时发生强烈的相分离,进而导致铁钛氧化物的大规模结晶,分布于造岩矿物颗粒之间或内部。卸载成矿金属之后的无矿流体引起热液蚀变作用,早期发生阳起石化、钠长石化、钠黝帘石化、晚期发生绿泥石化,最后随着黄铁矿等低温硫化物结晶,最终完成该区的成矿作用。

6 结论

(1) 赋矿岩体岩性为辉绿岩,矿体赋存于岩体中部暗色含矿带内,二者产状一致,矿石矿物主要为钛磁铁矿、钛铁矿,脉石矿物主要为辉石、斜长石、含少量角闪石、黑云母、磷灰石、黄铁矿和黄铜矿,蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、钠长石、黝帘石和榍石。

(2) 赋矿辉绿岩与矿石的岩石及矿物组成相似,微量元素、稀土元素及地幔源区特征相近,共同指示二者为同源岩浆作用的产物。地幔源区组成指示矿区岩浆活动可能与俯冲消减作用存在着内在的成因联系。

(3) 矿床地质特征、矿石结构构造特征以及地化特征共同指示柞木沟矿床属于岩浆型铁矿床,矿床形成构造环境为弧后板内拉张环境,早志留世古秦岭南向俯冲引起的弧后拉张作用导致下部岩浆上涌进而完成该区成矿作用。

注 释 / Notes

- ① 高建利,史兴智,苏保龙. 2008. 陕西省紫阳县桃园一大柞木沟钛磁铁矿详查地质报告. 陕西: 陕西泰升达矿业有限公司, 1~40.
- ② 哉仲和,朱祖成,马仲林. 1975. 紫阳铁佛大柞木沟钛磁铁矿详查评价报告及桃园钛磁铁矿普查报告. 陕西: 陕西省地质局: 1~20.

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴蒙. 2015a. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,马帅,姚图. 2015b. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61(3): 473~485.
- 黄月华,任有祥,夏林圻,夏祖春,张诚. 1992. 北大巴山古生代双模式火成岩套——以高滩辉绿岩和蒿坪粗面岩为例. 岩石学报, 8(3): 243~256.
- 李方舟. 2012. 陕西省紫阳县朱溪河钛磁铁矿地质特征. 陕西地质, 30(1): 35~40.
- 李夫杰. 2009. 陕南镇巴东部地区基性岩墙群和正长斑岩脉的岩石地球化学特征及其构造意义. 导师: 裴先治. 西安: 长安大学硕士学位论文, 1~64.
- 李德惠,茅燕石. 1982. 四川攀西地区含钒钛磁铁矿层状侵入体的韵律层及形成机理. 矿物岩石, 2(1): 29~41.
- 刘林. 2010. 岚皋县官元钛矿地质特征及找矿前景. 硅谷, (19): 130.
- 刘林,高建利,尚小社. 2012. 陕西铁佛寺钛磁铁矿地质特征及找矿前景. 矿产勘查, 3(5): 638~643.
- 刘林,杨旭周. 2010. 紫阳县朱溪河钛磁铁矿地质特征及成因. 矿业

- 工程研究, 25(4): 51~54.
- 卢纪仁, 张承信, 张光第, 顾光先. 1988. 攀西地区钒钛磁铁矿矿床的成因类型. 矿床地质, 7(1): 1~13.
- 罗照华, 卢欣祥, 许俊玉, 刘翠, 李德东. 2010. 成矿侵入体的岩石学标志. 岩石学报, 26(8): 2247~2254.
- 罗照华. 2011. 流体—熔体强相互作用的成矿功能. 矿物学报, 31(增刊): 503~504.
- 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 卢纪仁, 汪云亮, 张成江, 李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限. 地质学报, 75(4): 498~506.
- 宋谢炎, 张成江, 胡瑞忠, 钟宏, 周美夫, 马润则, 李佑国. 2005. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系. 矿物岩石学杂志, 25(4): 35~44.
- 王存智, 杨坤光, 徐扬, 程万强. 2009. 北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义. 地质科技情报, 4(2): 82~84.
- 王刚. 2014. 北大巴山紫阳—岚皋地区古生代火山岩浆事件与中生代成矿作用. 导师: 王宗起. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~227.
- 王坤明, 王宗起, 张英利, 王刚, 武显东. 2014. 陕西柞木沟铁矿床矿物学、成矿年代学特征及对矿床成因的指示意义. 地学前缘, 21(4): 235~254.
- 王玉往, 王京彬, 李德东, 龙灵力, 唐萍芝, 石煜, 高一菡. 2013. 新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系. 矿床地质, 32(2): 223~243.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 秦全新, 彭晓明, 惠卫东. 2005. 新疆尾亚钒钛磁铁矿——一个岩浆分异—贯入—热液型复成因矿床. 矿床地质, 24(4): 349~359.
- 王正允. 1982. 四川攀枝花含钒钛磁铁矿层状辉长岩体的岩石学特征及其成因初探. 矿物岩石, 02(1): 49~64.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 夏祖春, 夏林圻, 张诚. 1992. 北大巴山碱质基性—超基性潜火山杂岩的辉石矿物研究. 西北地质科学, 13(2): 32~30.
- 晏云翔. 2005. 陕西紫阳—岚皋地区碱—基性岩墙群的岩石地球化学及 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究. 导师: 张成立. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~50.
- 张成立, 高山, 张国伟, 柳小明, 于在平. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义. 中国科学(D辑: 地球科学), 32(10): 819~828.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 张国伟, 晏云翔, 罗静兰, 罗金海. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr—Nd—Pb 同位素证据. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(7): 857~865.
- 张欣. 2010. 南秦岭紫阳—镇巴地区基性侵入体动力学机制及地质意义讨论. 导师: 徐学义. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~67.
- 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 曹亮, 崔森, 赵武强, 夏杰, 王磊. 2011. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征. 中国地质, 38(2): 282~291.
- Condie K C. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes. Lithos, 79: 491~504.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015a&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion, Geological Review, 61(4): 717~734.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015b&. magmatic arc and ocean—continent transition: discussion, Geological Review, 61(3): 473~484.
- Giordano D, Dingwell D B. 2003. Viscosity of hydrous Etna basalt: Implications for Plinian-style basaltic eruptions. Bulletin of Volcanology, 65(1): 8~14.
- Hart S R. 1988. Heterogeneous mantle domains: signature genesis and mining chronologies. Earth Planet Science Letters, 90: 273~296.
- Huang Yuehua, Ren Youxiang, Xia Linqi, Xia Zuchun, and Zhang Cheng. 1992&. Bi-modal volcanic rock in North Daba mountain—diabase in Gaotan and trachyte in Haoping. Acta Petrologica Sinica, 8(3): 243~256.
- Hui H J, Zhang Y X. 2007. Toward a general viscosity equation for natural anhydrous and hydrous silicate melts. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(2): 403~416.
- Li Dehui, Mao Yanshi. 1982#. The cyclothem and formation mechanism for layer intrusion Vanadium-bearing titanium magnetite in Panxi district in Sichuan province. J. Mineral Petrol., 2(1): 29~41.
- Li Fangzhou. 2012&. Geology of Titanomagnetite deposit in Zhuxihe, Ziyang county of Shaanxi. Geology of Shaanxi, 30(1): 35~40.
- Li Fujie. 2009&. The Rock Geochemistry Characteristics and Tectonic Implications of Mafic Dyke Swarms and Syenite Porphyry Veins in Zhenba Eastern Area, The South of Shaanxi Province. Tutor: Pei Xianzhi. Xi'an: Chang'an University Master's degree paper, 1~64.
- Liu Lin. 2010#. The geological feature and prospect of Guanyuan Titanium deposit in Langao county of Shaanxi. Silicon Valley, (19): 130.
- Liu Lin, Gao Jianli, Shang Xiaoshe. 2012&. Geological characteristics of Tieshi titanium—magnetite deposit and prospecting potential, Shaanxi. Mineral Exploration, 3(5): 638~643.
- Liu Lin, Yang Xuzhou. 2012&. Geological characteristics and genesis of titanomagnetite in Zhuxihe of Ziyang County. Mineral Engineering Research, 25(4): 51~54.
- Lu Jiren, Zhang Chengxin, Zhang Guangdi, Gu Guangguang. 1988&. Genetic type of V—Ti magnetite deposits in Panzhihua—Xicang area. Mineral Deposit, 7(1): 1~13.
- Luo Zhaohua. 2011#. Metallogenic Function of Fluid—Melt Interaction. Acta Mineralogica Sinica, 31(Suppl.): 503~504.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Xu Junyu, Liu Cui, Li Dedong. 2010&. Petrographic indicators of the ore-bearing intrusions. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2247~2254.
- Menzies M A. 1989. Cratonic, circum-cratonic and oceanic mantle domains beneath the western USA. J. Geophys. Res., 94(B6): 7899~7915.
- Perace J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contrib. Mineral. Petrol., 69: 33~47.
- Perace J A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magmatogenesis at active continental margin. In: Hawkesworth C J, Norry M J. eds. Continental Basalts and Mantle Xenolites. Nantwich: Shiva Publishing Limited: 230~249.
- Salters V J M, Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle. Geochim. Geophys. Geosyst., 5: Q05004.
- Salters V J M, White W M. 1998. Hf isotope constrains on mantle evolution. Chemistry Geology, 145: 447~460.
- Sharma M A. 1997. Siberian traps. In: Mahoney J J. ed. Large Igneous

- Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. American Geophysical Union, Geophysical Monography 100: 273 ~ 295.
- Song Xieyan, Hou Zengqian, Cao Zhimin, Lu Jiren Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Li Youguo. 2001&. Geochemical Characteristics and Period of the Emei Igneous Province. *Acta Geologica Sinica*, 75 (4): 498 ~ 506.
- Song Xieyan, Zhang Chengjiang, Hu Ruizhong, Zhong Hong, Zhou Meifu, Ma Runze, Li Youguo. 2005&. Genetic Links of Magmatic Deposits in the Emeishan Large Igneous Province with Dynamics of Mantle Plume. *J. Mineral Petrol.*, 25(4): 35 ~ 44.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J. eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth elements evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, A301: 381 ~ 399.
- Wang Cunzhi, Yang Kunguang, Xu Yang, Cheng Wanqiang. 2009&. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of basic dike swarms in North Daba mountains and its tectonic significance. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 82 ~ 84.
- Wang Gang. 2014&. Metallogeny of the Mesozoic and Paleozoic volcanic igneous event in Ziyang - Langao areas, North Daba Mountain. Tutor: Wang Zongqi. Beijing: China University of Geoscience (Beijing) Doctor's degree paper: 1 ~ 227.
- Wang Kunming, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Wang Gang. 2015. Geochronology and Geochemistry of Mafic Rock in the Xuhe, Shaanxi, China: Implications on Petrogenesis and Mantle dynamics. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 187 ~ 202.
- Wang Kunming, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Wang Gang, Wu Yudong. 2014&. Characteristics of mineralogy, geochronology and implications for ore-forming mechanism of Zhamugou mineral deposit in Shaanxi Province. *Earth Science Frontiers*, 21(4): 235 ~ 254.
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Li Dedong, Long Lingli, Tang Pingzhi, Shi Yu, Gao Yihan. 2013&. Types, temporal-spatial distribution and metallogenic lineage of ore deposits related to mantle-derived magma in northern Xinjiang. *Mineral Deposit*, 32(2): 223 ~ 243.
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Qin Quanxin, Peng Xiaoming, Hui Weidong. 2005&. Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit in Xinjiang: A polygenetic magmatic differentiation-magmatic injection-magmatic hydrothermal deposit. *Mineral Deposit*, 24(4): 349 ~ 359.
- Wang Zhengyun. 1982 #. Petrological characteristics and genetic discussion for Vanadium titanium magnetite-bearing layer gabbro rock body in Panzhihua, Sichuan province. *J. Mineral Petrol.*, 2 (1): 49 ~ 64.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Junlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin and Xiang Zhongjin, 2009&. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527 ~ 1546.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letter*, 104: 381 ~ 397.
- Whittington A G, Hellwig B M, Behrens H, Joachim B, Stechern A and Vetere F. 2009. The viscosity of hydrous dacitic liquids: Implications for the rheology of evolving silicic magmas. *Bulletin of Volcanology*, 71(2): 185 ~ 199.
- Woodhead J D. 1996. Extreme HIMU in an oceanic setting: the geochemistry of Mangaia Island (Polynesia) and temporal evolution the Cook-Austral hotspot. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72: 1 ~ 19.
- Workman R K, Hart S R. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth Planetary Science Letters*, 231: 53 ~ 72.
- Xia Zucun, Xia Linqi, and Zhang Cheng. 1992&. The study of pyroxene minerals of alkali-basic-ultrabasic subvolcanic complex from North Daba mountain. *Northwest Geoscience*, 13(2): 32 ~ 30.
- Yan Yunxiang. 2005&. Research on geochemistry and Sr, Nd, Pb isotope of the Basic Dyke Swarms in Ziyang-Langao area, Shaanxi province. Tutor: Zhang Chengli. Xi'an: Chang'an University Master's degree paper: 1 ~ 50.
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, Yu Zaiping. 2002&. Geochemistry and significance of the Early Proterozoic alkaline mafic dyke in Qinling. *Science in China (Series D: Geoscience)*, 32(10): 819 ~ 829.
- Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan Honglin, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, Luo Jinglan, and Luo Jinhai. 2007&. Characteristics of the mantle in Early Paleozoic: from the Sr-Nd-Pb evidence of the mafic-ultramafic dyke and volcanic rock. *Science in China (Series D: Geoscience)*, 37(7): 857 ~ 865.
- Zhang Xin, 2010&. The dynamic mechanism and geological significance of mafic intrusion in the Ziyang-Zhenba area, South Qinling. Tutor: Xu Xueyi. Xi'an: Chang'an University Master's degree paper: 1 ~ 67.
- Zou Xianwu, Duan Qifa, Tang Chaoyang, Cao Liang, Cui Sen, Zhao Wuqiang, Xia Jie, Wang Lei. 2011&. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithogeochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba Mountain. *Geology in China*, 38(2): 282 ~ 291.

Petrochemical Characteristics and Its Implication for Metallogeny of Zhamugou Iron Deposit, Ziyang County, Shaanxi Province

WANG Kunming, WANG Zongqi, ZHANG Yingli, WANG Gang, WU Yudong

MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China

Objectivest: The Zhamugou deposit located in center of Daba Mountain, and the ore-bearing body is diabase. Achievements were mainly on lithoface and geological feature of Zhamugou deposit. Its magma activity and tectonic environments are not understood. Base on the geological feature of deposit, we focus on the geochemistry analysis of ore-bearing body and ore to evaluate magma source and tectonic environments of Zhamugou deposit.

Methods: Whole rock geochemistry analysis was conducted on the ore-bearing diabase and ore samples at the Analytical Laboratory, Beijing Research Institute of Uranium Geology (ALBRIUG). The samples were crushed and then pulverized in an agate mill to fit through a 200-mesh screen. Whole rock major elements were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) on fused glass beads, and the FeO content was analyzed by the wet chemical method. Trace elements were analyzed by the Finnigan MAT high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometer (HR-ICPMS). Approximately 50 mg of powder from each sample was dissolved in high-pressure Teflon bombs using a HF + HNO₃ mixture. An internal standard solution containing single-element rhodium was used for monitoring signal drift during ion counting. Within-run analytical precision for most elements was generally better than 2% ~ 5%.

Results: Ore-bearing diabase and ore have similar mineral composition, and have similar trace elements, rare earth and mantle source, indicating similar magma source. Mantle source for ore-bearing diabase and ore should be mixed by the asthenosphere and enriched lithospheric mantle, and indicating magma activity for deposit maybe have potential relation to subduction. The geological features of deposit, structure and formation of ore, and geochemistry features, all indicating the Zhamugou iron deposit belong to the magma-type mineral deposit.

Conclusions: Comprehensive geochemistry analysis has been successfully indicate ore-bearing diabase and ore have similar magma source and product of identical original magma. The tectonic environment of deposit which result from extension of the back-arc basin related to subduction, the extension of the back-arc basin cause the uplift of magma and achieve the metallogenesis.

Keywords: Southern Qinling, North Daba Mountains, Zhamugou iron deposit, diabase

Acknowledgements: This work is granted by China State Geological Investigation Program (Grant No. 12120114009401; DD20160176); the Natural Sciences Foundation of China (Grant No. 41302080), and the Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes (Grant No. K1313).

First author: WANG Kunming, male, born in 1984, Postdoctor, Major in mineral resource prospecting and exploration. Address: No. 26, Baiwanzhuang Street, Xicheng District, Beijing; post code: 100037. Email: kunming12345678@163.com

Corresponding author: WANG Zongqi, male, born in 1960. Professor. Mainly engaged in tectonics and metallogenesis research. Email: kcwzq@vip.sina.com

Manuscript received on: 2015-09-01; Accepted on: 2016-05-23; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.04.004