

文章编号: 1001-8166(2005)05-0525-08

一种罕见的岩石——富铁玄武岩/富铁苦橄岩研究进展

彭头平^{1,2}, 王岳军¹, 彭冰霞^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 高铁镁质岩石(Ferrobasalts/Ferropicrites)较正常镁质岩石高 FeO^{*} (通常在 14% 以上)、贫硅、低碱, 具独特主量元素特征, 属富铁拉斑玄武岩—富铁苦橄岩。在自然界中与普遍发育的具 Bowen 趋势的低铁富硅熔体不同, 高铁贫硅岩浆(Fenner 趋势)非常罕见, 也没有直接的现代类比值可以对比以解释其岩石成因。为了解释其岩石成因, 前人做过大量的研究, 归纳起来主要有以下几种可能的成因类型: 普通洋脊型玄武岩在封闭系统中简单的分离结晶作用; 低压条件下俯冲板片的大比例部分熔融; 地幔柱头前锋富铁组分(Fe-rich streaks in mantle plume starting-heads)的部分熔融。其成因机制的研究对于理解其岩浆深部构造背景、早期壳—幔演化、下地幔组成不均一性和核幔相互作用有着重要意义, 同时, 对于最近在我国南太行山地区及其它地区发现的具有高铁镁特征岩石的研究具有极其重要的意义。

关键词 富铁拉斑玄武岩; 富铁苦橄岩; Bowen 趋势; Fenner 趋势; 部分熔融; 分离结晶
中图分类号: P59 文献标识码: A

岩浆演化过程对于理解全球地球化学循环和板块构造具有非常重要的作用, 而岩浆的演化遵循何种分异趋势主要取决于岩浆的氧逸度^[1], 氧逸度的升高会扩大玄武质岩浆体系中磁铁矿稳定范围, 使磁铁矿较早地从岩浆中晶出, 从而导致残余岩浆中硅的富集和铁的亏损, 即常见的贫铁、富硅的 Bowen 演化趋势^[2], 相反, 氧逸度的降低会推迟岩浆演化过程中磁铁矿的晶出, 致使残余岩浆中铁的富集, 即岩浆朝富铁、贫硅趋势演化——Fenner 演化趋势^[3]。在自然界中普遍发育的是具 Bowen 趋势^[1]的低铁富硅熔体, 而富铁、贫硅的 Fenner 趋势^[3]的熔体则非常罕见。虽然目前相继有富铁、贫硅熔体资料的报道^[4-29], 但没有直接的现代类比值可以对比以解释其岩石成因。因此, 作为地球上存在的一种岩浆演化趋势(Fenner 趋势^[3]), 与普遍发育的富

硅、贫铁岩浆演化趋势(Bowen 趋势^[1])一样, 其成因的研究对于理解全球地质历史以来的地球化学循环和板块构造演化以及地球动力学机制是非常重要的^[14]。基于此, 综合前人对此类比较罕见的高铁镁质岩石的研究, 对理解其岩石成因及其岩浆深部构造背景、早期壳—幔演化、下地幔组成的不均一性和核幔相互作用等有着非常重要的意义(图 1)。

1 研究进展回顾

20 世纪 70 年代, Brooks 等^[30]和 Wiebe 等^[4]在研究拉布拉多的奈恩(Nain)前寒武纪地体时, 发现一种比正常玄武岩高铁、低硅特征的玄武质岩石, 随后, 在大西洋洋中脊、印度洋、印度洋洋中脊东部、西南部、东太平洋的加拉帕哥斯扩张中心等几个地方, 也相继报道过有富 Fe 的玄武质玻璃/岩石的存

* 收稿日期: 2004-05-27 修回日期: 2004-11-23.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“晋冀地区早元古代高铁镁质岩石成因及其构造指示”(编号: 40303005)和“澜沧江南段三叠纪共存高镁和高铝火山岩的岩石成因及其构造约束”(编号: 40473019), 中国科学院知识创新工程重要方向项目“华南中生代盆山系统及动力学研究”(编号: KZCX2-SW-117)资助。

作者简介: 彭头平(1974), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事岩石大地构造方面的研究。E-mail: tppeng@gsg.ac.cn

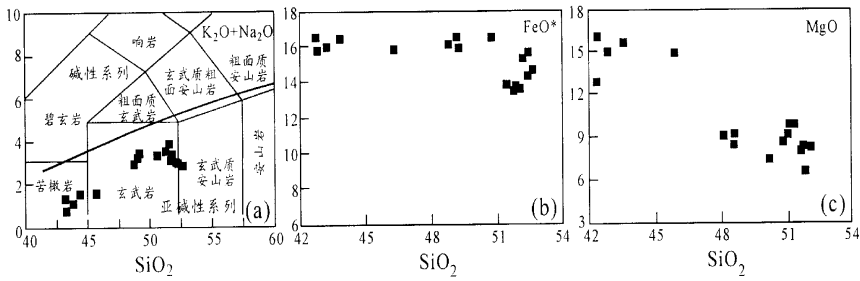


图 1 (a) 岩石的分类图解 (b) SiO_2 对 FeO^* (全铁) 图解 (c) SiO_2 对 MgO 图解^[18]
 Fig.1 (a) TAS (b) SiO_2 vs FeO^* (total Fe); (c) SiO_2 vs MgO variation diagrams

在^[5-10]。到 80 年代末 90 年代初,在研究阿曼 Semail 蛇绿混杂岩中的辉长岩^[13]、大西洋、印度洋等洋中脊火山岩^[11]和拉布拉多的奈恩前寒武纪地体^[12]时,均显示有富铁堆晶作用岩浆的存在。据报道,在加拉帕戈斯(Galapagos)地区^[6],胡安·德富卡(Juan de Fuca)山脊和其他地方也有富 Fe、贫 Si 岩浆的存在。代表现今东格陵兰早第四纪活动的板块边缘部分的 Reykjanes 山脊,也显示有大量的富 Fe、Ti 和贫 Si 的玄武质玻璃存在^[10]。近年来,在研究与地幔柱有关的大陆溢流玄武岩(CFB's)时,在大陆溢流玄武岩系列的底部普遍存在一套比正常苦橄质岩石高铁镁质的苦橄质岩石^[19-29]。

然而,截止目前国内很少有高铁拉斑质—苦橄质岩石的报道,其中 Halls 等^[31]在开展华北克拉通早中元古代基性岩脉的古地磁研究中提到太行山早中元古代基性岩脉群中存在富铁拉斑质岩石,但没有任何细节的表述,侯贵廷等^[33]研究的晋北中元古代岩墙群具高铁(14.0%~16.0%)特征;徐义刚等^[28]和朱炳泉等^[29]在研究峨眉山与地幔柱有关的大陆溢流玄武岩(CFB's)时有高铁高镁特征的苦橄质岩石的存在。最近,王岳军等在开展“太行山南段隆升过程构造—热年代学研究”^[33]和基性岩脉研究时^[17, 26],也发现太行山南段部分基性岩脉具高铁高镁特征($\text{FeO}^* = 13.2\% \sim 16.9\%$, $\text{MgO} = 6.5\% \sim 9.4\%$)^[18]。因此,越来越多的研究表明,这种比较罕见的富铁贫硅的岩浆演化趋势(Fenner 趋势)与正常的岩浆演化趋势(Bowen 趋势)一样,存在于地球演化的各个时期和各种构造环境中^[14]。

2 地球化学特征及其成因

高铁镁质岩石较正常镁质岩石高 FeO^* (通常质量百分含量在 14% 以上)、贫硅、低碱,具独特微量元素特征,属富铁拉斑玄武岩—富铁苦橄岩。与

自然界中普遍发育的具 Bowen 趋势的低铁富硅熔体不同,高铁贫硅岩浆(Fenner 趋势)非常罕见,也没有直接的现代类比物可以对比以解释其岩石成因。综合前人的研究,主要有以下几种成因类型:

- (1) 普通洋脊型玄武质岩浆简单的分离结晶作用。
- (2) 低压条件下俯冲板片的大比例部分熔融。
- (3) 地幔柱头前锋富铁组分(Fe-rich streaks in mantle plume starting-heads)的部分熔融。

2.1 普通洋脊型玄武质岩浆简单的分离结晶作用

早期在研究洋中脊玄武岩时发现一种非常罕见的富铁钛(titanium-and iron-rich)、贫硅(silica-poor)特征的玄武质玻璃/岩石^[5-10, 37-39](图 2)这种玄武质玻璃/岩石具有高的 FeO^* (全铁)(14.92%~18.35%)、 TiO_2 (3.97%~5.51%)和 MgO (3.92%~8.28%),低的 SiO_2 (45.30%~51.23%)、 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.302 \sim 0.443$)等特征。Le Roex 等^[8, 9]根据其富集 FeO^* 和 TiO_2 的特征将其定义为富铁玄武岩(Ferrobasalts,图 2)。关于其岩石的成因,Le Roex 等^[8, 9]通过详细的元素地球化学模拟研究,认为这些高铁玄武岩的形成都是低压条件下大比例(可达 65%)分离结晶作用的结果,其形成的构造环境与非常低速的扩张中心密切相关。因为,快速扩张中心不可能产生这种高度演化的高铁玄武质岩浆。并且他们都强调,形成这种高铁低硅特征的玄武质岩石的重要机制主要取决于岩浆的冷却速率和原始岩浆的提供速率,也就是当这两者达到平衡时,岩浆才可能发生大比例的分离结晶作用(达 65%)最终形成这种比较罕见的具有高铁低硅特征的玄武质岩石。同时,Brooks 等^[10, 30]在研究 Skaergaard 侵入岩和相关的岩脉群中富 Fe 贫 Si 的岩浆成因时认为,这种富 Fe 贫 Si 的岩浆是由普通洋脊型玄武质岩浆(MORB)(图 2 中成分点 P)在封闭

或几乎封闭系统中简单分离结晶作用演化而来。此后 Sinton 等^[7] 在研究洋中脊玄武岩 (MORB) 中富 Fe 贫 Si 的岩浆成因时也得出相同的结论,认为形成这种富 Fe 贫 Si 的岩浆应满足一定的条件:在封闭体系中岩浆的提供和冷却速率应该达到平衡。以上认识与早期 Kennedy^[40] 和 Osborne^[41] 的研究结果也相一致,即决定岩浆演化的 Bowen 趋势和 Fenner 趋势的主要因素是岩浆在演化中是否有磁铁矿的分离结晶作用的出现,也即取决于岩浆在演化过程中的氧逸度,而氧逸度主要与岩浆发生分离结晶作用的源区或者地壳中岩浆房的围岩的条件有关。虽然目前大量的研究资料表明,洋中脊下的岩石圈地幔是处于相当还原状态的^[42-44],但是,当岩浆上升到近地表的洋壳或大陆地壳的岩浆房时,岩浆的氧逸度也会随之增加,比如正在发生裂谷

作用的裂谷的顶端^[14],就可能出现富铁的趋势的岩浆 (Fenner 趋势)。这也得到了 Juster 等^[45] 利用加拉帕戈斯洋中脊的样品进行实验岩石学研究的证实。尽管这种富铁贫硅岩浆的密度大 (2.78 ~ 2.83 g/cm³) 而难以喷出地表^[6,7,46],但是在突然的裂谷作用或者经历长期分离结晶作用后的突然淬火作用中,可能存在小部分富铁岩浆喷出地表^[14]。

2.2 低压条件下脱水俯冲板片的大比例部分熔融

Leybourne 等^[16] 在对加拿大阿密斯克 (Amisk) 湖,弗林弗伦 (Flin Flon) 绿片岩带中的古元古代 (约 1.9Ga) 弧后系列火山岩研究时,也发现一种高铁低硅特征的拉斑玄武质岩石。阿密斯克湖的火山岩主要表现为拉斑玄武岩和弧后玻安质玄武岩互层的特征,这些玄武岩被中—酸性钙碱性岛弧火山岩所覆盖。而从弧后到岛弧火山岩的明显变化主要是以一套苦橄质岩石为界,而苦橄岩被一套高铁拉斑玄武质岩石所覆盖。Leybourne 等^[16] 在研究这些高铁拉斑玄武岩 (形成年龄约 1.9Ga) 时发现,这些高铁拉斑玄武岩具有高的 FeO^{*} (15% ~ 21%),低 SiO₂ (39% ~ 45%) 和轻微的轻稀土的富集 ([La/Sm]_n = 1.3 ~ 1.93) 的特征,与正常洋中脊型玄武岩 (N-MORB) 相比,具有异常高的 Ta, Nb, Ti (通常在与岛弧有关的岩石中亏损) 和低的 Zr, Hf, Y 的特征 (图 3a, b)。Leybourne 等^[16] 认为,形成这种特征的高铁拉斑玄武质岩石要求脱水俯冲板块在低压条件下大比例部分熔融,进一步对微量元素的模拟研究表明,这种高铁拉斑玄武岩可能就代表了板片 (难熔榴辉岩) 的直接部分熔融或者受到俯冲交代的上覆地幔楔的部分熔融 (图 4a, b)。然而,近年来的研究表明^[34-36] 要使俯冲脱水板片或者受到俯冲交代的上

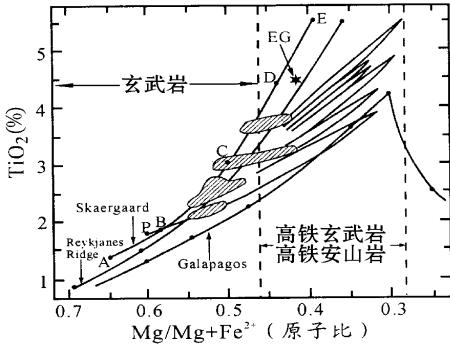


图 2 拉斑质熔体演化的 TiO₂ 对 Mg 数 (Mg/Mg + Fe²⁺) 图解^[16]

Fig. 2 TiO₂ vs Mg number variation diagram for some evolving tholeiitic liquids

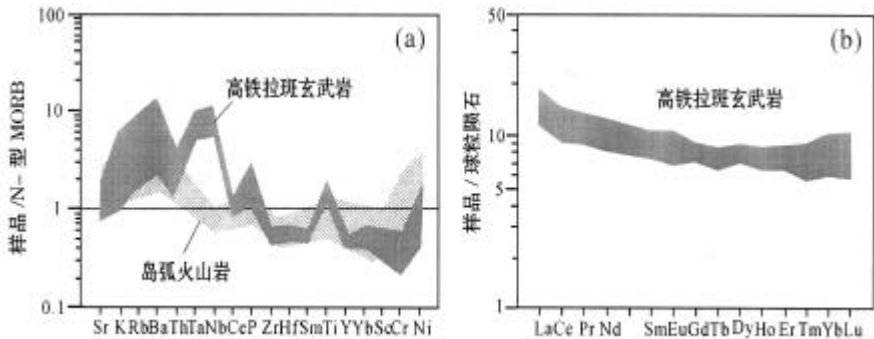


图 3 (a) 微量元素蛛网图和 (b) 稀土元素配分图^[16]

Fig. 3 (a) Mid-ocean ridge basalt (MORB) norm alized trace element ; (b) Chondrite-norm alized rare earth element diagram

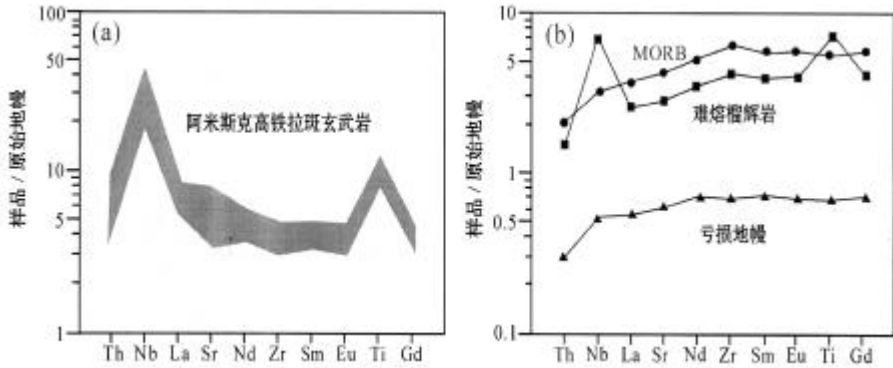


图 4 阿米斯克高铁拉斑玄武岩和难熔榴辉岩微量元素标准化对比图解^[16]

Fig.4 Comparison of Amisk high-Fe tholeiites (a) to refractory slab (eclogite) (b)

覆地幔楔在低压条件下发生部分熔融作用形成这种高铁镁质拉斑玄武岩,必须有足够高的热流^[34]。因此,Leysbourne等^[16]认为,在地球演化的早期——古元古代(约2.0 Ga)期间,高的热流和年轻洋壳的快速俯冲可能会导致俯冲板块在浅部的大比例部分熔融,从而形成这种高铁镁质的拉斑玄武岩。这对于最近在我国华北克拉通内部的南太行山地区发现的早元古代(约1.8 Ga)高铁镁质基性岩脉成因机制的研究也具有重要的现实意义^[18]。

2.3 地幔柱头前锋富铁组分的部分熔融

近年来在研究与地幔柱有关的大陆溢流玄武岩(CFB's)时,发现在大陆溢流玄武岩系列的底部存在一套比正常苦橄质岩石高铁镁质的苦橄质岩石^[19-29]。这套富铁苦橄质岩石具有高的 FeO^* (13.89%~17.70%)、 MgO (12%~18%)、 $Mg^{\#}$ ($(Mg/Mg+Fe^{2+}) \times 100 = 62 \sim 67$)、 Cr ($400 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$)和 Ni ($250 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$)、低的 SiO_2 (45.33%~49.84%)、 CaO (8%~9%)、 Al_2O_3 (4.03%~11.86%)、碱($Na_2O+K_2O = 2.5\% \sim 3.5\%$)、轻稀土富集($[La/Sm]_n = 1.0 \sim 3.0$)和重稀土分异明显($[Gd/Yb]_n = 1.25 \sim 3.75$)以及 $Sr-Nd$ 组成具有洋岛玄武岩(OIB)的特征。关于这套岩石成因,前人的研究认为可能是下地幔富铁二辉橄岩绝热减压部分熔融的产物,或是科马提质或苦橄质岩浆在深部固化后再次熔融的结果,其形成主要与地幔柱作用关系密切。由于这种富铁苦橄质岩石常见于大陆溢流玄武岩(CFB's)的底部,因此,被认为是地幔柱头前锋富铁组分(Fe-rich streaks in mantle plume starting-heads)熔融的产物^[27,47-50](图5)。虽然,实验岩石学研究的结果表

明^[51,52]大陆溢流玄武岩(CFB's)可能来自上涌地幔柱中榴辉岩条带的部分熔融,且这种榴辉岩部分熔融形成的熔体富集 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 和 Na_2O 的特征可以解释大陆溢流玄武岩底部的这套高铁苦橄岩富集 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 和 Na_2O 的特征,然而熔体相对较低的 MgO 的含量无法解释高铁镁苦橄岩高镁($MgO > 12\%$)的特征。因此,Gibson等^[26,27]认为这种地幔源区的部分熔融不可能形成这种富铁的苦橄岩/科马提岩熔体,富铁镁质的熔体至少部分来自橄辉岩地幔源区的部分熔融,这也与Yaxley等^[53]利用橄辉岩和榴辉岩进行的实验岩石学的研究结果相一致,即在3.5 GPa和约1300°C条件下,榴辉岩开始熔融,并与橄辉岩围岩中的橄辉石反应生成斜方辉石和石榴子石,残留的榴辉岩进一步熔融形成安山质熔体,安山质熔体与围岩橄辉岩反应使围岩橄辉岩富集石榴子石和单斜辉石。这种重新富集的围岩橄辉岩是相对富铁镁质的,且其固相线温度比正常的橄辉岩的固相线温度低50°C左右^[53,54](图6)。实验结果也表明,这种富铁的橄辉岩地幔源区发生部分熔融作用而形成的熔体比正常的橄辉岩围岩部分熔融形成的熔体具有更高的 $(Gd/Yb)_m$ 比值和 $(La/Yb)_m$ 比值、低的 Al_2O_3 特征^[25],也就解释了这套高铁镁苦橄质岩石具有高的 $(Gd/Yb)_m$ 比值和 $(La/Yb)_m$ 比值、低的 Al_2O_3 的特征以及常出现在大陆溢流玄武岩(CFB's)的底部的特征^[26,27]。因此,高铁镁苦橄质岩浆的形成可能是发生过重新富集作用的橄辉岩对地幔在温度大于1450°C和压力大于4.5 GPa条件下绝热减压中等程度部分熔融的结果^[26,27,54-56](图5,6)。

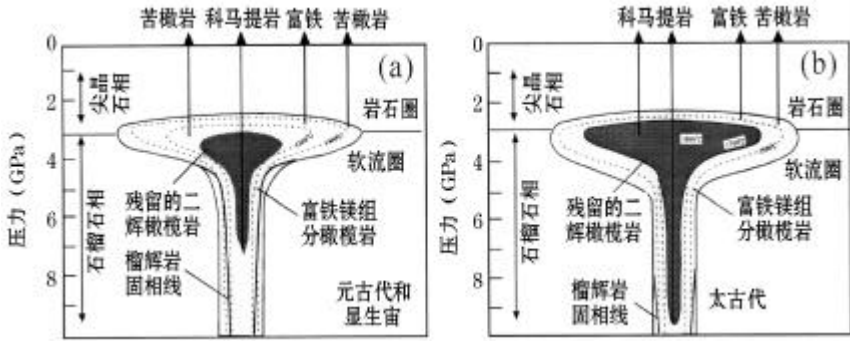


图 5 (a) 太古代和(b)元古代、显生宙地幔柱头部的热、物质组成简图^[26]

Fig.5 Schematic illustration to show the simplified thermal and compositional structure of (a)Archean, and (b) Proterozoic and Phanerozoic mantle plume starting heads

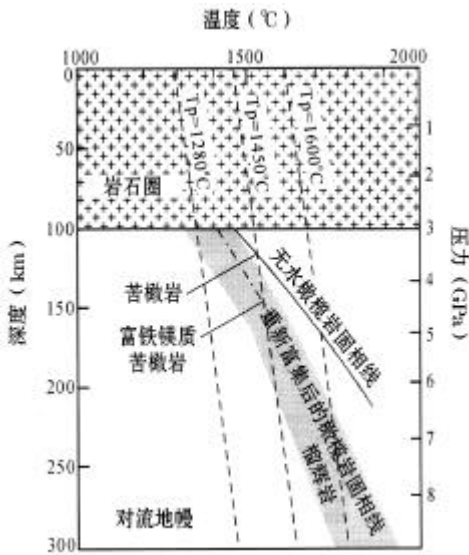


图 6 富集的橄辉岩、重新富集的橄辉岩、榴辉岩地幔的固相线图解^[53]

Fig.6 P-T plot showing solidi for anhydrous fertile peridotite (Hirschmann, Geoscience), 're-fertilised' peridotite and eclogite^[53]

3 研究意义和展望

岩浆作用过程在全球的地球化学循环和板块构造运动中占据非常重要的作用^[14]，因此，理解岩浆作用过程对于理解全球地球化学循环和板块构造运动以及地球动力学机制具有非常重要的意义。火山岩和侵入岩作为岩浆过程的产物，其成因的研究可以提供整个岩浆作用过程的重要信息^[14]。因此，无论哪种岩浆演化趋势形成的岩石对于理解全球地球化学循环和板块构造运动以及地球动力学机制都是

非常重要的。虽然目前的研究资料表明，岩浆朝富铁、贫硅的趋势 (Fenner trend) 演化不像朝富硅、贫铁趋势 (Bowen trend) 演化容易，也非常罕见。但是，越来越多的研究也表明，高铁镁质岩石不仅在洋底或洋中脊离散板块边界^[6, 38]和大陆溢流玄武岩区^[19-28]发育，而且在蛇绿混杂岩中辉长岩^[45]、前寒武纪绿岩带^[16, 55]和基性岩墙群^[66]中都有高铁贫硅岩石的报道。因此，作为一种地球上存在的、与 Bowen 趋势不同的富铁岩浆演化趋势 (Fenner trend) 其成因机制的研究，对理解其岩浆深部构造背景、早期壳—幔演化、下地幔组成的不均一性和核幔相互作用有着非常重要的意义，也为最近在我国南太行山及其它地方发现的富铁镁质岩石的成因的研究提供极其重要的依据。

随着高铁镁质岩石的不断发现和资料的逐渐积累，以及实验岩石学方法和技术的逐步提高和改进，高铁镁质岩石的成因研究已经从最初的理论探讨向深入的实验岩石学的研究发展。但是，要全面深入地理解地球演化的各个阶段的热状态、深部的物质结构、深部动力学机制以及壳—幔相互作用过程，必须在以下几个方面继续开展新的工作：

- (1) 系统收集已有的研究资料，详细归纳出各类高铁镁质岩石的岩石类型，帮助更好的了解各类岩石产出的构造背景以及与正常岩浆演化系列之间的关系。
- (2) 利用新的实验岩石学方法和技术以及实验条件，对各类高铁镁质岩石进行系统的实验岩石学研究，探讨形成这种较罕见的岩石的温压和氧逸度条件，及其与地球演化之间的内在联系。
- (3) 进一步开展我国高铁镁质岩石的研究，尤

其是对于经历过复杂地质作用的华南陆块内部及其周边中—新元古代高铁镁质岩石的研究,有利于深入了解新元古代时期 Rodinia 超大陆的拼合和裂解的深部动力学机制和过程,以及 Rodinia 超大陆的裂解是否与超级地幔柱(superplume)有关等。

4 结 论

高铁镁质岩石(Ferrobasalts/Ferropicrites)较正常镁质岩石高 FeO^+ (通常在 14% 以上)、贫硅、低碱,具独特主量元素特征,属富铁拉斑玄武岩—富铁苦橄岩。虽然与自然界中普遍发育的具 Bowen 趋势的低铁富硅熔体不同,且非常罕见,但是,越来越多的研究表明,这种高铁镁质岩石不仅在洋底或洋中脊离散板块边界和大陆溢流玄武岩区发育,而且在蛇绿混杂岩中辉长岩、前寒武纪绿岩带和基性岩墙群中也存在高铁贫硅的岩石。关于其岩石成因,目前主要有以下认识: 低压条件下俯冲板片/受到俯冲交代的上覆地幔楔的大比例部分熔融; 普通洋脊型玄武岩在封闭系统中简单的分离结晶作用;

地幔柱头前锋富铁组分(Fe-rich streaks in mantle plume starting heads)的部分熔融。这种高铁镁质岩石成因机制的研究对于理解其岩浆深部构造背景、早期壳—幔演化、下地幔组成不均一性和核幔相互作用有着重要意义,同时,对于最近在我国南太行山地区及其它地区发现的具有高铁镁特征岩石的研究具有极其重要的意义。

参考文献(References):

- [1] Osborn E F. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magmas[J]. *American Journal of Science*, 1959, 257: 609-647.
- [2] Bowen N L. *The Evolution of the Igneous Rocks*[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1928.
- [3] Fenner C N. The crystallization of basalt[J]. *American Journal of Science*, 1929, 18: 223-253.
- [4] Wiebe R A. Fractionation and liquid immiscibility in an anorthositic pluton of the Nain Complex, Labrador[J]. *Journal of Petrology*, 1979, 20: 239-269.
- [5] Ludden J N, Thompson G, Bryan W B, et al. The origin of lavas from the Ninetyeast Ridge, Eastern Indian Ocean: An evaluation of fractional crystallization models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85: 4405-4420.
- [6] Fomari D J, Perfit M R, Malahoff A, et al. Geochemical studies of abyssal lavas recovered by DSRV Alvin from the Eastern Galapagos Rift, Inca Transom and Ecuador Rift. 1. Major element variations in natural gases and spatial distribution of lavas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 519-529.
- [7] Simon J M, Wilson D S, Christie D M, et al. Petrologic consequences of rift propagation on oceanic spreading ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62: 193-207.
- [8] Le Roex A P, Dick H J B. Petrography and geochemistry of basaltic rocks from the Conrad fracture zone on the America-Antarctica Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 54: 117-138.
- [9] Le Roex A P, Dick H J B, Reid A M, et al. Ferrobasalts from the Spies Ridge segment of the Southwest Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 60: 437-451.
- [10] Brooks C K, Nielsen T F D. The East Greenland continental margin: A transition between oceanic and continental magmatism[J]. *Geological Society of London Journal*, 1982, 139: 265-275.
- [11] Bloomer S H, Natland J H, Fisher R L. Mineral relationships in gabbroic rocks from fracture zone of Indian Ocean ridges: Evidence for extensive fractionation, parental diversity and boundary layer recrystallization[A]. In: Saunders D D, Norry M T, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42: 107-124.
- [12] Chalokwu C I, Ariskin A A, Koptev-Dvornikov E V. Magma dynamics at the base of an evolving mafic magma chamber: Incompatible element evidence from the Partridge River intrusion, Duluth Complex, Minnesota, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(24): 4997-5011.
- [13] Lachize M, Lorand J P, Juteau T. Calc-alkaline differentiation trend in the plutonic sequence of the Wadi Haymiliyah section, Hailayn massif, Semalophiolite, Oman[J]. *Lithos*, 1996, 38: 207-232.
- [14] Brooks C K, Larsen L M, Nielsen T F D. Importance of iron-rich tholeiitic magma at divergent plate margins: A reappraisal[J]. *Geology*, 1991, 19: 269-272.
- [15] Leybourne M L, Van Wagoner N A, Ayres L D. Chemical stratigraphy and petrogenesis of the early Proterozoic Amisk Lake volcanic sequence, Flin Flon-Snow Lake Greenstone Belt, Canada[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38: 541-564.
- [16] Leybourne M L, Wagoner N V, Ayres L. Partial melting of a refractory subducted slab in a paleoproterozoic island arc: Implications for global chemical cycles[J]. *Geology*, 1999, 27(8): 731-734.
- [17] Liao Chaolin, Wang Yuejun, Peng Touping. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of paleoproterozoic mafic dykes from Southern Taihang Mountains and its geological significance[J]. *Geotectonic and Metallogenia*, 2003, 27(4): 354-361. [廖超林, 王岳军, 彭头平. 太行山南段早元古代基性岩脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4): 354-361.]
- [18] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Geochemical, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang mountains and implications for the ca. 1800 Ma event of the North China Craton[J]. *Precambrian Research* 2004, 135: 55-77.

- [19] Hanski E J, Smolkin V F. Iron and LREE-enriched mantle source for early Proterozoic intraplate magmatism as exemplified by the Pechenga ferropicrites, Kola Peninsula, Russia[J]. *Lithos*, 1995, 34: 107-125.
- [20] Stone W E, Crockett J H, Dickin A P, et al. Origin of Archean ferropicrites geochemical constraints from the Boston Creek flow, Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada[J]. *Chemical Geology*, 1995, 121: 51-71.
- [21] Stone W E, Jensen L S, Church W R. Petrography and geochemistry of an unusual Fe-rich basaltic komatiite from Beaton Township, northeastern Ontario, Canada[J]. *Journal of Earth Science*, 1987, 24: 2 537-2 550.
- [22] Wooden J L, Czamanske G K, Fedorenko V A, et al. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Norilsk area, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 3 677-3 704.
- [23] Lightfoot P C, Naldrett A J, Gorbachev N S, et al. Geochemistry of Siberian trap of the Norilsk area, USSR, with implications for the relative contributions of crust and mantle to flood basalt magmatism[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1990, 104: 631-644.
- [24] Storey M, Mahoney J J, Saunders A D. Cretaceous basalts and the transition between plume and continental lithosphere mantle sources[J]. *Geophysical Monograph*, 1997, 100: 95-122.
- [25] Ewart A, Milner S C, Armstrong R A, et al. Etendeka volcanism of the Gabbroeb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: Geochemical evidence of early Cretaceous Tristan plume melts and the role of crustal contamination in the Pan-Etendeka CFB[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 191-225.
- [26] Gibson S A. Major element heterogeneity in Archean to Recent mantle plume starting-heads[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195: 59-74.
- [27] Gibson S A, Thompson R N, Dickin A P. Ferropicrites: geochemical evidence for Fe-rich streaks in upwelling mantle plumes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 174: 355-374.
- [28] Xu Yigang, Mei Houjun, Xu Jifeng, et al. Origin of two differentiation trends in the Emeishan flood basalts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 383-387. [徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 等. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因[J]. *科学通报*, 2003, 48(4): 383-387.]
- [29] Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Hu Yaoguo, et al. Discovery of Yanhe copper deposit in the Yunnan-Guizhou border area and a new train of thought for copper prospecting in the larger igneous province of Emeishan flood basalts[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(6): 912-917. [朱炳泉, 常向阳, 胡耀国, 等. 滇-黔边境鲁甸沿河铜矿床的发现与峨眉山大火成岩省找矿新思路[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 912-917.]
- [30] Brooks C K, Nielsen T F D. Early stages in the differentiation of the Skaergaard magma as revealed by a closely related suite of dike rocks[J]. *Lithos*, 1978, 11: 1-14.
- [31] Hals H C, Li J H, Davis D, et al. A precisely dated Proterozoic palaeomagnetic pole from the North China craton, and its relevance to palaeocontinental reconstruction[J]. *Geophysical Journal of International*, 2000, 143: 185-203.
- [32] Hou Guiting, Li Jianghai, Qian Xianglin. Geochemical characteristics and tectonic setting of Mesoproterozoic dyke swarms in northern Shanxi[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 352-357. [侯贵廷, 李江海, 钱祥麟. 晋北地区中元古代岩墙群的地球化学特征和大地构造背景[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 352-357.]
- [33] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Structural evolution and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Zanhuang metamorphic domain in North China Craton: Constraints on Paleoproterozoic tectonothermal overprinting[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 159-182.
- [34] McCulloch M T. The role of subducted slabs in an evolving earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 115: 89-100.
- [35] Tatsumi Y, Kogiso T. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust. 2. Origin of chemical and physical characteristics in arc magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 207-221.
- [36] Yagodninski G M, Kelemen P B. Slab melting in the Aleutians: Implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 158: 53-65.
- [37] Clague D A, Frey F A, Thompson G, et al. Minor and trace element geochemistry of volcanic rocks dredged from the Galapagos Spreading Center: Role of crystal fractionation and mantle heterogeneity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 9 469-9 482.
- [38] Dickey J S, Frey F A, Hart S R, et al. Geochemistry and petrology of dredged basalts from the Bouvet triple junction, South Atlantic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41: 1 105-1 118.
- [39] Christie D M, Sinton J M. Evolution of abyssal lavas along propagating segments of the Galapagos Spreading Center[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 56: 321-335.
- [40] Kennedy G C. Equilibrium between volatiles and iron oxides in igneous rocks[J]. *American Journal of Science*, 1948, 246: 529-549.
- [41] Osborn E F. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magmas[J]. *American Journal of Science*, 1959, 257: 609-647.
- [42] Christie D M, Carmichael I S E, Langmuir C H. Oxidation states of mid-ocean ridge basalt glasses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79: 397-411.
- [43] Bryndzia L T, Wood B J, Dick H J B. The oxidation state of the Earth's sub-oceanic mantle from oxygen thermobarometry of abyssal spinel peridotites[J]. *Nature*, 1989, 341: 526-527.
- [44] Wood B J, Bryndzia C T, Johnson K E. Mantle oxidation state and its relation to tectonic environments and fluid speciation[J]. *Science*, 1990, 245: 337-345.
- [45] Juster T C, Grove T L, Perfit M R. Experimental constraints on the generation of Fe-Ti basalts, andesites and rhyodacites at the Galapagos spreading center, 85 °W and 95 °W[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 9 251-9 274.

- [46] Larsen L M , Watt W S , Watt M . Geology and petrology of the lower Tertiary plateau basalts of the Scoresby Sund region , East Greenland [J] . *Gr nlands Geologiske Unders gelse Bulletin* , 1989 , 157 : 164 .
- [47] Herzberg C , Zhang J Z . Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 : Compositions of magmas in the upper mantle and transition zone [J] . *Journal of Geophysical Research* , 1996 , 101 : 8 271-8 295 .
- [48] Polat A , Kerrich R , Wyman D A . The late Archean Schreiber-Hemlo and White River-Dayohessarah greenstone belts , Superior Province : Collages of Oceanic plateaus , oceanic arcs and subduction-accretion complexes [J] . *Tectonophysics* , 1998 , 294 : 295-326 .
- [49] Kerrich R , Polat A , Wyman D A , et al . Trace elements systematics of Mg- to Fe-tholeiitic basalt suites of the Superior Province : Implications for Archean mantle reservoirs and greenstone belt genesis [J] . *Lithos* 1999 , 46 : 163-187 .
- [50] Campbell I H , Griffiths R W . The changing nature of mantle hot spots through time : Implications for the chemical evolution of the mantle [J] . *Journal of Geology* , 1992 , 92 : 497-523 .
- [51] Crdery M J , Davies G F , Campbell L H . Genesis of flood basalts from eclogite-bearing mantle plumes [J] . *Journal Geophysical Research* , 1997 , 102 : 20 179-20 197 .
- [52] Takahashi E , Nakajima K , Wright T L . Origin of the Columbia River basalts : Melting model of a heterogeneous plume head [J] . *Earth and Planetary Science Letters* , 1998 , 162 : 63-80 .
- [53] Yaxley G M . Experimental study of the phase and melting relations of homogeneous basalt + peridotite mixtures and implications for the petrogenesis of flood basalts [J] . *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 2000 , 139 : 326-338 .
- [54] Yasuda A , Fujii T , Kurita K . Melting phase relations of anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa : Implications for the behaviour of subducted oceanic crust in the mantle [J] . *Journal of Geophysical Research* , 1994 , 99 : 401-414 .
- [55] Lafl ghe M R , Dupuy C , Bougault H . Geochemistry and petrogenesis of Archean mafic volcanic rocks of the southern Abitibi Belt , Quebec [J] . *Precambrian Research* , 1992 , 57 : 207-241 .
- [56] Phinney W C , Halls H C . Petrogenesis of the early Proterozoic Matachewan dyke swarm , Canada and implication for magma emplacement and subsequent deformation [J] . *Canada Journal of Earth Science* , 2001 , 38 : 1 541-1 563 .

THE SUMMARY ON A KIND OF RARE ROCK — FERROBASALTS / FERROPICRITES

PENG Tou-ping^{1,2} , WANG Yue-jun¹ , PENG Bing-xia^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510640 , China ;

2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China)

Abstract : High-Fe , magnesian rocks (Ferrobasalts/Ferropicrites) are characterized by high FeO⁺ contents (total Fe as FeO⁺) (generally >14%) , silica-poor , and low alkaline . These rocks belong to the tholeiitic-Ferropicritic series . The iron-rich and silica-poor liquids (the Fenner trend) , commonly different from the low iron and silica-rich liquids (the Bowen trend) , are rare on the earth surface . There are not the same , which can be used to explain their petrogenesis at present . Summing up the previous studies , the type of petrogenesis mainly include : (1) high degrees of partial melting of the dehydrated subducting slab or the overlying mantle wedge which has been metasomatized by the slab melt , at low pressure ; (2) simply crystal fractionation from common mid-ridge type basaltic magmas in closed or nearly closed system ; (3) Partial melting of high-Fe magnesian melts from mantle plume starting-heads . The study on the mechanism of petrogenesis of high-Fe magnesian magmas is important to understand the tectonic regime of magmas in depth , early evolution of crust , the heterogeneity of lower mantle and the interaction of core-mantle . Meanwhile , it is also most significant for us to understand the petrogenesis of high-Fe magnesian rocks discovered from southern Taihang Mountains and other regions , in China .

Key words : Ferrobasalts ; Ferropicrites ; Bowen trend ; Fenner trend ; Partial melting ; Crystal fractionation .