

贵州省梵净山地区玄武质与流纹质岩浆 液态不混溶的发现

陆晨明, 张传恒, 范启超

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

关键词: 梵净山地区; 液态不混溶; 玄武岩; 流纹岩

液态不混溶(liquid immiscibility)作为最重要的成岩成矿机制之一早就引起了学术界的关注(罗照华等, 2007)。但是, 自从阿波罗 11 号采集的月岩中首次发现自然条件下硅酸盐液态不混溶现象(Roedder et al., 1971)以来, 地球火成岩中成规模的液态不混溶现象并不多见, 涉及液态不混溶过程的论述大多数是基于其最终产物的解释。笔者等于 2016 年 3 月在贵州省梵净山地区(图 1)进行野外地质工作中发现了一种含有大量长英质团块的玄武岩(图 2a), 可能对于自然液态不混溶现象具有重要意义。本文对其地质学和岩石学特征作简要报道, 以期引起同行的关注。

1 区域地质背景

梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶出露于梵净山群肖家河组第二段(图 1)。据 1:5 万区域地质填图资料, 梵净山群主要为一套出露于黔东北地区、厚达万米、变形变质较强的火山岩、陆源碎屑岩系, 自下而上划分为余家沟组、肖家河组、回香坪组、铜厂组、洼溪组和独岩塘组, 可将其划分成 3 个部分: 自下而上依次是下碎屑岩系, 总厚大于 3180m, 包括淘金河组、余家沟组和肖家河组; 中部火山岩系, 厚度约 2500m, 包括回香坪组及铜厂组底部; 上碎屑岩系, 总厚大于 2760m, 包括铜厂组主体、洼溪组和独岩塘组。但笔者发现的液态不混溶出露于下碎屑岩系肖家河组第二段中, 因此肖家河组第二段可能也归属于中部火山岩系, 应该与回香坪组玄武岩为同一时期产物。

2 岩石学特征及岩性初定

露头尺度上(图 2a), 岩体是由两种岩相完全不同的部分组成: 主体部分为暗色的基性岩, 隐晶质结构, 块状构造, 具有喷出岩的特征; 浅色部分则是以“珠滴”构造存在的酸性岩, “珠滴”直径约 3~8mm, 分选性较好, 并透入性地分布在整个岩体中, 但分布并不是绝对均匀。

显微镜下观察后, 笔者发现梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶发生了绿片岩相变质(图 2), 不混溶基性岩部分主要由浅绿、绿至暗绿色的阳起石(约占玄武岩含量的 65%), 大部分呈纤维状、放射状集合体, 多色性随含铁量的增加而变深。基性岩与“珠滴”酸性岩边界上有不透明铁质(约占玄武岩含量的 15%), 常呈环带(图 2d)分布, 表明岩浆

热液在不混溶过程中金属元素发生迁移, 富集在基性岩一侧。玄武岩中剩余部分则为隐晶质结构的暗色矿物(约占玄武岩含量的 20%), 呈深灰至灰褐色, 主要为蚀变的黏土类矿物。“珠滴”内部的酸性岩斑晶大多已被细粒化, 并蚀变为其他次生矿物。图 2e 中细粒化的透长石斑晶无色透明, 矿物晶体形状残余, 局部蚀变成为不完全的绢云母(图 2e)。少量的斜长石斑晶残余也发生蚀变, 中心部分为干涉色二级蓝的葡萄石, 边缘为绢云母(图 2e)。图 2c 中存在残余的石英斑晶, 也已被细粒化。此外, 在单偏光镜下“珠滴”构造边缘还均为灰至深灰色的隐晶质, 可能有挥发分的损失。

根据以上描述, 笔者认为不混溶主体部分为玄武岩, “珠滴”部分为流纹岩。玄武岩作为一种基性喷出岩, 其化学成分与辉长岩和辉绿岩相似, 其主要矿物为基性长石和辉石, 次要矿物为橄榄石、角闪石和黑云母, 一般为黑色, 有时则为绿色。由于喷出岩冷却速度较快, 玄武岩通常呈细粒至隐晶质或玻璃质结构, 图中则以细粒至隐晶质结构为主。玄武岩在绿片岩相变质后, 其主要矿物辉石会蚀变为阳起石和绿泥石, 并伴随有不透明铁质析出。而流纹岩作为一种酸性喷出岩, 其化学成分与花岗岩相当, 但岩石组构方面差异明显。大多数流纹岩都具有斑状结构, 表明结晶作用在喷发作用以前就已开始, 但又具有喷出岩快速冷却的特点, 因而流纹岩既有大颗粒的斑晶又有隐晶基质。流纹岩斑晶主要为碱性长石(透长石)和石英, 有时有少量的斜长石(中长石), 辉石、角闪石和黑云母也可能存在。图中“珠滴”内部为斑状结构, 斑晶为透长石和石英, 流纹岩特征明显。

3 国内外相关研究

国外学者对硅酸盐液态不混溶的研究起步较早, 研究程度也相对较深。Roedder(1951)在实验中发现了富铁和富硅的液态不混溶现象, 在对地球和月球玄武岩晚期分离结晶的研究中 Roedder and Weiblen(1970)证实了硅酸盐液态不混溶的存在。随着研究的进展, McBirney(1975)发现了小规模含铁辉长岩自然岩体, 但其分离结晶的过程仍不清楚(Veksler et al., 2007)。从那以后对富铁玄武岩和流纹岩分离结晶的环境提出了两种论点: 其一火山喷发环境(De, 1974); 其二深成侵入环境(McBirney, 1975)。对其形成模式

注: 本文为中国地质调查局项目(编号: 1212011120115)的成果。

收稿日期: 2016-07-06; 改回日期: 2016-08-23; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.019

作者简介: 陆晨明, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 构造地质学专业。Email: luchenming@cugb.edu.cn。通讯作者: 张传恒, 男, 1962 年生。教授, 博士生导师。主要从事地层学、地构造学和沉积地质学教学、科研工作。Email: zhangch@cugb.edu.cn。

也提出了两种观点:

(1) 基于无水低压的结晶实验, Dixon 和 Rutherford (1979) 提出液态不混溶和富硅熔体的分离结晶可能使得洋中脊玄武岩形成斜长花岗岩, 并认为这一过程能潜在地形成大规模岩体。虽然在下部洋壳中发现了富氧化物的含铁辉长岩 (Dick et al., 1991), 但由于缺乏富铁的共生流体, 这种模式并不被认可。

(2) Charlier (2013) 等将硅酸盐液态不混溶识别为一种在无水低压条件下由拉斑玄武岩向流纹岩演化的过程。液态不混溶可以成为一种热力学的稳定过程, 而不是一种亚稳定的现象 (Irvine, 1976; Biggar, 1979)。世界范围内出现的珠滴不混溶构造都在玄武岩中 (De, 1974; Philpotts, 1982; Kontak et al., 2002), 且硅酸盐液态不混溶被一致认为是一种深成侵入环境下的缓慢冷却过程 (McBirney, 1975; Charlier et al., 2011; Namur et al., 2012)。现阶段相关学者一致认为富硅岩体与玄武岩系列关联密切, 并在冰岛、德干高原和斯内克河平原等地均已发现了相关地质现象 (Carmichael, 1964; Geist et al., 1995; Kerr et al., 1999)。有些学者认为斜长花岗岩也会出现在洋壳和蛇绿杂岩中 (Coleman and Peterman, 1975)。这些流纹岩和斜长花岗岩被解释为主体岩

浆在分离结晶过程的晚期由残余流体形成 (Berndt et al., 2005), 是一种脱水产物。同时, Charlier (2013) 也认为在无水低压条件下硅酸盐液态不混溶能够形成, 并且能够大规模地在拉斑玄武岩浆分离结晶过程的晚期形成富硅的熔融体。

国内部分学者对液态不混溶的研究起步虽晚, 但却有不同的认识。查阅相关文献后笔者等认为, 液态不混溶应当与液态不混合相区分: 不混溶表示原始条件下为同一流体相, 在岩浆演化过程中温度压力条件的改变使得原始流体相发生分离结晶作用, 产生了两种不同流体相, 且这两种流体相并未因粘度和密度的差异产生分层, 而是仍然在某种尺度下透入性地相互混合; 不混合则表示原始条件下就为两种不同的流体相, 随着流体动力学条件的改变使得两种流体在某种尺度下发生了混合。在不同尺度下不混合也可以认为是岩浆的一种“混合作用”, 张旗等 (2007) 认为, mingling 一词指的就是参与混合的端元岩浆未完全混合均匀, 表现特征明显, 可以识别出岩浆团的大致轮廓、形态和成分。此外, 这种不混合与流体动力学条件密切相关, Burgisser (2005) 等人已在实验中进行了模拟。

4 讨论

基于梵净山地区液态不混溶的岩石特征和国内外相关

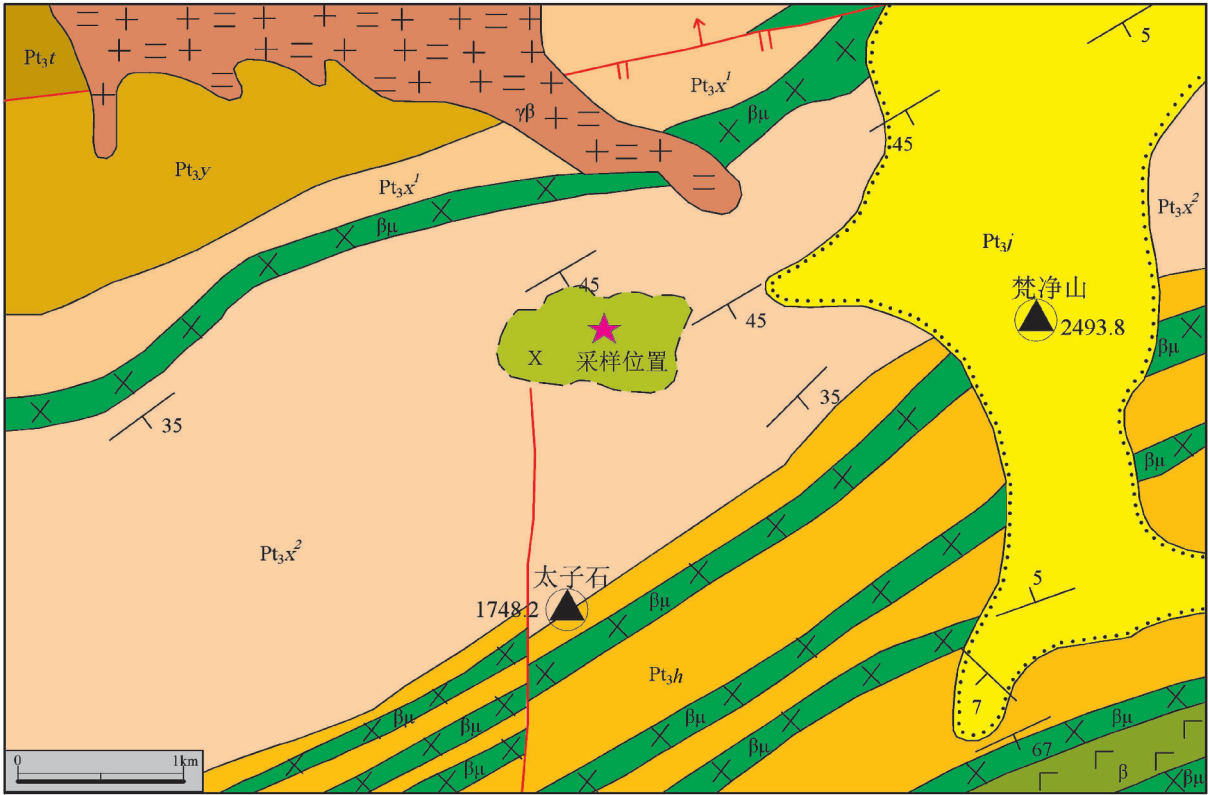


图 1 梵净山地区地质图及采样位置图

Fig. 1 Geological map of Fanjingshan area and sample location

新元古界: Pt_3t —淘金河组; Pt_3y —余家沟组; Pt_3h —回香坪组; Pt_3x^1 —肖家河组一段; Pt_3x^2 —肖家河组二段; Pt_3j —甲路组;
 $\beta\mu$ —辉绿岩 (新元古代); β —玄武岩 (新元古代); $\gamma\beta$ —白云母花岗岩 (新元古代); X—液态不混溶
Neoproterozoic: Pt_3t —Taojinhe Formation; Pt_3y —Yujiaogu Formation; Pt_3h —Huixiangping Formation; Pt_3x^1 —The first sation of Xiaojiahe Formation; Pt_3x^2 —The second sation of Xiaojiahe Formation; Pt_3j —Jialu Formation; $\beta\mu$ —Diabase (Neoproterozoic); β —Basalt (Neoproterozoic); $\gamma\beta$ —Muscovite-granite (Neoproterozoic); X—Liquid immiscibility

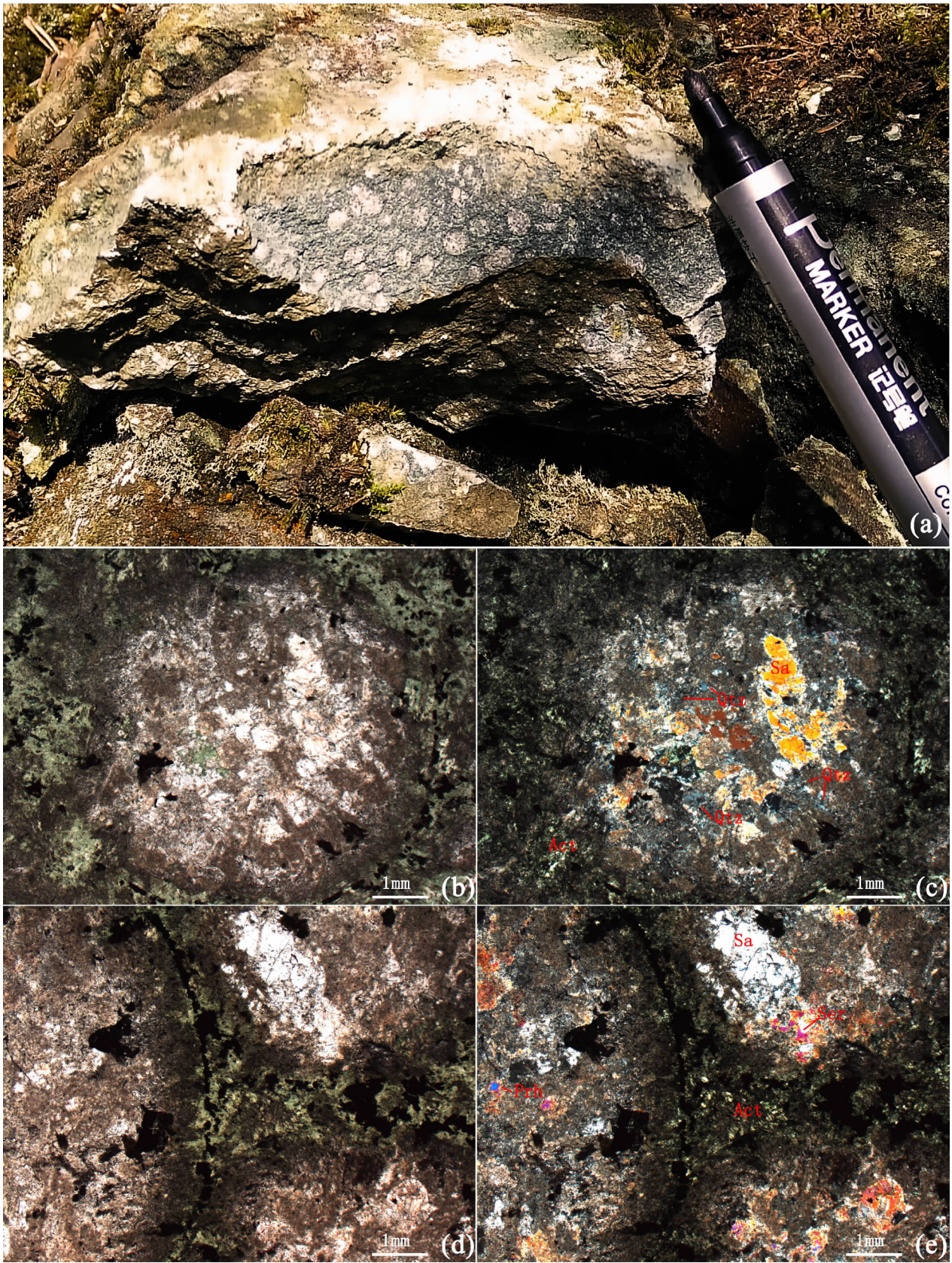


图 2 梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶野外露头及显微照片
Fig. 2 Outcrop and photomicrographs of basaltic—rhyolitic magma liquid immiscibility in Fanjingshan area

(a) 玄武质与流纹质岩浆液态不混溶野外露头;(b) 玄武质与流纹质岩浆液态不混溶显微照片,单偏光;(c) 玄武质与流纹质岩浆液态不混溶显微照片,正交偏光;(d) 玄武质与流纹质岩浆液态不混溶显微照片,单偏光;(e) 玄武质与流纹质岩浆液态不混溶显微照片,正交偏光; Act—阳起石;Sa—透长石;Ser—绢云母;Prh—葡萄石;Qtz—石英
(a) Outcrop of basaltic—rhyolitic magma liquid immiscibility; (b) Photomicrograph of basaltic—rhyolitic magma Liquid immiscibility, plian polarizer and transmitted light; (c) Photomicrograph of basaltic—rhyolitic magma Liquid immiscibility, cross polarizer and transmitted light; (d) Photomicrograph of basaltic—rhyolitic magma Liquid immiscibility, plian polarizer and transmitted light; (e) Photomicrograph of basaltic—rhyolitic magma Liquid immiscibility, cross polarizer and transmitted light; Act—Actinolite; Sa—Sanidine; Ser—Sericite; Prh—Prehnite; Qtz—Quartz

研究进展,笔者等有以下几点思考:

(1)Charlier 等(2013)观点认为,富铁和富硅的液态不混溶是深成侵入环境下缓慢冷却的结果,是在无水低压条件下由拉斑玄武岩向流纹岩转化的过程,也是热力学的稳定过程。但笔者于梵净山群中发现的玄武质与流纹质岩浆液态

不混溶规模较小,且与 Charlier 等(2013)研究下的不混溶构造形式差异明显(图 3),是一种完全不同的液态不混溶类型。液态不混溶在原始条件下就为同一流体相,是分离结晶作用的结果。从岩相学的角度讲梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶符合这种形成模式,但其流纹岩边部发育

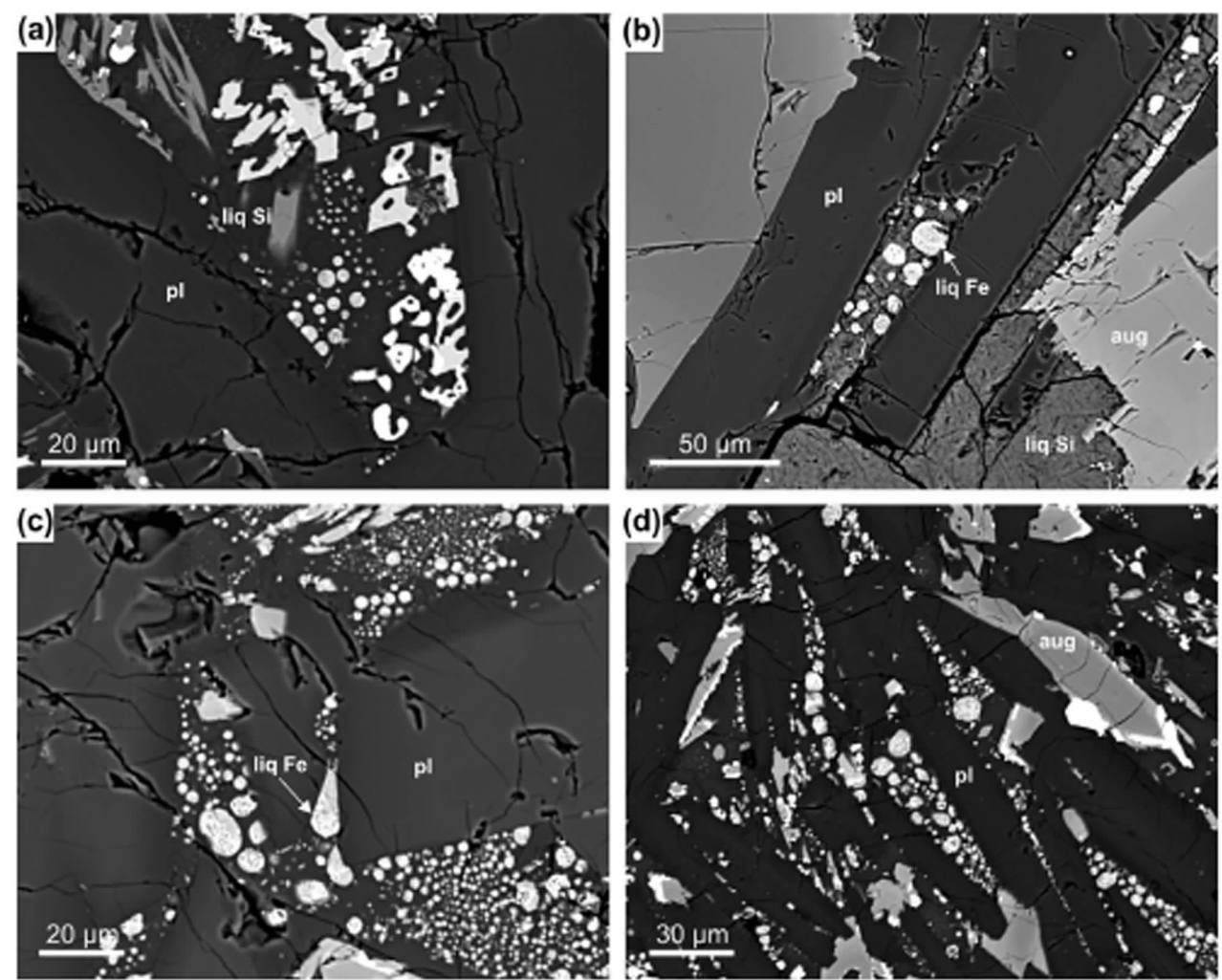


图 3 火山岩中不混溶结构的背散射电子显微照片(摘自 Charlier et al. ,2013)
Fig. 3. Back-scattered electron images of immiscible textures in volcanic rocks(Charlier et al. ,2013)
(a) 麦金尼玄武岩,位于爱荷达州境内斯内克河与马来德河交汇部位;(b) 橄榄玄武岩,采自孟买坦萨境内堡撒采石场的德干玄武岩;(c) 玄武岩,采自冰岛;(d) 安山岩,采自冰岛境内 1845 年喷发的赫克拉火山熔岩;liq Si—富硅不混溶液体;liq Fe—富铁不混溶液体;pl—斜长石;aug—普通辉石
(a) McKinney basalt,Snake River Plain, Malad river at junction with Snake River, Idaho; (b) Olivine basalt from Blowsa quarry, Tansa, Bombay, Deccan traps; (c) Basalt from Jokulsa a Fjo'llum, Iceland; (d) Andesite from the 1845 lava of Hekla volcano, Iceland; liq Si—Silica-rich immiscible liquid; liq Fe—Iron-rich immiscible liquid; pl—Plagioclase; aug—Augite

有冷凝边,且不混溶尺度差别巨大,这些依据又都在支持不混合模式。

(2)不混合的核心观点是原始条件下即为两种流体相,是流体动力学条件改变的结果。相对于基性岩而言,酸性岩的 SiO_2 较高含量,但温度较低,是两种不同温度条件下的岩相(张旗,2007)。上文中已描述过梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶的岩相组成,暗色的基性岩为主体,浅色的酸性岩则以“珠滴”构造存在,两种不同温度条件下的岩相共存本身就是一对矛盾体。

(3)对梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶综合分析后发现,两种形成模式都不完全符合,因而需要进一步的研究工作。在以后的研究中我想借鉴“两条腿”走路思维方式:其一利用 X 光和 EBSD 分别进行矿物相和粒度分布的鉴定,其二利用化学分析进行主微量元素和同位素测试,笔者等将借助这两种方式恢复梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶的形成模式。

5 研究意义

国外学者 Charlier 等(2013)认为,硅酸盐液态不混溶是拉斑玄武岩浆在无水低压条件下分离结晶过程的晚期形成的中间产物,但是他们并没有证实硅酸盐在不混合模式下无法形成相似产物。笔者等认为,贵州省梵净山地区玄武质与流纹质岩浆液态不混溶可能会对硅酸盐液态不混合的提出提供重要依据,同时可能对于完善和补充硅酸盐液态不混溶理论具有重要意义。

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)
- 罗照华,黄忠敏,柯珊. 2007. 花岗岩岩石的基本问题. 地质论评, 53 (增刊):180 ~ 226.
- 张旗,潘国强,李承东,金惟俊,贾秀勤. 2007. 花岗岩混合问题:与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一. 岩石学报, 23 (5):1141 ~ 1152.
- Biggar G M. 1979. Immiscibility in tholeiites. Mineral. , Mag. , 43: 543 ~ 544.
- Burgisser A. 2005. Addressing complexity in laboratory experiments: the scaling of dilute multiphase flows in magmatic systems. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 141:245 ~ 265.
- Berndt J, Koepke J and Holtz F. 2005. An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 MPa. J. Petrol. , 46:135 ~ 167.
- Charlier B, Namur O and Timothy L G. 2013. Compositional and kinetic controls on liquid immiscibility in ferrobasalt—rhyolite volcanic and plutonic series. Geochimica et Cosmochimica Acta, 113:79 ~ 93.
- Charlier B. 2011. Large-scale silicate liquid immiscibility during differentiation of tholeiitic basalt to granite and the origin of the Daly gap. Geology, 39:907 ~ 910.
- Coleman R G and Peterman Z E. 1975. Oceanic plagiogranite. J. Geophys. Res. , 80:1099 ~ 1108.
- Carmichael I S E. 1964. The petrology of Thingmuli, a tertiary volcano in eastern Iceland. J. Petrol. , 5:435 ~ 460.
- De A. 1974. Silicate liquid immiscibility in the Deccan traps and its

- petrogenetic significance. Geol. Soc. Am. Bull. , 85:471 ~ 474.
- Dixon S and Rutherford M J . 1979. Plagiogranites as late-stage immiscible liquids in ophiolite and mid-ocean ridge suites: an experimental study. Earth Planet. Sci. Lett. , 45:45 ~ 60.
- Dick H J B, Meyer P S, Bloomer S, Kirby S, Stakes D and Mawer C. 1991. Lithostratigraphic evolution of an in-situ section of oceanic layer 3. In: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 118. Von Herzen R, Robinson P T, et al. eds. College Station, TX: 439 ~ 538.
- Geist D , Howard K A and Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation —— the basalt—rhyolite association at Volcan—Alcedo, Galapagos—Archipelago. J. Petrol. , 36:965 ~ 982.
- Irvine T N. 1976. Metastable liquid immiscibility and MgO—FeO—SiO_2 fractionation patterns in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{—Fe}_2\text{SiO}_4\text{—CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{—KAlSi}_3\text{O}_8\text{—SiO}_2$. Carnegie Institution of Washington Yearbook, 75: 597 ~ 611.
- Kerr A C, Kent R W, Thomson B A, Seedhouse J K and Donaldson C H . 1999. Geochemical evolution of the Tertiary Mull volcano, western Scotland. J. Petrol. , 40: 873 ~ 908.
- Kontak D J, De Wolfe De Young M Y and Dostal J. 2002. Late-stage crystallization history of the Jurassic North Mountain Basalt, Nova Scotia, Canada. I. Textural and chemical evidence for pervasive development of silicate—liquid immiscibility. Can. Mineral, 40: 1287 ~ 1311.
- Luo Zhaohua, Huang Zhongmin, Ke Shan. 2007&. An overview of granitoid. Geological Review, 53(suppl.): 180 ~ 266.
- McBirney A R. 1975. Differentiation of the Skaergaard intrusion. Nature, 253: 691 ~ 694.
- Namur O, Charlier B and Holness M. 2012. Dual origin of Fe—Ti—P gabbros by immiscibility and fractional crystallization of evolved tholeiitic basalts in the Sept Iles layered intrusion. Lithos, 154: 100 ~ 114.
- Philpotts A R . 1982. Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks. Contrib. Mineral. Petrol. , 80: 201 ~ 218.
- Roedder E W. 1951 Low temperature liquid immiscibility field in the system $\text{K}_2\text{O—FeO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$. Am. Mineral, 36: 282 ~ 286.
- Roedder E and Weiblen P W. 1970. Lunar petrology of silicate melt inclusions, Apollo 11 rocks. Geochim. Cosmochim. Acta, 1 (Suppl. 1) : 507 ~ 528. Roedder E and Weiblen P W. 1971. Petrology of silicate melt inclusions, Apollo 11 and Apollo 12 and terrestrial equivalents. Geochim. Cosmochim. Acta, 1(Suppl. 2) : 507 ~ 528.
- Veksler I V, Dorfman A M, Borisov A A, Wirth R and Dingwell D B. 2007. Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magma. J. Petrol. , 48:2187 ~ 2210.
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2007&. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing —— new viewpoints on granitic magma mixing process; some crucial questions on granite study. Acta Petrologica Sinica, 23(5) :1141 ~ 1152.

LU Chenming, ZHANG Chuanheng, FAN Qichao: Discovery of Basaltic—Rhyolitic Magma Liquid Immiscibility in Fanjing Mountain Area, Guizhou Province

Keywords: Fanjing Mountain; magma liquid immiscibility; basalt; rhyolite

Doi: 10.16509/j. georeview. 2016. 05. 019