

张招崇, 柴凤梅, 谢秋红. 热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 367-379.
Zhang Zhaochong, Chai Fengmei, Xie Qiu hong. High-angle subduction in a thermal structure with warm mantle-cool crust: Formation of submarine volcanics-hosted iron deposits[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 367-379(in Chinese with English abstract).

热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成

张招崇¹ 柴凤梅² 谢秋红¹

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 新疆大学, 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要:海相火山岩型铁矿指的是产于海相火山-沉积岩系的铁矿床,是中国一种重要的铁矿类型,分布于中国西部。近年来该类型铁矿找矿取得了重大突破,并已引起广泛的关注。该类型铁矿形成于与俯冲有关的活动大陆边缘,但为什么只有少数活动大陆边缘能形成海相火山岩型铁矿的机理尚不清楚,严重制约了该类型铁矿今后的找矿。过去对含矿火山岩以及矿石的同位素测年结果显示,铁矿化与火山作用同期,表明铁矿的形成与海底火山作用密切相关。对不同地区的含矿火山岩的研究表明,含矿火山岩为一套连续演化的拉斑-钙碱性系列玄武岩-玄武安山岩-安山岩-英安岩-流纹岩,具有 Nb、Ta 和 Ti 负异常的岛弧地球化学信号以及正的 ϵ_{Nd} 值。岩石地球化学特征指示了岩浆起源于软流圈地幔,并在上升过程中经历了地壳岩浆房的分离结晶作用。上述特征表明,地幔发生部分熔融,而俯冲的洋壳并不发生部分熔融,因此俯冲带的热结构是“热幔-冷壳”。考虑到该类型铁矿产于大陆边缘的海相环境,推测其为大洋岩石圈高角度俯冲作用的结果。“热幔-冷壳”背景下的高角度俯冲模式可以很好地解释海相火山岩型铁矿总的特点及其形成机制,如早期高盐度岩浆热液的形成与挤压背景下岩浆房内岩浆的分离结晶作用有关,而成矿阶段岩浆热液与海水的混合热液是由于在伸展背景下岩浆流体释放后与下渗海水混合的结果。不仅如此,该模式同样很好地解释了为什么该类型铁矿很少与斑岩铜矿产于同一大陆弧,以及即使在一些特殊条件下两者同时出现在一个弧中,为什么海相火山岩型铁矿总是分布在大陆弧靠近大洋一侧,而斑岩铜矿则出现在大陆弧的主体位置。

关键词:海相火山岩型铁矿;高角度俯冲;俯冲带热结构;岩浆源区;矿床成因

中图分类号:P611;P618.31 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)02-0367-13

High-angle subduction in a thermal structure with warm mantle-cool crust: Formation of submarine volcanics-hosted iron deposits

ZHANG Zhao-chong¹, CHAI Feng-mei², XIE Qiu-hong¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

收稿日期:2016-02-29;改回日期:2016-03-09

基金项目:国家“973”计划项目(2012CB416806)资助。

作者简介:张招崇,男,1965年生,教授,博士生导师,从事岩浆岩岩石学以及相关金属矿床的研究;E-mail: zczhang@cugb.edu.cn。

2. *Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China*)

Abstract: Submarine volcanics-hosted iron deposits refer to those that are hosted in submarine volcanic-sedimentary succession. They are one of the most important types of iron deposits in China. Almost all of these deposits are distributed in western China, and have received much attention in recent years. Most researchers consider them to be formed in an active continental margin. However, it is still poorly understood why these iron deposits were formed in minor active continental margins. This key issue is crucial to the prospecting for this type of iron deposits in future. The previous isotopic dating shows that iron mineralization is coeval with the ore-bearing volcanic rocks, which suggests that the iron deposits are genetically related to submarine volcanism. Studies of the ore-bearing volcanic rocks show that they are a succession of tholeiitic to calc-alkaline basalt-basaltic andesite-andesite-dacite-rhyolite association with arc-like geochemical signature of negative Nb, Ta and Ti anomalies coupled with positive ϵ_{Nd} values, which implies that the primary magmas were derived from asthenospheric mantle, and experienced extensive crystal fractionation within the crust-level magma chamber. The above geochemical characteristics reflect partial melting of the mantle with no involvement of oceanic crust, which suggests a thermal structure of warm mantle-cool crust in the subduction zone. Considering the scenario that the iron deposits occur in submarine volcanic rocks in active continental margin, the authors hold that they resulted from high-angle subduction of oceanic lithosphere. The general characteristics and genesis of the submarine volcanics-hosted iron deposits can be plausibly interpreted by this thermal structure model. The formation of the early stage of high-salinity magmatic fluids was correlated to crystal fractionation in the magma chamber in a compressional setting, whereas the magmatic fluids mixed with sea water can be attributed to the releasing of magmatic fluids in an extensional setting. Furthermore, this model can also explain why submarine volcanics-hosted iron deposits are not associated with porphyry Cu deposits in one continental arc, and even if they occur in one continental arc in some special backgrounds, the submarine volcanics-hosted iron deposits are always located on the margin of the arc, whereas the porphyry Cu deposits are developed in the main arc.

Key words: submarine volcanics-hosted iron deposits; thermal structure in subduction zone; source of magma; genesis of iron deposits

About the first author: ZHANG Zhao-chong, male, born in 1965, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of igneous petrology and metallogeny of ore deposits; E-mail: zczhang@cugb.edu.cn.

Fund support: Supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB416806).

海相火山岩型铁矿在国外的文献中很少被提及,只有 Dill (2010)在矿床分类中对少数该类矿床进行过简单的描述^[1],但未论及其成矿地质背景和成矿机制。然而,近10年的铁矿找矿勘查资料表明,海相火山岩型铁矿是中国一种重要的铁矿类型。该类型铁矿虽然目前占铁矿的比例较小(图1),但近年来在新疆西天山阿吾拉勒地区找矿取得了重大突破,相继发现了备战、查岗诺尔、智博和敦德等大型矿床以及其他一系列中小型矿床,为中国铁矿资源做出了重要贡献。这些铁矿不仅规模大,而且富铁矿石(TFe>50%)占的比例大,显示出巨大的找矿潜力^[2-3]。众所周知,阐明矿床的成矿地质背景是评价矿床成矿潜力以及指导今后该类型矿床找矿方向的关键。目前许多学者通过对含矿火山岩的地球化学研究,认为该类矿床形成于俯冲背景

下的大陆弧环境^[3-18](仅有少数学者认为其形成于弧后盆地环境^[19])。那么,这样就自然引出一个重要问题,为什么全球绝大多数大陆弧边缘没有形成海相火山岩型铁矿,而是形成斑岩型矿床或者矽卡岩型矿床?海相火山岩型铁矿的形成是否需要一个特殊的深部动力学过程?本文拟通过已有资料的综合研究,揭示海相火山岩型铁矿形成的构造环境和深部动力学过程,以期为该类型铁矿的找矿提供理论依据。

1 海相火山岩型铁矿的时空分布

总体上,海相火山岩型铁矿的数量较少,并且全部集中在中国西部,主要矿集区有西天山的阿吾拉勒、东天山、东准噶尔北缘、阿尔泰山南缘、阿尔金山东段的喀腊大湾地区^[12, 20]、扬子板块的西南缘

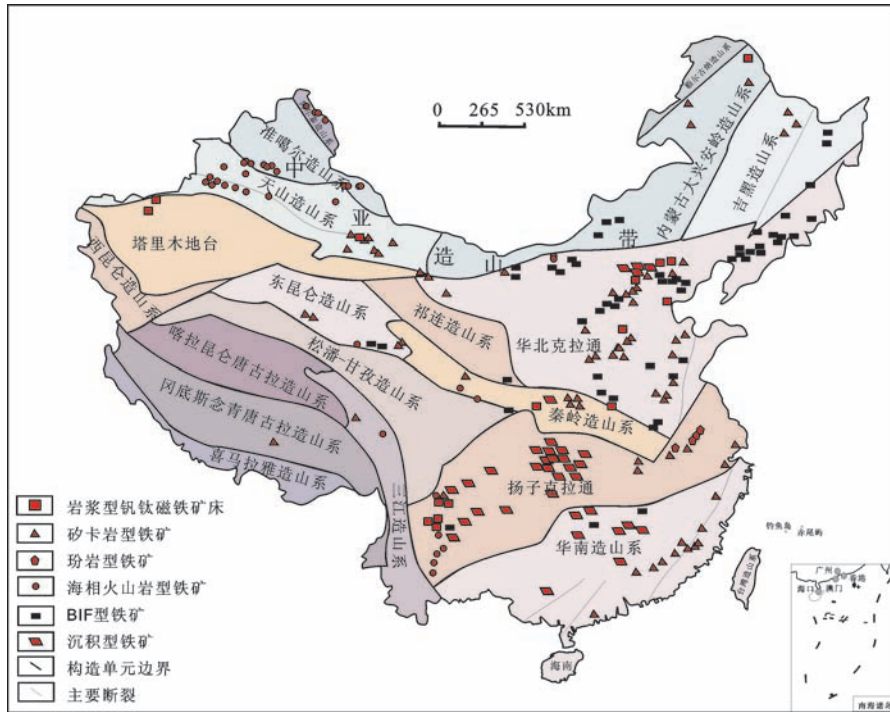


图1 中国主要类型铁矿的分布
(据[3]及其所引参考文献修改)

Fig.1 Distribution of major types of iron deposits in China (modified after [3] and references therein)

(大红山和鹅头厂)^[21-22],个别分布在青海的开心岭地区^[23]。其中大型矿床除了前述的西天山阿吾拉勒带的备战等4个铁矿外,还有阿尔泰山南缘蒙库铁矿^[16-17,24]和扬子板块西南缘的大红山铁矿^[21]。

含矿火山岩的时代除了扬子板块西南缘的铁矿形成于中元古代以及阿尔金山迪木那里克铁矿赋矿地层形成于新元古代(约623 Ma)^[25]外,其他地区全部形成于古生代,而且基本上都为晚古生代:阿尔泰山南缘的蒙库铁矿和阿巴宫铁矿的围岩康布铁堡组流纹岩为412~407 Ma^[26-27];东准噶尔北缘的乔夏哈拉和老山口铁矿的围岩北塔山组火山岩年龄为380 Ma^[28];西天山铁矿和东天山铁矿围岩的火山岩基本上为石炭纪,如西天山备战为329 Ma^[29],查岗诺尔为302 Ma^[5]和321 Ma^[7],智博为300 Ma^[5];东天山的雅满苏、红云滩和百灵山铁矿的围岩雅满苏组火山岩为334~324 Ma^[30]、沙泉子铁矿围岩土古土布拉克组火山岩为327~321 Ma^[15];青海开心岭地区为二叠纪^[23]。总体上,中亚造山带从北向南,由阿尔泰山南缘到东准噶尔北缘再到西天山和

东天山,时代由老变新,由早泥盆世→中泥盆世→早石炭世晚期—晚石炭世(图2),基本上和相应地区的俯冲作用时间一致^[31]。

2 海相火山岩型铁矿的基本特征

海相火山岩型铁矿产于海相火山-沉积岩系中,矿体的围岩不受岩性限制,既可以产在基性-中性-酸性的熔岩中,也可以产在相应的火山碎屑岩中,甚至可以产在火山沉积岩或沉积岩中;矿体的形态多样,一般有脉状(如西天山备战)、层状、似层状、透镜状(查岗诺尔和智博)、板状、条带状(西天山莫托萨拉)^[2],总体上以层状、似层状和透镜状为主,在靠近火山口裂隙发育处,矿体可以呈脉状,在远离火山口向沉积岩过渡的低洼处,一般呈层状和条带状,而在火山斜坡处则呈似层状和透镜状。层状、似层状和透镜状矿体往往和围岩整合接触。含铁矿物除了向沉积岩过渡的铁矿(如西天山式可布台、松湖以及莫托萨拉)主要为赤铁矿以及少量的镜铁矿和菱铁矿外,其他矿床均为磁铁矿。

①柴凤梅,刘锋,张志欣,等.东天山铁铜多金属矿床综合研究报告[R].2015:1-437.

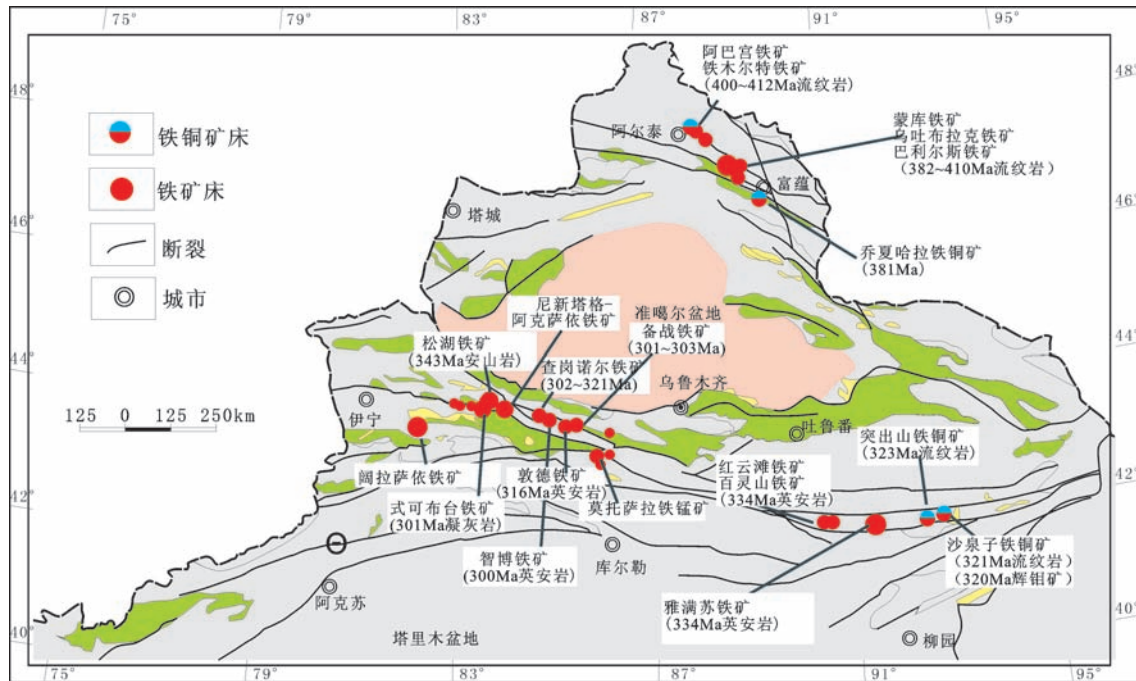


图2 新疆海相火山岩型铁矿的分布

年龄数据出处:阿巴宫和铁木尔特^[27,32];蒙库、乌吐布拉克和巴利尔斯铁矿^[17,26,33];乔夏哈拉^[28,34];沙泉子^[15];突出山^①;雅满苏^[30];红云滩、百灵山^②;备战^[35];智博^[5];查岗诺尔^[5,7];式可布台^[36];松湖^[13];敦德^[8]

Fig. 2 Distribution of submarine volcanics-hosted iron deposits in Xinjiang

Sources of age data: Abagong and Timuerte^[27,32]; Mngku, Wutubulak and Baliersi^[17,26]; Qiaoxiahala^[28,34]; Shaquanzi^[15]; Tuchushan^①; Yamansu^[30]; Hongyuntai^②; Bailingshan^②; Beizhan^[35]; Zhibo^[5]; Changanuoer^[5,7]; Shikebutai^[36]; Songhu^[13]; Dunde^[8]

矿床围岩火山岩的岩相与蚀变和矿体形态有一定相关性。熔岩围岩蚀变强,以脉状矿体或层状为主;熔岩和火山碎屑岩互层围岩蚀变强,以透镜状-似层状矿体为主;细火山碎屑岩为主的围岩蚀变较强,层状-似层状矿体为主;火山沉积岩的基本无蚀变,主要为层状矿体和条带状矿体(发育硅质条带)。

围岩蚀变和矿化过程总体上显示出相似的特征,从早到晚往往可以划分为钠长石化(少数出现钾长石化)、矽卡岩化、湿矽卡岩化或退化蚀变(绿泥石化和绿帘石化为主)、硫化物矿化以及石英-碳酸盐化,虽然磁铁矿可以出现在多阶段,并且出现晚阶段磁铁矿交代早阶段磁铁矿现象,但铁矿石主要形成于湿矽卡岩化阶段。成矿阶段总体上与传统的矽卡岩铁矿的矿化蚀变相似,因此有的学者将其归为矽卡岩类^[6,16-17,24]。另外,不同矿床的流体包

裹体研究也显示出与矽卡岩铁矿的相似性,成矿由早期到晚期:温度由高到低,盐度由高到低,成矿流体早期以岩浆水为主,晚期海水占的比例增大^[4,6,8]。

与传统的矽卡岩铁矿不同的是,海相火山岩型铁矿虽然也广泛发育矽卡岩化,但是矿体和矽卡岩并不产在中酸性岩体和碳酸盐岩的接触带。矿床地质特征表明,铁矿化与矿区出露的岩体并不存在成因联系,因此有些学者并不认同其属于矽卡岩型铁矿^[3,18,37]。最近对矿石或者与铁矿化密切相关的矽卡岩的同位素测年结果表明,铁矿与海相火山岩基本同期,如东天山雅满苏铁矿密切相关的矽卡岩锆石年龄为323.47 Ma,与其围岩年龄324.4 Ma基本一致^[30];西天山查岗诺尔铁矿的矽卡岩的石榴子石Sm-Nd等时线年龄为316.6 Ma^[38],与其围岩流纹岩的锆石年龄321.2 Ma^[7]在误差范围内基本一致;笔者最近获得了云南大红山铁矿的围岩玄武岩的

①柴凤梅,刘锋,张志欣,等.东天山铁铜多金属矿床综合研究报告[R].2015:1-437.

②张志欣.新疆阿尔泰山南缘乌吐布拉克铁矿床成矿机制研究[D].导师:杨富全.中国地质科学院矿产资源研究所硕士学位论文,2011.

锆石 U-Pb 年龄为约 2052 Ma, 钠长石化岩石的年龄为约 1961 Ma(未发表数据), 考虑到年龄较老的岩石测年结果误差相对较大这一特点, 认为玄武岩和钠长石化的年龄基本一致。另外, 笔者获得切穿矿体的辉绿岩锆石年龄为 1721 Ma 也间接地验证了测年结果。虽然 Wan et al. (2012) 测定的蒙库铁矿的热液锆石年龄为 250 Ma^[39] 以及杨富全等 (2011) 测得其中辉钼矿的 Re-Os 年龄为 262 Ma^[40], 与围岩变质流纹岩的 404 Ma^[34, 39] 相差甚大, 但是杨富全等最近测定的热液锆石年龄为 394 Ma (305 项目结题报告), 基本上与围岩的年龄接近。上述测年结果表明, 矿石与火山岩的时代一致, 由此也说明铁矿的形成与海底火山作用密切相关, 而不是与另一期的岩浆侵入作用有关, 这与传统的矽卡岩矿床明显不同。因此, 与矿化密切相关的海相火山岩的地质背景可以代表成矿作用的地质背景。

3 含矿火山岩的基本特征和岩浆源区

如前所述, 与海相火山岩型铁矿有关的海相火山岩既可以是熔岩, 也可以是火山碎屑岩, 在岩性上变化范围较大, 从玄武岩-玄武安山岩-安山岩-英安岩-流纹岩均有 (图 3), 虽然不同矿床并非都存在从基性到酸性的所有岩石类型, 但基本上以中基性岩石为主, 而且均存在基性火山岩。如云南大红山铁矿和阿尔金山的喀腊大湾铁矿主要为玄武岩; 西天山的一些铁矿虽然中性岩石占的比例较高, 但不同矿区均存在基性岩石; 蒙库铁矿虽然有大量流纹岩为主, 但基性岩石同样发育。总之, 几乎所有的矿床均出现基性岩石, 而且非单一的岩性^[2-3, 41], 前者表明岩浆起源于上地幔, 而后者则暗示其岩浆曾经历过分离结晶作用, 这一点也得到了同一矿区 Harker 图解的支持^[5]。此外, 岩相学特征表明, 绝大多数火山岩都存在斑晶, 而且除了辉石和斜长石等常见矿物的斑晶外, 还存在角闪石和黑云母等含水矿物的斑晶, 这些特征指示了岩浆曾经经历了岩浆房的分离结晶作用, 而且岩浆是富水的。

对火山岩的主要元素分析结果表明, 与大陆火山岩大多以钾质火山岩不同的是, 含矿海相火山岩基本是钠质 (图 4), 这与其海底火山岩的特点一致。有意思的是, 陆相火山岩型铁矿 (或玢岩铁矿,

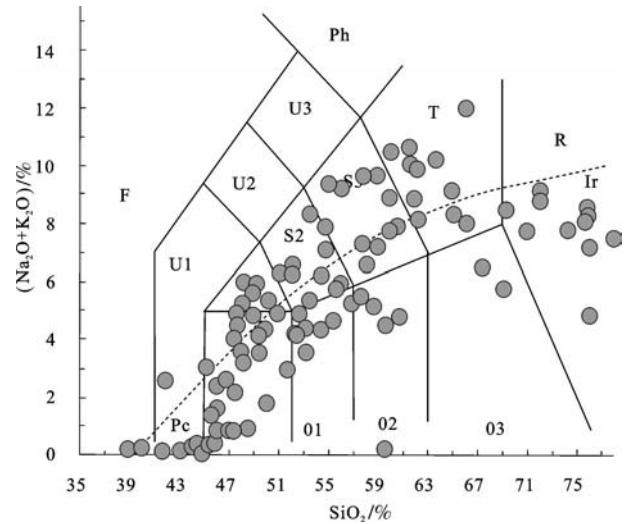


图3 含矿海相火山岩 TAS 图解(底图据[42])

数据来源: 西天山的备战、智博、查岗诺尔; 东准噶尔北部的老山口和乔夏哈拉; 阿尔泰山南缘的蒙库和阿巴宫; 东天山的雅满苏、沙泉子和百灵山。大红山和喀腊大湾地区由于较老, 火山岩成分已遭受较强的蚀变, 所以没有统计在内

Fig.3 TAS diagram of ore-bearing submarine volcanic rocks (after reference [42])

Data sources: Beizhan, Zhibo and Chaganguoer iron deposits in West Tianshan; Laoshankou and Qiaoxiahala iron deposits on the northern margin of Eastern Junggar terrain; Mengku and Abagong iron deposits on the southern margin of Altay Mountains; Yamansu, Shaquanzi and Bailingshan iron deposits in East Tianshan. Because the volcanic rocks in the Dahongshan and Kaladawan iron deposits have been affected by post-magmatic alteration due to old age, these data are not used

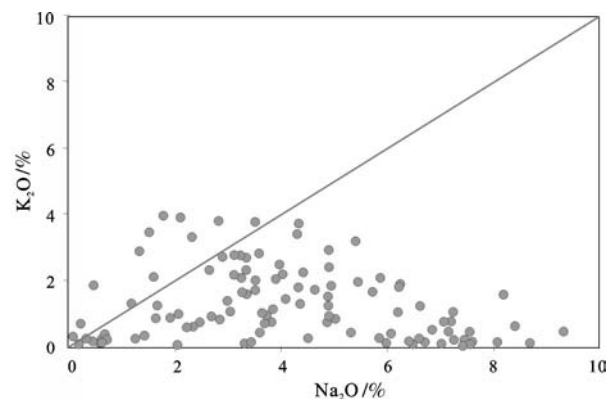


图4 含矿海相火山岩 Na₂O-K₂O 图解
(数据出处同图3)

Fig.4 Na₂O-K₂O diagram of the ore-bearing submarine volcanic rocks (data source as for Fig.3)

国外称为基鲁钠型铁矿或磁铁矿-磷灰石型铁矿) 的成矿玢岩也是钠质, 而矽卡岩铁矿有关的侵入岩

除少数 SiO_2 超过 70% 之外, 大多也是钠质, 其中是否存在必然的联系值得进一步研究。

在 Zr/TiO_2 - Nb/Y 图解(图 5)上, 几乎所有的点都落在亚碱性系列范围内, 而在 AFM 图解(图 6)上, 则既显示出拉斑玄武岩系列的趋势, 同时又有钙碱性演化趋势。由此表明, 与铁矿有关的火山岩属于拉斑-钙碱性系列, 而非碱性系列。

过去的研究表明, 几乎所有的铁矿的容矿岩石都具有相似的地球化学特点, 稀土元素球粒陨石标准化图解上, 显示出轻稀土轻度富集的特点; 在不相容元素原始地幔标准化图解上显示出典型的岛弧地球化学特征, 即 Nb 和 Ta 以及 Ti 的负异常, 并且大离子亲石元素(LILEs)相对于高场强元素(HFSEs)富集^[5,7,10-15,36]。其相似的地球化学特征表明, 酸性岩浆是基性岩浆分离结晶的产物, 而不是不同源区部分熔融的产物, 这是因为如果酸性岩浆是俯冲洋壳部分熔融形成的, 那么其稀土和微量元素标准化曲线就不会呈相似的特点: 来自壳源的岩浆的轻重稀土比值较基性岩高。在 Sr 和 Nd 同位素组成上, 虽然其 Sr 初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)变化比较大, 但 Nd 同位素成分均具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 7), 显示出亏损的软流圈地幔信号, 而不是岩石圈地幔, 这是因为要使得岩石圈地幔发生部分熔融, 必须是其中的

交代富集部分发生部分熔融。这样, 岩石圈地幔部分熔融形成的岩浆往往是富集的 Nd 同位素信号。此外, 无论是西天山还是东天山抑或是阿尔泰山南缘和东准噶尔北缘的火山岩的岩石化学以及地球化学特征没有指示存在来自洋壳的部分熔融。

总之, 从含矿火山岩的岩石学和地球化学特征来看, 含矿火山岩为一套基性-中性-酸性的拉斑-钙碱性火山岩系列, 原生岩浆起源于亏损的软流圈地幔, 富水, 并且经历了岩浆房内强烈的分离结晶作用的演化过程, 即中酸性火山岩是基性岩浆分离结晶作用的产物, 而不是俯冲洋壳部分熔融形成的。

4 海相火山岩型铁矿形成的深部动力学背景

板块构造已建立了完整的理论体系, 它成功地解释了地球上的许多地质现象, 如火山和地震的分布等, 同时随着板块构造理论的进一步完善, 人们发现板块构造与成矿作用之间有着密切的联系, 并且在不同的板块构造环境(包括超大陆的汇聚与裂解、板块俯冲、碰撞造山、大陆裂谷、被动大陆边缘和内部盆地等), 矿床产出具有一定的规律性^[44-49], 由此成功地解释了地球深部过程对成矿的控制作用和大型矿集区形成的深部控制机理, 这不仅在理

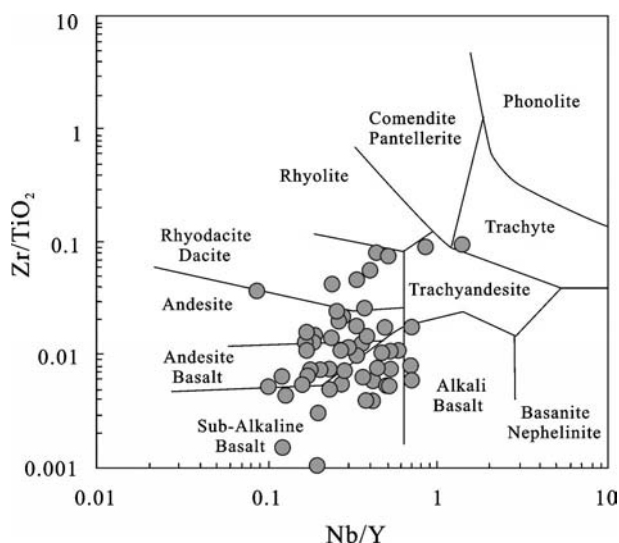


图 5 含矿海相火山岩的 Zr/TiO_2 - Nb/Y 图解
(底图据[43], 数据出处同图 3)

Fig.5 Zr/TiO_2 - Nb/Y diagram of the ore-bearing submarine volcanic rocks (after reference [43], data source as for Fig.3)

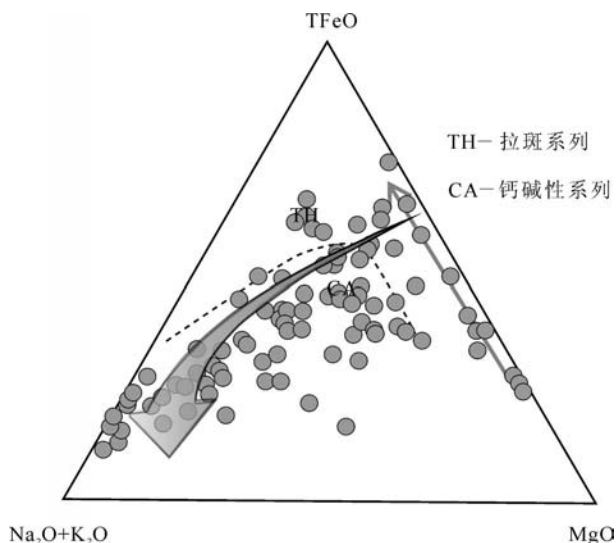


图 6 含矿海相火山岩的 AFM 图解(数据出处同图 3)
Fig.6 AFM diagram of the ore-bearing submarine volcanic rocks (data source as for Fig. 3)

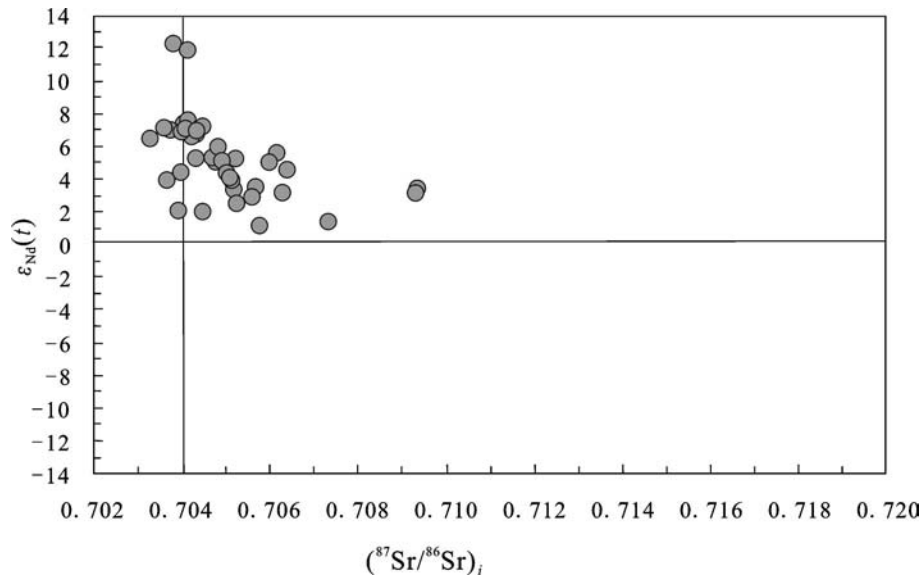


图7 含矿海相火山岩的Sr-Nd同位素图解
(数据出处同图3)

Fig.7 Sr-Nd isotope diagram of the ore-bearing submarine volcanic rocks(data source as for Fig. 3)

论研究上有重大的意义,而且对找矿也具有重要的指导作用。

然而,在已有的板块构造与成矿作用关系图上均没有显示海相火山岩型铁矿的产出位置,那么海相火山岩型铁矿究竟产在板块构造哪个位置?是否存在特定的位置?为何目前发现的海相火山岩型铁矿的数量如此之少?是否存在特殊的构造环境和深部过程?

许多学者通过对含矿火山岩的地球化学研究,认为其形成于与俯冲作用有关的活动大陆边缘弧,类似于安第斯山大陆边缘,那么随之而来的一个问题是,为什么有的大陆弧边缘形成斑岩铜矿和浅成低温热液型金矿,而有的形成海相火山岩型铁矿?它们是否与俯冲形式有关?过去的研究表明,并不是所有的弧环境都能形成斑岩铜矿,一些学者认为其形成与俯冲的形式有关,特别是洋脊的俯冲有关^[50],因此既然海相火山岩型铁矿的数量如此少,其形成也应该存在特殊的背景或俯冲形式。

Wyllie (1984)将俯冲带的热结构分为4种类型(图8),即冷幔-冷壳、冷幔-热壳、热幔-冷壳和热幔-热壳结构(这里的“壳”指的是俯冲的洋壳)^[51],不同的热结构会导致不同的源区产生部分熔融^[51-53]。在论述俯冲带的岩浆岩岩石组合之前,需要解释何谓“热幔”和“冷幔”以及“热壳”和“冷壳”。所谓“热幔”

和“冷幔”分别指的是软流圈地幔和岩石圈地幔,而“热壳”和“冷壳”指的是俯冲的洋壳是热的还是冷的,其产生主要与洋脊离海沟的距离有关,当洋脊离海沟的距离较短时,则洋壳保持热的状态,特别是洋脊俯冲时洋壳最热。相反,当洋脊离海沟的距离较远时,洋壳显然会变冷,称为“冷壳”。

在俯冲带内共有3个源区:地幔楔、俯冲洋壳(包括玄武岩及其之上的沉积物以及其中的流体)以及大陆地壳。在上述4种热结构的俯冲带内,对于地幔和俯冲的洋壳而言,只有热的地幔和热的洋壳才会发生部分熔融,而冷的洋壳和冷的地幔一般不会发生部分熔融,而大陆壳的熔融则需要幔源岩浆的底侵才有可能。因此,上述4类热结构的俯冲带内的岩浆源区应该是:对于冷幔-冷壳结构,无论是地幔还是洋壳都很难发生部分熔融,只有弧下地壳在有H₂O供给的情况下才有可能发生部分熔融,因此这种热结构很少有岩浆产生;对于冷幔-热壳结构,地幔不会发生部分熔融,而洋壳则可以发生部分熔融形成中酸性岩浆,这种中酸性岩浆由于温度较低,其上升过程中不会导致大陆壳发生部分熔融;对于热幔-冷壳结构,地幔会发生部分熔融,而洋壳则不会发生部分熔融,因此产生的岩浆是基性岩浆,这种基性岩浆由于温度比较高,其在上升过程中有可能会发生部分熔融;对于热

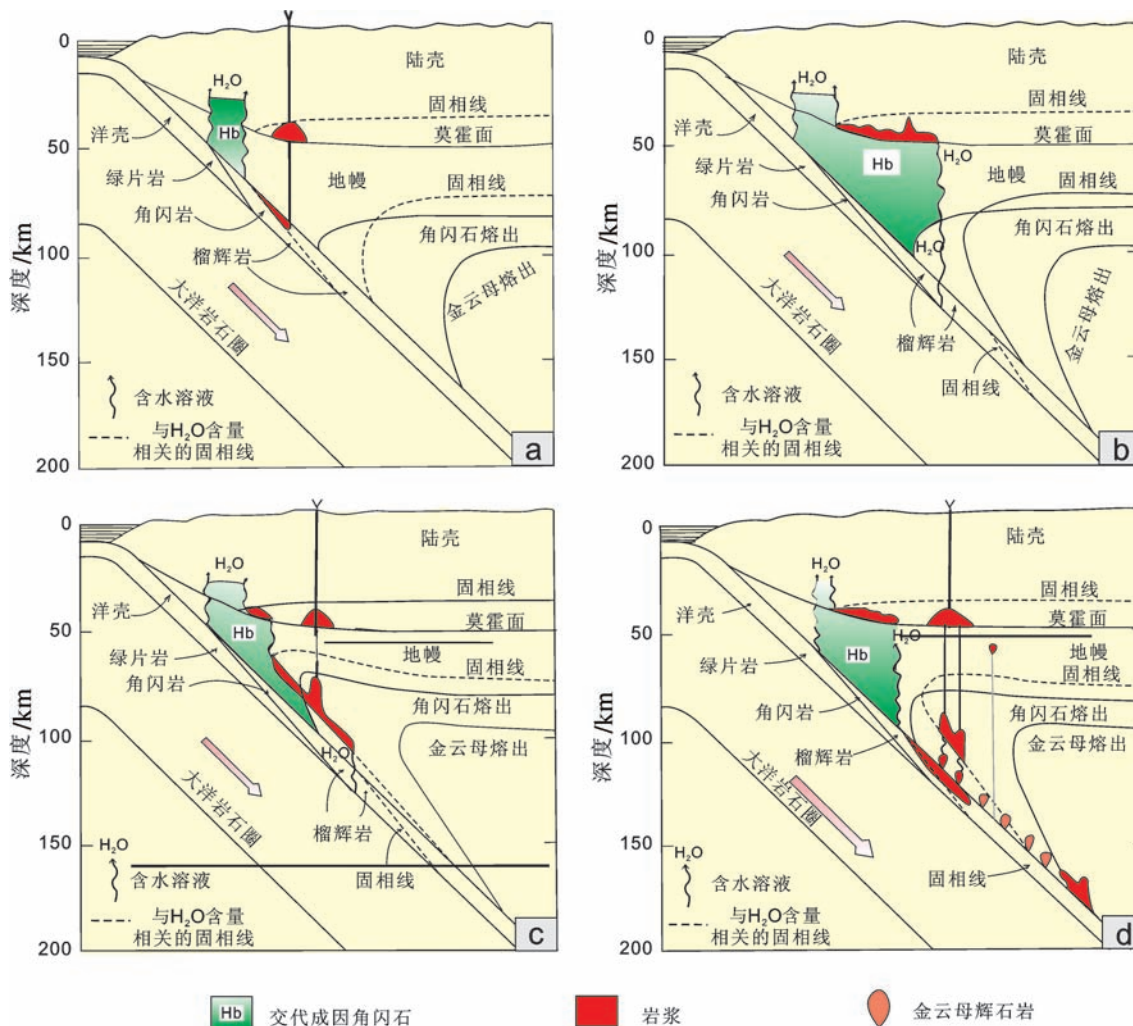


图8 俯冲带的4种热结构模型(据[51])

a—冷幔—冷壳;b—冷幔—热壳;c—热幔—冷壳;d—热幔—热壳

Fig.8 Four types of thermal structure in subduction zone (after reference [51])

a—Cool mantle—cool crust; b—Cool mantle—warm crust; c—Warm mantle—cool crust; d—Warm mantle—warm crust

幔—热壳结构,无论是地幔还是洋壳均会发生部分熔融,因此由于有基性岩浆的产生,弧下大陆壳也可能发生部分熔融。当然,岩浆在上升过程中还可能发生分离结晶以及地壳物质的同化混染过程,是否能发生取决于原生岩浆的性质以及弧的结构。因此,俯冲带不同的热结构产生的岩浆岩组合会有不同,反过来我们可以按照岩石组合推测该套岩石形成于俯冲带的热结构类型。

如前所述,与海相火山岩型铁矿有关的含矿火山岩的岩石组合为玄武岩—玄武安山岩—安山岩—英安岩—流纹岩的一套连续的岩石组合体系,火山岩系列属于拉斑—钙碱性系列,并且其具有明显的弧岩浆的

地球化学信号,表明其形成于岛弧环境,而非弧后环境,后者往往是拉斑玄武岩或者拉斑玄武岩—钠质流纹岩组合。考虑到产出该类型铁矿地区大多存在基底岩石,而且存在较高比例的中酸性岩石,所以这种弧应该为类似于安第斯的大陆弧,而非大洋岛弧。那么,其俯冲带的热结构是属于上述4种类型的哪一种?这需要从岩浆的源区进行分析。

前已述及,含矿火山岩均具有正的 ϵ_{Nd} 值,表明岩浆源区为亏损的软流圈地幔,并且其中的中酸性岩石是基性岩浆分离结晶的结果,而不是洋壳或大陆地壳部分熔融的结果,由此表明软流圈地幔发生了部分熔融,而洋壳或大陆壳并未发生部分熔融,所以推测其

俯冲带的热结构应该是“热幔-冷壳”结构。

由于含矿火山岩形成于海相环境,而大陆弧上的火山岩绝大多数是陆相环境,只有弧前和弧后才可能是海相环境,而其拉斑-钙碱性的一套连续的岩石组合表明其并非是弧后环境,所以由此推测海相火山岩型铁矿产于大陆弧前环境。此外,海相火山岩型铁矿的含矿火山岩均非单一岩性,并且大量的斑晶存在证明岩浆在岩浆房中发生过强烈的分离结晶作用。众所周知,要在地壳内形成岩浆房,需要岩浆的源区有一定的距离,否则由于岩浆从形成到喷出的距离较短,幔源岩浆不会在地壳停留形成岩浆房,而会快速喷出地表。从这个角度来看,大陆弧要比大洋岛弧更符合这一条件,因为大洋岛弧的地壳比较薄。因此,高角度的俯冲是能够保证上升的岩浆在弧前的地壳内形成岩浆房的先决条件。另一方面,要使得大陆弧前的软流圈地幔发生部分熔融,即洋壳俯冲深度达到软流圈地幔的位置也要求高角度的俯冲(图9)。否则,低角度俯冲的洋壳在大陆弧前很可能只能达到大陆岩石圈地幔位置,而当达到软流圈深度时部分熔融形成的岩浆上升后已经进入陆相环境。由以上讨论可知,

海相火山岩型铁矿形成的深部背景应该是热幔-冷壳背景下的高角度俯冲(图9)。

热幔-冷壳背景下的高角度俯冲也可以解释海相火山岩型铁矿的许多特征以及为什么这样的背景有利于海相火山岩型铁矿的形成。首先是物质来源,即铁的来源和流体的来源。如前所述,热幔-冷壳背景下的高角度俯冲作用只是软流圈地幔发生部分熔融,而洋壳不发生部分熔融,因此原生岩浆是基性岩浆,没有中酸性岩浆。由于基性岩浆铁的含量要远高于中酸性岩浆,由此可为后期铁的富集提供物质基础。另一方面,洋壳俯冲到软流圈地幔时会发生脱水作用并交代地幔楔,由这种被交代的地幔部分熔融形成的原生岩浆比未交代的地幔熔融的岩浆要富水,这样也为后期岩浆流体的形成创造了条件。其次是这样的背景有利于岩浆房的形成以及后期的岩浆流体的释放。众所周知,在高角度俯冲开始阶段,处于挤压环境,所以在上升过程中容易在地壳中形成岩浆房(同时也由于上升的距离较远,地壳密度较低),岩浆在岩浆房中发生分离结晶作用形成中酸性岩浆,由于 H_2O 和 Cl 在基性岩浆中溶解度较中酸性岩浆中的溶解度明显要

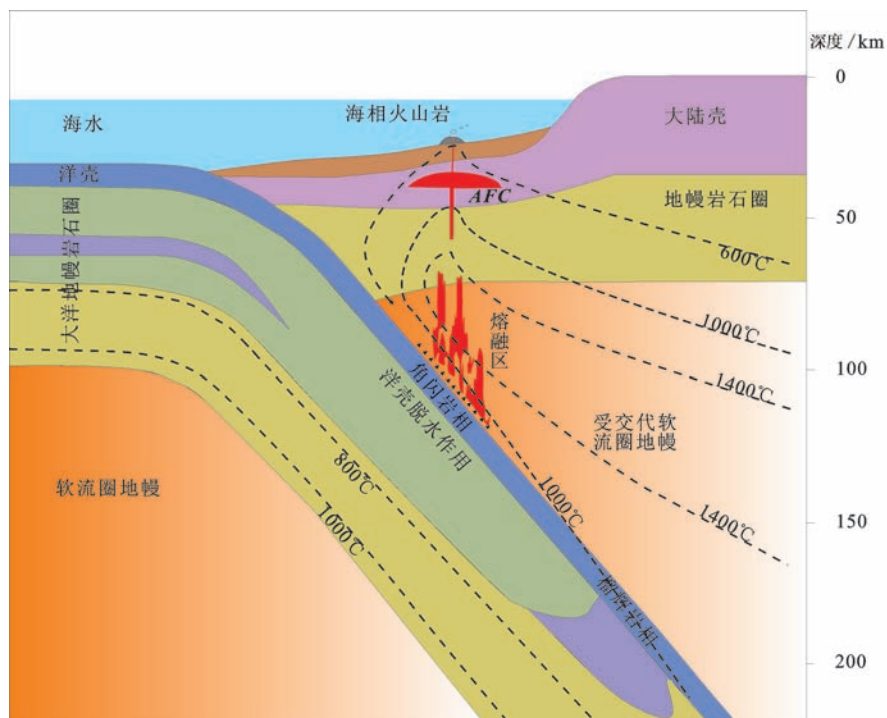


图9 海相火山岩型铁矿形成的深部动力学模型:热幔-冷壳背景下的高角度俯冲

Fig.9 Dynamic model of submarine volcanic-hosted iron deposits: high-angle subduction in a thermal structure with warm mantle-cool crust

高^[54],因此原来H₂O和Cl不饱和的基性岩浆分离结晶作用形成中酸性岩浆后变为过饱和,从而导致高盐度的流体在岩浆中出溶形成初始的岩浆热液。同时由于Fe在流体和熔体的分配系数主要取决于岩浆中Cl的浓度^[55],即Cl的浓度越高,Fe越倾向于出溶的流体中,因此出溶的高盐度流体(目前发现的海相火山岩型铁矿早期的流体包裹体含有石盐子晶可以佐证)应该是初步富铁的。高角度俯冲的晚期,原来的挤压环境变为拉张环境(低角度俯冲将会导致一直处于挤压环境),所以岩浆房在伸展条件下会发生破裂,导致富铁的岩浆流体释放并由此引起下渗的海水发生对流循环,此时流体应该是混合流体即岩浆流体与海水的混合。许多海相火山岩型铁矿早期普遍发生钠长石化表明,在钠长石化过程中,中-基性火山岩中的铁在淋滤过程中被钠替代进入流体^[41],使得流体进一步富集铁。富铁流体在适当的物理化学条件下(如氧逸度升高和pH值增高)发生沉淀。由此可以很好地解释为什么成矿流体是混合流体,而且发生在湿矽卡岩阶段或退化蚀变阶段。

5 海相火山岩型铁矿与斑岩铜矿的空间关系解释

一个为大家所熟知的事实是全球主要斑岩铜矿产于环太平洋岛弧环境,那么为什么在这些地区没有发现海相火山岩型铁矿?热幔-冷壳背景下的高角度俯冲模型不仅成功地解释了海相火山岩型铁矿的成因,而且也可以解释海相火山岩型铁矿和斑岩铜矿的空间分布。如西天山东段的阿吾拉勒带为海相火山岩型铁矿,而往西变为铁铜共生,再向西变为斑岩铜矿,而且几乎所有的海相火山岩型铁矿均分布在大哈拉军山组的南侧,并且东段大哈拉军山组火山岩为海相,分布范围较窄,而西段大哈拉军山组大多为陆相、分布较宽(图2)。对于这一现象,可以解释为东段是由于高角度俯冲的结果,即由于高角度俯冲导致形成的火山岩系较窄,并形成海相火山岩型铁矿;在西段,可能是由于俯冲角度较缓,导致形成的火山岩系较宽,同时也使得其一直处于挤压环境,从而有利于斑岩铜矿的形成^[66]。另一方面,过去的研究表明^[50,57],俯冲的洋壳由于具有高的铜含量,因此其部分熔融有利于形成

富铜的中酸性岩浆。从俯冲带的热结构模型来看,热壳-冷幔或热壳-热幔的结构有利于斑岩铜矿的形成。因此,虽然斑岩铜矿和海相火山岩型铁矿均形成于大陆弧环境,但是由于其不同的源区以及不同的俯冲带热结构,使得它们很少在空间上共生。

然而,Richards & Kerrich(2007)认为洋壳是否发生部分熔融不是最为关键的,正常的地幔部分熔融岩浆在经历了MASH过程也可以形成斑岩铜矿^[58],如果这一观点是正确的,那么海相火山岩型铁矿也可以和斑岩铜矿同时形成于一个大陆弧中,但是海相火山岩型铁矿应该位于靠大洋一侧,而斑岩铜矿则位于弧的主体中,能够作为上述推测证据的例子是东准噶尔北部海相火山岩型铁矿和斑岩铜矿的空间关系:老山口铁矿位于北塔山组底部,也就是该地区的南侧,而卡拉先格尔斑岩铜矿(包括玉勒肯哈腊苏和希勒克特哈腊苏斑岩等)则位于北塔山组中部,也即该地区的北侧,而北塔山组火山岩被解释成准噶尔洋北向俯冲的结果^[59]。

6 结 论

(1)海相火山岩型铁矿形成于活动大陆边缘弧靠大洋一侧,其俯冲带的热结构为热幔-冷壳模式,铁矿的形成与高角度俯冲有关。在此背景下,俯冲流体交代的亏损软流圈地幔发生部分熔融形成基性岩浆,岩浆上升过程中在地壳形成岩浆房并发生分离结晶作用演化成中酸性岩浆,并在演化过程中形成富铁的高盐度流体。在俯冲作用的晚期,构造作用由挤压变为拉伸,富铁的岩浆流体从岩浆房中释放并与下渗的海水混合发生对流循环,从而不断从中基性火山岩中淋滤出铁,导致成矿流体中铁的不断富集。在适当的物理化学条件下,流体中的铁发生沉淀形成铁矿石。

(2)由于海相火山岩型铁矿和斑岩铜矿形成的俯冲带的热结构不同,所以两者很少出现在同一个弧中。即使是一些特殊条件下同时出现在一个弧中,海相火山岩型铁矿分布在大陆弧靠近大洋一侧,而斑岩铜矿则出现在大陆弧的主体位置。

致谢:有关俯冲带的热结构问题受到了邓晋福教授学术报告的启示,有关成矿问题得到了赵振华研究员的帮助,匿名审稿人对本论文的初稿提出了许多有益的建议,在此一并表示衷心的感谢!同时也感谢

《中国地质》编辑部王学明的约稿及一再鼓励,使得本文得以完成。

参考文献(References):

- [1] Dill H G. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 100: 1–420.
- [2] 张作衡, 洪为, 蒋宗胜, 等. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型及形成环境[J]. *矿床地质*, 2012, 31: 941–964.
Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, et al. Geological features, mineralization types and metallogenic setting of Late Paleozoic iron deposits in western Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31: 941–964(in Chinese with English abstract).
- [3] Zhang Zhaochong, Hou Tong, Santosh M, et al. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 247–263.
- [4] Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Wang Zhihua, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Zhibo iron deposit in the Western Tianshan, NW China: Constraints on metallogenesis and tectonic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 406–427.
- [5] 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 等. 西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学特征锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2074–2088.
Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Hou Kejun, et al. Geochemistry and zircon U–Pb age of volcanic rocks from the Chagangnuoer and Zhibo iron deposits, western Tianshan, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2074–2088 (in Chinese with English abstract).
- [6] Li Qiang, Zhang Zhixin, Geng Xinxia, et al. Geology and geochemistry of the Qiaoxiahala Fe–Cu–Au deposit, Junggar region, northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 462–481.
- [7] 汪帮耀, 姜常义. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 18–27.
Wang Bangyao, Jiang Changyi. Petrogenesis and geochemical characteristics of carboniferous volcanic rocks of Chagannur iron deposit area in western Tianshan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(6): 18–27(in Chinese with English abstract).
- [8] Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Dundu iron–zinc ore deposit in western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 441–461.
- [9] 韩琼, 弓小平, 马华东, 等. 西天山阿吾拉勒成矿带大哈拉军山组火山岩时空分布规律及其地质意义[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 570–586.
Han Qiong, Gong Xiaoping, Ma Huadong, et al. Temporal and spatial distribution of Dahalajunshan Group volcanic rocks in the Awulale Metallogenic belt of West Tianshan Mountains and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 570–586 (in Chinese with English abstract).
- [10] 韩琼, 弓小平, 程松林, 等. 西天山备战铁矿火山岩地球化学特征、锆石 U–Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(1): 70–82.
Han Qiong, Gong Xiaoping, Cheng Songlin, et al. Zircon U–Pb Geochronology and Hf Isotopes of Volcanic Rocks in Beizhan Iron Ore of the West Tianshan[J]. *Acta geologica sinica*, 2015, 89(1): 70–82 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王腾, 张振亮, 阳正熙, 等. 新疆西天山备战铁矿区火山岩地球化学特征与构造环境[J]. *矿物学报*, 2015, 35(3): 351–358.
Wang Teng, Zhang Zhenliang, Yang Zhengxi, et al. Geological Characteristics and Tectonic Setting of Volcanic Rocks from Beizhan Iron Deposit, Western Tianshan Mountain, Xinjiang Autonomous Region, China[J]. *Acta mineralogical sinica*, 2015, 35(3): 351–358 (in Chinese with English abstract).
- [12] 崔玲玲, 陈柏林, 杨农, 等. 阿尔金山东段喀腊大湾中基性火山岩岩石地球化学特征及成因探讨[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(1): 96–107.
Cui Lingling, Chen Bolin, Yang Nong, et al. Geochemistry and genesis of basic–intermediate volcanic rocks from Kaladawan, east Altun Tagh Mountains[J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(1): 96–107 (in Chinese with English abstract).
- [13] 荆德龙, 张博, 汪帮耀, 等. 新疆西天山新塔格铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及其成因研究[J]. *地球化学*, 2015, 44(4): 377–391.
Jing Delong, Zhang Bo, Wang Bangyao, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Carboniferous volcanic rocks in Nixintage iron ore deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2015, 44(4): 377–391 (in Chinese with English abstract).
- [14] 田敬佳, 段士刚, 彭万林, 等. 新疆西天山智博铁矿区火山岩和侵入岩岩石地球化学[J]. *矿床地质*, 2015, 34(1): 119–138.
Tian Jingquan, Duan Shigang, Peng Wanlin, et al. Geochemistry of volcanic and intrusive rocks in Zhibo iron ore deposit of western Tianshan Mountains[J]. *Mineral deposits*, 2015, 34(1): 119–138(in Chinese with English abstract).
- [15] 徐璐璐, 柴凤梅, 李强, 等. 东天山沙泉子铁铜矿区火山岩地球化学特征、锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 1771–1790.
Xu Lulu, Chai Fengmei, Li Qiang, et al. Geochemistry and zircon U–Pb age of volcanic rocks from the Shaquanzi Fe–Cu deposit in East Tianshan Mountains and their geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 1771–1790(in Chinese with English abstract).
- [16] Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, et al. A review of the geological characteristics and mineralization history of iron

- deposits in the Altay orogenic belt of the Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 54: 1–16.
- [17] Yang F, Mao J, Liu F, et al. Geochronology and geochemistry of the granites from the Mengku iron deposit, Altay Mountains, northwest China: implications for its tectonic setting and metallogenesis[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, 57(6): 803–818.
- [18] Zhang Xi, Klemd Reiner, Gao Jun, et al. Metallogenesis of the Zhibo and Chagangnuoer volcanic iron oxide deposits in the Awulale Iron Metallogenic Belt, Western Tianshan orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 151–172.
- [19] Li Ningbo, Niu Hecai, Zhang Xingchun, et al. Age, petrogenesis and tectonic significance of the ferrobasalts in the Chagangnuoer iron deposit, western Tianshan[J]. *International Geology Review*, 2015, 57(9–10): 1218–1238.
- [20] 陈柏林, 蒋荣宝, 李丽, 等. 阿尔金山东段喀腊大湾地区铁矿带的发现及其意义[J]. *地球学报*, 2009, 30(2): 143–154.
Chen Bolin, Jiang Rongbao, Li Li, et al. Discovery of iron ore zones in the Kaladawan area within the eastern part of the Altun Mountains and its significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2009, 30(2): 143–154 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张法武, 王保国, 舒华伟. 云南大红山铁铜矿Ⅱ1矿组地质特征. *云南地质*, 2015, 34(3): 366–372.
Zhang Fawu, Wang Baoguo, Shu Huawei. The geology feature of orebody assemblage Ⅱ 1 of Dahongshan Fe–Cu deposit, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2015, 34(3): 366–372 (in Chinese with English abstract).
- [22] 阙梅英. 主要铁矿物特征及矿床成因探讨[J]. *矿物岩石*, 1984, (1): 57–69.
Que Meiyang. The origin of Etouchang iron deposit and the characteristics of its iron minerals[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1984, (1): 57–69 (in Chinese with English abstract).
- [23] 赵振明, 陈守建, 计文化, 等. 青海开心岭二叠纪铁矿床富磁铁矿体的地质特征及成因分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(3): 422–439.
Zhao Zhenming, Chen Shoujian, Ji Wenhua, et al. The Geological Characteristics and Formation of the Magnetite–rich Kaixinling Iron ore–deposit during Permian in Qinghai Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(3): 422–439 (in Chinese with English abstract).
- [24] Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, et al. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39: 423–440.
- [25] 杨文强, 丁海波, 刘良, 等. 新疆阿尔金南部迪木那里克铁矿赋矿地层的形成时代及其地质意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 2090–2101.
Yang Wenqiang, Ding Haibo, Liu Liang, et al. Formation age of ore–bearing strata of the Dimunlike iron deposit in South Altun Mountains and its geological significance. *Geological bulletin of China*, 2012, 31(12): 2090–2101 (in Chinese with English abstract).
- [26] Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, et al. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 189–200.
- [27] 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 新疆阿尔泰山南缘阿巴宫铁矿区康布铁堡组变质火山岩年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1592–1601.
Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating and its significance for the metarhyolites in the Kangbutiebao Formation from Abagong iron deposit at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(11): 1592–1601 (in Chinese with English abstract).
- [28] 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 等. 新疆准噶尔北缘北塔山组火山岩年龄及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2183–2198.
Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, et al. Geochronology and genesis of volcanic rocks in Beitashan Formation at the northern margin of the Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2183–2198 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孙吉明, 马中平, 徐学义, 等. 新疆西天山备战铁矿流纹岩的形成时代及其地质意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 1973–1982.
Sun Jiming, Ma Zhongping, Xu Xueyi, et al. The formation epoch of the host wall rock of the Beizhan iron deposit in West Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geological bulletin of China*, 2012, 31(12): 1973–1982 (in Chinese with English abstract).
- [30] Hou Tong, Zhang Zhaochong, Santosh M, et al. Geochronology and geochemistry of submarine volcanic rocks in the Yamansu iron deposit, Eastern Tianshan Mountains, NW China: Constraints on the metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56, 487–506.
- [31] Pirajno F, Seltmann R, Yang Y Q. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(2): 157–185.
- [32] 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 阿尔泰山南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2009, 25(06): 1403–1415.
Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, et al. Geochronology and genesis of the metarhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1403–1415 (in Chinese with English abstract).
- [33] 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 等. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及地质意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 149–164.
Lv Shujun, Yang Fuquan, Chai Fengmei, et al. Zircon U–Pb Dating for intrusions in Laoshankou ore district in northern

- margin of east Junggar and their significances[J]. *Geological Review*, 2012, 58(1):149-164(in Chinese with English abstract).
- [34] 张保江, 李强, 耿新霞, 等. 阿尔泰蒙库铁矿斜长角闪岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及地质意义[J]. *新疆地质*, 2012, 30(3): 277-282.
- Zhang Baojiang, Li Qiang, Geng Xinxia, et al. SHRIMP U-Pb age of the amphibolite from Mengku iron deposit and its geological implications in Altay, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2012, 30(3): 277-282(in Chinese with English abstract).
- [35] Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, et al. Geological characteristics and zircon U-Pb dating of volcanic rocks from the Beizhan iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(3): 737-747.
- [36] 李潇林斌, 弓小平, 马华东, 等. 西天山式可布台铁矿火山岩地球化学特征、成岩时代厘定及其构造意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 1791-1804.
- Li Xiaolinbin, Gong Xiaoping, Ma Huadong, et al. Geochemical characteristics and petrogenic age of volcanic rocks in the Shikebutai iron deposit of West Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 1791-1804(in Chinese with English abstract).
- [37] 李厚民, 丁建华, 李立兴, 等. 东天山雅满苏铁矿床矽卡岩成因及矿床成因类型[J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2477-2489.
- Li Houmin, Ding Jianhua, Li Lixing, et al. The genesis of the skarn and the genetic type of the Yamansu iron deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(12): 2477-2489(in Chinese with English abstract).
- [38] 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代:来自石榴石 Sm-Nd 等时线年龄的信息[J]. *矿床地质*, 2012, 31(5):1067-1074.
- Hong Wei, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, et al. Metallogenic epoch of Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan Mountain, Xinjiang: Information from garnet Sm-Nd isochron age[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(5): 1067-1074(in Chinese with English abstract).
- [39] Wan B, Xiao W J, Zhang L C, et al. Iron mineralization associated with a major strike-slip shear zone: radiometric and oxygen isotope evidence from the Mengku deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 44: 136-147.
- [40] 杨富全, 张志欣, 屈文俊, 等. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(3): 396-404.
- Yang Fuquan, Zhang Zhixin, Qu Wenjun, et al. Re-Os age of Molybdenite from the Mengku Iron deposit in Altay, Xinjiang and its implication for metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(3): 396-404(in Chinese with English abstract).
- [41] 张招崇, 侯通, 李厚民, 等. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. *岩石学报*, 2014, 30(5): 1189-1204.
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, et al. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(5): 1189-1204(in Chinese with English abstract).
- [42] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 745-750.
- [43] Winchester J A, Floyd P A. Geological discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20, 325-343.
- [44] Mitchell A H G, Garson M S. *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*[M]. Academic Press, London, 1981.
- [45] Hutchison C S. *Economic Deposits and Their Tectonic Settings*[M]. MacMillan Press, London, 1983.
- [46] Sawkins F J. *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*[M]. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [47] Condie K C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*[M]. 4th edn. Butterworth Heinemann, Oxford, 1997.
- [48] Condie K C. *Earth as an Evolving Planetary System*[M]. Elsevier, Amsterdam, 2005.
- [49] Groves D I, Bierlein F P. Geodynamic settings of mineral deposit system[J]. *Geological Society*, London, 2007, 164: 19-30.
- [50] Sun W D, Huang R F, Li H, et al. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 97-131.
- [51] Wyllie P J. Sources of granitoid magmas at convergent plate boundaries[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1984, 35(1/3): 12-16.
- [52] Kay R W. Volcanic arc magmas: Implications of a melting-mixing model for element recycling in the crust-upper mantle system[J]. *Journal of Geology*, 1980, 88: 497-522.
- [53] Green T H. Island arc and continent building magmatism—A review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry[J]. *Tectonophysics*, 1980, 63: 367-385.
- [54] Webster J D. The exsolution of magmatic hydrosaline chloride liquids[J]. *Chemical Geology*, 2004, 210: 33-48.
- [55] Simon A C, Petike T, Candela P A, et al. Magnetite solubility and iron transport in magmatic-hydrothermal environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(23): 4905-4914.
- [56] Richards J P. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: Just add water[J]. *Economic Geology*, 2011, 106(7): 1075-1081.
- [57] Wilkinson J J. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(11): 917-925.
- [58] Richards J P and Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 2007, 102(4): 537-576.
- [59] Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Kusky Timothy M, et al. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16(2): 201-215.