

钾玄质系列岩石的研究现状

贾小辉^{1,2)}, 王晓地^{1,2)}, 杨文强¹⁾, 牛志军¹⁾

1) 中国地质调查局武汉地质地质调查中心, 武汉, 430223;

2) 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉, 430223

内容提要: 钾玄质系列岩具有特殊的矿物学和地球化学特征, 并具有重要的构造及成矿意义, 自命名以来备受关注, 但仍有许多问题存在较大争议, 如岩石类型扩大化、是否存在壳源成因、板内环境如何判别等等。本文从以下几方面对钾玄质系列岩进行了系统总结: ① 作为一个独立的岩石系列, 钾玄质系列岩仍缺失明确有效的岩石学、矿物学和地球化学等判别指标, 相对统一的标准亟待建立; ② 与岛弧有关的钾玄质系列岩表现为高度富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 具有显著地 TNT 异常 (Ta—Nb—Ti); 大洋板内钾玄质系列岩具有典型的洋岛玄武岩 (OIB) 的微量元素特征; 大陆板内钾玄质系列岩石兼具岛弧型和 OIB 型微量元素特征; ③ 低硅钾玄质岩 (SiO_2 不大于 63%) 应当主要源于地幔源区, 高硅钾玄质岩主要源于地壳源区, 但更多情况下是二者的混合。

关键词: 钾玄质岩; 地球化学; 岩石成因; 实验岩石学

自 Iddings (1895) 命名 Shoshonitic 系列火山岩之后, 有关钾玄质系列岩石的特征、岩石成因及构造意义等方面得到了广泛的研究和讨论 (如, Jackes and White, 1972; Morrison, 1980; Müller and Groves, 1993; Bitencourt and Nardi, 2004; Zhao Zhenhua et al., 2009; Yang Wubi et al., 2012a; 李献华等, 2000, 2001; 章邦桐等, 2001, 2011; 赵振华等, 2007; 吴俊奇等, 2011; 邓晋福等, 2015a, b, 等等)。特殊的岩石类型、岩石成因及其产出的构造环境 (空间上远离海沟, 多发育于较成熟的陆弧, 少量发育于板内) 及成矿作用是这类岩石备受关注的主要原因 (Daniel et al., 2002; Sillitoe, 2002)。本文详细介绍了钾玄质系列岩石的概念, 系统总结了其岩石学、矿物学、地球化学特征及其研究进展, 并依据实验岩石学方面的研究对其岩石成因进行制约。

1 钾玄质岩的研究进展

1.1 概念

钾玄质 (Shoshonitic) 系列火山岩由 Iddings (1895) 在研究美国黄石公园 Shoshone 河地区中基性火山岩时发现命名的, 主要包括: ① 粗玄岩 (Absarokite), $\text{SiO}_2 = 45\% \sim 52\%$; ② 钾玄岩 (Shoshonite), $\text{SiO}_2 = 52\% \sim 57\%$; ③ 安粗岩

(Banakite), $\text{SiO}_2 = 57\% \sim 63\%$ 。在很长的时间里, 钾玄岩被归属于高钾钙碱性系列火山岩; Bates 和 Jackson (1980) 在美国地质词典中将钾玄岩定义为粗面安山岩 (trachyandesite); Jackes 和 White (1972) 和 Morrison (1980) 按岩相学、岩石化学和微量元素特征将中性火山岩划分为钙质、钙碱质 (低钾、正常和高钾) 和钾玄岩三个系列。经过近 40 年的研究, 钾玄岩系列火山岩已被国际岩石学界确认为一套与钙碱性系列并列的独立的火山岩组合 (王德滋等, 1991, 1996; 章邦桐等, 2011)。

随着研究的深入, 在岩石化学成分上与钾玄岩系列火山岩相当的侵入岩和具有钾玄质系列岩石特征的酸性火成岩中也归属于钾玄质系列 (Duchesen et al., 1998; Jiang et al., 2002; Bitencourt and Nardi, 2004; 马昌前等, 1999; 王建等, 2003), 使得钾玄质系列岩石包括了更加多样的岩石类型。钾玄岩系列岩石是指 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 5\%$, 当 SiO_2 为 50% 和 55% 时, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 分别大于 0.6 和 1.0, TiO_2 大多数小于 1.3%, Al_2O_3 含量高且变化范围大 (14% ~ 19%), 常强烈富集大离子亲石元素和轻稀土元素等 (Müller and Groves, 1993, 1995)。目前, 对于钾玄质系列岩石的岩性、所包括化学组分范围及由此引发的岩石命名的争议仍然存在, 与上述可以涵盖酸性岩石组

分的钾玄质系列岩石的观点相反,一些学者更加倾向于遵循初始定义($\text{SiO}_2 = 52\% \sim 57\%$, 系列岩石可以是 $45\% \sim 63\%$), 而不宜仅根据岩石 K_2O 含量及(或)稀土元素、微量元素等地球化学特征进行定名分类, 以避免不适当的“扩大化”(邓晋福等, 1999, 2005a; 徐志刚等, 1999; 章邦桐等, 2011)。Scarrow 等(2008)通过对全球范围内的钾玄岩(shoshonite)、磷英黑云二长岩(vaugnerite)和煌斑岩/云煌岩(lamprophyre/minette)的系统对比研究, 它们在微量元素地球化学及 Sr—Nd 同位素组成等方面均具有较显著的差异, 认为这些岩石表现的相似性只是表面现象, 因此不能简单地依据 SiO_2 — K_2O 判别图解而认为后者属于钾玄质系列岩石, 即超钾质岩不等同钾玄岩。超钾质岩具有特定的成分空间: $\text{K}_2\text{O} > 3\%$, $\text{MgO} > 3\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$ (Foley et al., 1987), 且常包括部分低硅岩石($\text{SiO}_2 < 40\%$, 如白榴岩(leucite)、钾镁煌斑岩(lamproite)和钾霞橄黄长岩(kamafugite)等。但对于那些共生的、具有相似的元素及同位素地球化学特征的超钾质岩和钾玄质岩而言, 似乎很难严格区分, 如土耳其的 Pontides (Eyuboglu et al., 2011) 岩套。事实上, 钾质和超钾质岩石往往密不可分, 且存在过渡组分(向硅不饱和和演化), 共同组成一套特殊的岩石, 常出于后碰撞弧环境, 其中钾质(部分超钾质)与典型的钾玄岩相当。在相关研究中, 学者常以钾质—超钾质岩来称谓, 进而淡化了钾玄岩的概念(如, Miller et al., 1999; Guo Zhengfu et al., 2006, 2013; Avanzinelli et al., 2009; Huang Xiaolong et al., 2010)。从这个意义上来讲, 钾玄质系列岩石和钾质—超钾质岩的实质部分重叠, 其概念差异和相互关系却相当模糊, 但即使是共生的钾质—超钾质岩组合, 其超钾质和钾质组分的源区组成也存在较显著的差异, 超钾质常强调富集型方辉橄岩地幔源区的部分熔融, 而钾质则强调陆源沉积物的再循环交代地幔部分熔融或侵位过程中陆壳组分的混染作用(Avanzinelli et al., 2009; Huang Xiaolong et al., 2010), 过渡组分则更偏重于超钾质端元, 可能源自交代地幔楔部分熔融形成的富碱熔体, 而非流体的交代作用(Bailey et al., 1989)。更模糊或概念重叠更为严重的是钾玄质系列岩和钾质岩, 很多时候被作为同一概念来论述, 包括“shoshonitic”、“K-rich”、“high-K”、“Potassic”等表述, 而钾质岩的基本概念则为“ $\text{K}_2\text{O} > [\text{Na}_2\text{O} - 2\%]$ (Le Maitre, 1989) 或 $0.5 < \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 2$ (Turner et al., 1996)”, 显然钾质岩的概念约

束更少, 包含的范围更广泛, 囊括了从钙碱性火山相关的钾玄质系列岩到超钾质白榴岩(leucite) (Foley and Peccerillo, 1992)。钾玄质系列岩石的另一延伸是富钾火山岩, 二者在概念上重叠交叉, 富钾火山岩的最主要岩石组合类型均可归属钾玄质系列岩(邱检生等, 2003), 且包括部分中基性的高钾钙碱性火山岩和含白榴石的超钾质火山岩(Foley and Peccerillo, 1992; Müller and Groves, 1995)。

总之, 钾玄岩已在其最初定义的基础上有了很大的扩展, 对于一些与钾玄岩具有类似特征的岩石, 统称之为“钾玄质系列岩石”可能更为合适, 较之“钾玄岩”或“玄粗岩”范围更广(章邦桐等, 2011), 至少包括了与粗玄岩、钾玄岩和安粗岩相当的中基性岩($\text{SiO}_2 = 45\% \sim 63\%$)及一些与之具成因联系的酸性岩石($\text{SiO}_2 > 63\%$)。

1.2 岩石学和矿物学特征

近年来, 不少学者将岩石化学成分上与钾玄岩系列火山岩相当的侵入岩(如, 石英二长岩、石英正长岩、正长岩、辉石正长岩、角闪正长岩)也归于钾玄岩系列, 使得钾玄岩成为包含了火山岩和侵入岩的独立完整的岩浆岩系列(李献华等, 1999, 2000, 2001; 陈志刚等, 2003; 贺振宇等, 2008; 章邦桐等, 2011; He Zhenyu et al., 2010)。章邦桐等(2011)明确指出钾玄岩是专指 $\text{SiO}_2 = 52\% \sim 57\%$ 的火山岩(侵入岩), 而钾玄岩系列的 SiO_2 变化范围应为 $45\% \sim 63\%$, 应遵循 Iddings (1895) 的初始定义。然而, 随着研究的深入, 一些学者将酸性火成岩中具有钾玄质系列岩石特征的相关岩石也归属于钾玄质系列(马昌前等, 1999; 王建等, 2003; Duchesen et al., 1998; Jiang Yaohui et al., 2002; Bitencourt and Nardi, 2004), 进而依据 SiO_2 含量将钾玄质系列岩石分为钾玄质玄武岩(shoshonitic basalt, $\text{SiO}_2 < 53\%$)、钾玄质玄武安山岩(shoshonitic basaltic andesite, $\text{SiO}_2 = 53\% \sim 57\%$)和钾玄质英安岩(shoshonitic dacite, $\text{SiO}_2 > 63\%$) (张树明等, 2005)。如, Eklund 等(1998)将分布于芬兰南部和俄罗斯 Karelia 地区长达 600 km 的一套双峰式侵入岩, 包括超基性岩、钙碱性岩、富钾煌斑岩到过铝质高 Ba、Sr 的花岗岩等, 定义为钾玄质系列岩石(shoshonitic series), 地球化学特征为 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 5\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 0.5$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 9\%$, SiO_2 范围变化非常之大($32\% \sim 78\%$)。东天山尾亚石英正长岩($\text{SiO}_2 = 62.67\% \sim 66.62\%$, $\text{MgO} = 0.34\% \sim 0.43\%$), 为硅过饱和(高硅)钾玄质岩, 具有与 A 型花岗岩特征相似(张遵忠等, 2006)。出

露于土耳其 Keban—Elazig 地区的一套正长岩—二长岩兼具 A 型花岗岩和钾玄岩的地球化学特征,被定义为 A 型钾玄质岩 (Akgul, 2015)。相山英安斑岩的 $\text{SiO}_2 = 66.73\% \sim 69.88\%$, $\text{MgO} = 0.35\% \sim 1.13\%$, 表现出与 OIB 相似的微量元素组成特征,也被认为是钾玄岩 (张树明等, 2005)。还有一些花岗岩被称为钾玄质花岗岩 (shoshonitic granite), 可以含有更高的 SiO_2 含量 ($\geq 72.0\%$), 在岩石学和地球化学特征上, 与传统的 I、S、A 和 M 型花岗岩不同 (Bitencount and Nardi, 2004), 且常与低硅钾玄质岩石共生 (如正长岩等), 可具有高的 Ba—Sr 含量, 被认为是经历流体改造或地壳熔体混染的脉状岩石圈地幔的部分熔融 (Jiang et al., 2006, 2012)、幔源富钾质岩浆或富闪深成岩 (appinitic) 岩浆经由同化混染和分异结晶过程的产物 (Fowler et al., 2001, 2008)。

同时, 与钾玄质系列岩石在时空上共生或联系紧密的岩石组合也得到了较为深入的研究 (如, Asiabanha et al., 2012)。在世界范围内, 一些钾玄质系列岩石 (多为正长岩) 通常与 A 型花岗岩类相伴生, 只是出露规模较小 (Eby, 1990), 常组成碱性岩石组合; 钾玄质系列岩石和 adakite (编者注: 有人译为“埃达克岩”, 但音译不符合汉语岩石学名词译法惯例, 如 rapakivite 和 shoshonite 均未音译。有著名岩石学家建议译为“高铽低钇中酸性岩”, 见杨建超等, 2007) 共生组合, 如土耳其北东部的 Pontides, 二类岩石空间上共生, 而时间上钾玄质系列岩石稍早 (81Ma), 它们分别代表了不同构造演化阶段的岩石学响应, 钾玄质系列岩石可能源自俯冲相关的富集型地幔而非沉积物再循环所代表的 EMII, 高铽低钇中酸性岩则形成于俯冲洋脊和板片窗过程, 源自更多亏损地幔端元组分的混合源区 (Eyuboglu et al., 2011); Ding Lixue 等 (2011) 所研究的秦岭造山带中段三叠纪老牛山钾玄质和高铽低钇中酸性岩 (228Ma) 杂岩中, 钾玄质岩则形成稍早 (215 ~ 217Ma), 被认为是古老下地壳部分熔融产生的熔体与富 K 镁铁质岩浆混合的结果, 而高铽低钇中酸性岩则被认为是加厚大陆下地壳部分熔融的产物; Zhao Zhenhua 等 (2009) 通过对新疆北部西天山地区二叠纪钾玄质系列岩石 (250 ~ 268Ma) 和高铽低钇中酸性岩 (248 ~ 278Ma) 的元素地球化学和 Sr—Nd 同位素的研究认为, 该区钾玄质系列岩石和高铽低钇中酸性岩可能具有相似的源区组成, 源于底侵的玄武质岩浆, 并在成岩过程中遭受了地壳物质混

染; Wang Qiang 等 (2006) 认为共生于庐枞地区早白垩世的钾玄质岩 (125 ~ 140Ma) 与高铽低钇中酸性岩 (136Ma) 形成时代基本一致, 前者被认为源自俯冲大洋沉积物交代的富集地幔, 后者则为拆沉下地壳的部分熔融。与出露于伊朗西北部 Alborz 山脉 Khankandi 钾玄质辉长岩—二长岩共生的花岗闪长岩也具有高铽低钇中酸性岩的特征 (如 $\text{SiO}_2 > 68.40\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 14.97\%$ 、 $\text{Sr} = 380 \times 10^{-6} \sim 613 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Y} = 8.1 \times 10^{-6} \sim 10.6 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Yb} = 0.5 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6}$ 和 $\text{La}_n/\text{Yb}_n > 34$ 等) (Aghazadeh et al., 2010), 钾玄质系列岩和花岗闪长岩具有某些相似的地球化学特征, 但源自不同的源区。上述研究表明, 共生的钾玄质系列岩和高铽低钇中酸性岩形成时代相近或相同, 可以是同源、也可以是异源, 受控于同一构造背景, 可形成于多种环境, 但多数以伸展为主。值得注意的是, 共生组合中的钾玄质系列岩石 SiO_2 含量绝大多数小于 63%, 与初始定义相当, 而高铽低钇中酸性岩则大于 63%。由二者可以同源所引发的问题是, 一些岩石既表现出钾玄质系列岩石的特点, 依据地球化学特征又可归于高铽低钇中酸性岩, 表现为过渡性的特征, 如云南马厂箐富碱斑岩, 被定义为“C 型埃达克岩”中的“钾质埃达克岩” (郭晓东等, 2009)。这类具有过渡性质的岩石也具有相对高硅的特点 ($\text{SiO}_2 > 63\%$), 与上述钾玄质英安岩相当。出现这种过渡性特征的岩石, 其原因可能在于: 一定程度上, 钾玄质系列岩和高铽低钇中酸性岩具有相似的与熔体平衡的残留矿物相, 如石榴子石和含 Ti 矿物 (金红石、钛铁矿) 等, 表现在 Nb、Ta、Ti、Y 和 Yb 的亏损, 而 Sr、Ba 等元素的富集 (Beccaluva et al., 1991; Eyuboglu et al., 2011)。钾玄质系列岩石还可能与一些造山带岩石组合共生, 如富闪深成岩 (appinites) 和赞岐岩 (sanukitoids) 等, 有时还与一些高钾钙碱性岩 (如花岗岩闪长岩) 共生, 而被认为是后碰撞或板内的岩浆活动的产物 (Xiao Long and Clemens, 2007; Scarrow et al., 2008)。但在地球化学特征上, 钾玄质系列岩石与高钾钙碱性岩系列往往并不能严格区分, 尤其是在一些主元素判别图解上出现重叠区 (Mariano and Sial, 1993), 给钾玄质系列岩石的判别造成困难。前期研究表明, 发育于大洋岛弧的钾玄质系列岩石一般形成时间较晚, 主要起源于与俯冲作用有关的富钾和大离子亲石元素交代地幔 (李献华等, 2001; 谢才富等, 2006); 而一些陆内钾玄质系列岩石与高钾钙碱性岩共生且相对较晚, 可能代表了构造应力

转变的过程,如,长江源区始新世的高钾钙碱性火山岩和中—上新世的钾玄质系列岩石,被作为区域上由碰撞、挤压作用发展到出现走滑,由挤压转变为拉张的过渡环境的岩石学标志(魏君奇等,2004);钾玄质系列岩石有时也呈岩脉产出,并与花岗质脉岩共同构成双峰式岩墙群,指示伸展的构造背景,如北京南口中生代双峰式岩墙群(邵济安等,2001)。

一个突出的问题是,与一些特殊岩石类型相似(如“埃达克岩”、A型花岗岩等),钾玄岩系列岩石的概念已不可避免地被扩大化(徐志刚等,1999),其可能原因一方面在于存在钙碱性系列和碱性系列岩石的过渡组分,一些钾质—超钾质岩依据地球化学特征被直接归属于钾玄质系列;另一方面在于实际运用中判别指标的选取具有随意性和主观性,如有的化学指标归属于钾玄岩系列,别的指标则可能归属于钙碱性系列。特别是在研究那些具有高硅($\text{SiO}_2 > 63\%$)特征钾玄质岩石时,有必要确认其共生岩石组合及其成因联系,如不能确认其与偏基性端元岩石的关系或岩体单独产出,在定义其是否为钾玄质岩时应当尤为慎重。

矿物学方面,钾玄质系列岩的典型特征是斜长石斑晶及基质中的斜长石常具钾长石环边(Morrison,1980;Bates and Jackson,1980)。Morrison(1980)总结了钾玄质系列火山岩(玄武岩和玄武质安山岩)中矿物组合特征,主要包括:①橄榄岩斑晶,组分从 $\text{Fo}_{65} \sim \text{Fo}_{85}$ (平均 Fo_{75}),极少单斜辉石环边;②单斜辉石斑晶在矿物组分上属于普通辉石和次透辉石,极少表现出富铁趋势,常与富Mg云母共生。单斜辉石斑晶富钙而贫钛,常具环带状,如海南中部屯昌地区的早白垩世钾玄质镁铁质岩中单斜辉石具多层低MgO环带(Wang Qiang et al.,2012)、云南建川钾质—超钾质玄武岩—安粗岩中单斜辉石斑晶则表现出复杂的环带特征(正环带、反环带和震荡环带)(Huang Xiaolong et al.,2010);③斜长石斑晶具透长石环边,具震荡或正常环带,组分通常为拉长石($\text{An } 50 \sim 85$);④斑晶中还可可见紫苏辉石、金云母、普通角闪石和方英石等。一些钾玄质岩中表现为云母(包括黑云母和多硅白云母)从核部到边部 $\text{Mg}^\#$ 和 $^{\text{IV}}\text{Al}$ 降低、而Fe和Ti增加,且具网针状结构的特征(Woodard et al.,2012),这种现象在很多钾质—超钾质岩石中出现(如,Boetcher et al.,1977;Jones et al.,1982;Aghazadeh et al.,2010),这是由于云母颗粒中发育大量针状金红石或钛铁矿等Fe—Ti氧化矿物或后者呈环边围绕云母发育。此

外,钾玄质系列岩石中云母具有富碱、镁,高铝而贫铁的特征,与钙碱性系列岩石中云母迥然不同,暗示其形成于高碱度环境(谢应雯等,2002)。富Mg云母的高 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值是钾玄质系列岩的另一个特征(Jiang Yaohui et al.,2002),暗示其成岩过程中具有高的 f_{O_2} 条件(Aghazadeh et al.,2010)或继承了源区高 f_{O_2} 特征(Huang Xiaolong et al.,2010)。角闪石的类型及晶体化学特征对于岩石成因具有重要的指示意义,但在钾玄质系列岩石中角闪石组分变化较大,如,赣南会昌中生代钾玄质系列岩中角闪石为镁绿钙闪石,被认为属于典型的幔源成因(章邦桐等,2008);而Alborz Mountains的Khankandi杂岩体的钾玄质辉长—二长岩中,所有角闪石的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \leq 1\%$,钙碱性,归属于浅闪石(Aghazadeh et al.,2010)。钛闪石(kaersutite)和镁绿钠闪石(Mg-hastingsite)是钾玄岩和富闪深成岩系列岩石的典型矿物相(Castro et al.,2003)。随着钾玄质系列岩石范围的扩大(主要包含中基性侵入岩),有些特征矿物也发生变化,如章邦桐等(2011)指出钾玄质系列岩中镁铁质矿物以辉石、角闪石或黑云母为主,橄榄石属偶见矿物,并将之作为钾玄岩应译名为“玄粗岩”而非“橄榄玄粗岩”的一个证据。基质中,斜长石和透长石共存,常由斜长石、单斜辉石、角闪石和黑云母组成,而橄榄石较少出现(Morrison,1980)。此外,金云母被认为是钾玄质系列岩石源区的重要矿物相。金云母富集K、Sr、Ba和Rb,但具有低的REE、HFSE和Th含量,K/Rb值变化在40~400之间,但通常低于250。金云母的出现对于岩浆的初始深度具有重要的指示意义(Green and Falloon,1998),上地幔中,金云母作为稳定相的深度可达~150km(Foley,1993),含金云母相的地幔组分在大约80~150km的深度可形成钾玄质岩浆(Chakrabari et al.,2009)。以Cpx—Opx矿物温压计估算,藏北新生代钾玄质火山岩的温度变化在960~1260℃,压力主要变化在2.5~3.4GPa,相当于80~110km,也间接证明了其岩浆源区金云母的存在(杨日红等,2002)。

2 地球化学特征及判别指标

2.1 地球化学特征

钾玄岩系列火山岩的 SiO_2 含量与世界平均安山岩相当(54.20%),但钾玄岩以高碱、富钾、低钛和贫铁为特征,有别于碱性玄武岩系(徐志刚等,1999);钾玄质系列岩石的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 5\%$,当

SiO₂ 为 50% 和 55% 时, K₂O/Na₂O 比值分别大于 0.6 和 1.0, TiO₂ 大多数小于 1.3%, Al₂O₃ 含量高且变化范围大(大多数介于 14% ~ 19% 之间), 高 Fe₂O₃/FeO(>0.5), 强烈富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(Morrison, 1980)。此外, 该类岩石的地球化学特征还包括: ① 玄武质岩石为硅近饱和(极少出现标准矿物 Ne 和 Q); ② 低的铁和钛含量; ③ 随着 SiO₂ 含量的增加, 当 SiO₂ 含量小于 57% 时, K₂O 含量呈陡增趋势; 当 SiO₂ 含量大于 57% 时, K₂O 含量变化不大或呈下降趋势; ④ 富集 P、Rb、Sr、Ba、Pb 和 LREE 等元素。Gill 等(2004)通过对世界上典型的钾玄质系列岩石的研究, 认为大多数钾玄质系列岩石具有一些共同的地球化学特征, 如: ① 显著富集高度不相容元素 LILE, 尤其在 100 ~ 1000 倍球粒陨石标准化区间内, 含量比共生的钙碱性岩石高得多; ② Ce/Yb 值由中等一极高, 但大部分均具有高的 Ce/Yb 值(图 1); ③ 显著的负 Nb—Ta 异常; ④ 明显的 Ti 负异常和 Pb 正异常等。但对一些地方的钾玄质系列岩石而言, 如摩洛哥、斐济群岛和波多黎各等, 上述特征其实并不明显, 可能与岩浆遭受了不同程度的地壳混染有关。

钾玄质系列岩石的高钾含量, 可能是岩浆形成之后受到钾质流体的交代或受到地壳物质混染(Battistini et al., 2001), 或是源于富钾的富集地幔(Turner et al., 1996)。而 K 的来源对于岩石源区判别具有一定的指示意义, 如高 K 含量源于富集地幔, 则岩石的 K 原始地幔标准化表现为无明显分

异, 源于亏损地幔经历地壳物质混染的岩浆则与之不同。同时, 地幔含水矿物(金云母、角闪石)的高 K/Na 比值也为地幔橄榄岩部分熔融形成钾玄质岩浆提供了可能(李献华等, 2001)。钾玄质岩浆的 K 富集也被认为由玄武质岩浆中斜方辉石的分异结晶造成(Meen, 1987)。Ti 作为一种相容元素, 在大陆地壳是亏损的, 大部分钾玄质系列岩石中 Ti 是亏损的, TiO₂ 含量大多数小于 1.3%, 而少数情况下, 也存在钾玄质系列岩石中较高的 TiO₂ 含量(>2.0%) (如, 内蒙四子王旗早白垩世钾玄岩的 TiO₂ 含量变化范围为 2.03% ~ 2.71%) 和没有分异的 Ti 元素(Sommer et al., 2005), 高的 Ti 含量很难经由地壳物质混染而富集, 而通过含钛铁矿和金红石的地幔组分的部分熔融则可以实现(李毅等, 2006)。Ce/Yb 值变化范围大(图 1b), 相对而言 Yb 相对较窄, Ce 则宽得多, 其原因一方面是源区有石榴子石的残留, 另一方面是源区 LREE 富集程度变化较大(Gill et al., 2004)。

大多数钾玄质系列岩石具有 Nb—Ta—Ti 亏损(TNT 异常), 但 TNT 异常不能作为判别钾玄质岩石的标志, 更不能作为判别钾玄质岩石形成的构造背景的指标。与俯冲相关钾玄质岩常具有 TNT 异常, 但在俯冲带上也存在无此特征的钾质岩石(Rock and Finlayson, 1990), 而一些板内钾玄质岩也具有 TNT 异常, 如广西牛庙岩体, 表明岩浆源区可能受到俯冲带流体的交代(李献华等, 2001)。TNT 异常的成因复杂, 绝大部分情况下与俯冲作用相关, 主要包

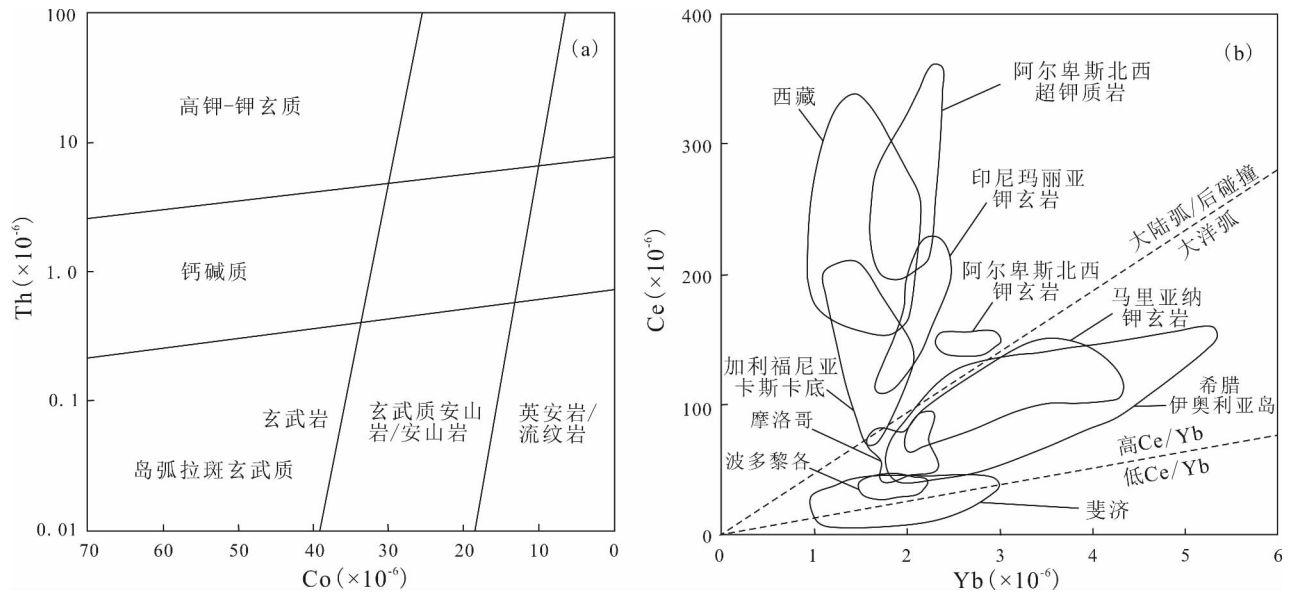


图 1 Th—Co(Hastie et al., 2007)(a)和 Ce—Yb 关系图解(Gill et al., 2004)(b)
Fig. 1 Th—Co(Hastie et al., 2007)(a) and Ce—Yb(Gill et al., 2004) diagrams(b)

括:①俯冲板片脱水形成的交代流体在进入上覆地幔楔时,其中的高场强元素(HFSE)由于具有低的溶解度而滞留(Saunders et al., 1991);②部分熔融时金红石、钛铁矿和榍石等含 TNT 矿物残留于地幔楔中,使得形成的熔体具有 TNT 异常(Foley and Wheller, 1990);③俯冲带环境高的 f_{O_2} 环境也被认为是钾质熔体 Ti 亏损的原因,这是由于高 f_{O_2} 条件下,含 Ti 矿物相的熔融需要更高的温度(Edwards et al., 1994);④有些学者则认为 TNT 亏损是由于钾质熔体通过上覆地幔楔时, HFSE 矿物相发生沉淀作用而残留,使得熔体具有相对低的 HFSE 含量(Kelemen et al., 1990);⑤在上地幔,普通角闪石被认为是最主要的 Nb—Ta 载体,控制着 TNT 异常的演化趋势(Ionov and Hofmann, 1995)。其过程表现为板片脱水形成的流体在穿过上覆地幔楔时,角闪石发生沉淀而晶出,使得残留流体亏损 Nb、Ta、Ti, 残留流体进一步迁移,至高温区域发生部分熔融,所形成的熔体亦具有 TNT 异常;⑥俯冲流体中碳酸盐岩(富 H_2O — CO_2) 的交代作用也被认为是引发 Ta—Nb—Ti 亏损的一个原因(Huang Xiaolong et al., 2010; Vetere et al., 2011; Iacono-Marziano et al., 2012)。而高压条件下的低度部分熔融可以产生富碳酸盐岩的熔体/流体(Dalton and Presnall, 1998; Ryabchikov et al., 1993)。同时这种碳酸盐岩(富 H_2O — CO_2) 流体的交代作用也可能导致熔体中 Zr/Hf 值的增高(有些岩体 Zr/Hf 值高达 > 70 , 如, Virunga 火山岩)(Chakrabarti et al., 2009),其原因在于,硅酸盐熔体具有 $D_{Zr} < D_{Hf}$ 的特点,使得与之相平衡的碳酸岩熔体更易富集 Zr 而具有高的 Zr/Hf 值(Hamilton et al., 1989)。富碳酸盐岩熔体/流体的交代作用的另一个显著影响是,熔体(如源自地幔楔部分熔融)会明显 Sr 富集(Beccaluva et al., 1991)。与俯冲无关则可能与源区物质组成或成岩过程有关,如源自陆源沉积物的再循环的富集地幔或熔体遭受壳源物质的混染作用等(Huang Xiaolong et al., 2010)。大陆板内钾玄质系列岩石既有岛弧型微量元素特征(Chung Sunlin et al., 2001; Schiano et al., 2004),也具有 OIB 型的微量元素特征(王岳军等, 2004; Zou Haibo et al., 2003)。大陆板内钾玄质系列岩石通常与软流圈地幔上涌和岩石圈伸展—减薄相关,岩石圈地幔的交代富集可能与 LILE 和 LREE 富集的地幔柱底垫相关,或岩石圈地幔本身就存在长期的不均一性(Li Xianhua et al., 2000)。近年来,不少钾玄质系列岩石被认为形成于板内

(陆内)环境,普遍的观点是产生于软流圈地幔上涌,岩石圈伸展减薄的拉张环境(王德滋等, 1996; Chung Sunlin et al., 1998; Wang Qiang et al., 2006),甚至是陆内裂谷环境(谢应雯和张玉泉, 1995; Foley and Peccerillo, 1992),也有观点认为钾玄质系列岩石可以形成于板内造山环境(Xiao Long and Clemens, 2007; Scarrow et al., 2008)或陆—陆碰撞的晚阶段(魏君奇等, 2004)。

总体上,与岛弧有关的钾玄质系列岩石表现为高度富集大离子亲石元素 LILE 和轻稀土元素 LREE,具有显著的 TNT 异常(Turner et al., 1996; 李献华等, 2001);大洋板内钾玄质系列岩石具有典型的洋岛玄武岩(OIB)的微量元素特征(Weaver, 1991);大陆板内钾玄质系列岩石既有岛弧型微量元素特征(Chung Sunlin et al., 2001; Schiano et al., 2004),也有 OIB 型的微量元素特征(王岳军等, 2004; Zou Haibo et al., 2003)。

2.2 判别指标

在实际应用中,诸多文献中经 SiO_2 — K_2O 关系图解投图(图 2),样品大部分落入钾玄岩系列或高钾钙碱性系列至钾玄岩系列区域,这种情况会对岩石类型的判别结果形成误导。事实上,仅通过 SiO_2 — K_2O 关系图解或其它判别图解就判别其是否为钾玄质岩石的做法太过武断,该图解本身亦未对钾玄岩系列进行限定(邓晋福等, 2015b)。一些常用的判别图解,如 Na_2O — K_2O (图 2b)及一些微量元素的相关关系图解,如 Th—Co 和 Ce—Yb 图解等(图 1),通常也可能使钾玄质岩范围扩大。Pearce (1982)提出的 Ta/Yb—Ce/Yb 和 Ta/Yb—Th/Yb 关系图解(图 3),它们可以区分岩石类型(拉斑质—钙碱性—钾玄质),但不能区分钾玄质岩石的构造背景。正如汪洋(2007)所指出的, Müller and Groves (1995)提出的系列判别图解,建立在已知大地构造背景的新生代钾质火成岩数据库之上,适用于包括大陆弧钾质火成岩在内的钾质中基性火成岩的构造背景判别。应用这些判别图解前,先要使用他们提供的准则对分析数据进行筛选,如,样品的 $Mg^\#$ 范围为 $0.5 \sim 0.8$ 、 SiO_2 小于 63% 和不包括所有的超钾质岩(如超钾质煌斑岩和钾霞橄黄长岩被排除在外)等。

因此,判别钾玄质岩石应以初始地球化学定义($K_2O + Na_2O > 5\%$, 当 SiO_2 为 50% 和 55% 时, K_2O/Na_2O 分别大于 0.6 和 1.0, TiO_2 大多数小于 1.3%, Al_2O_3 含量高且变化范围大(14% ~ 19%), 常强烈富

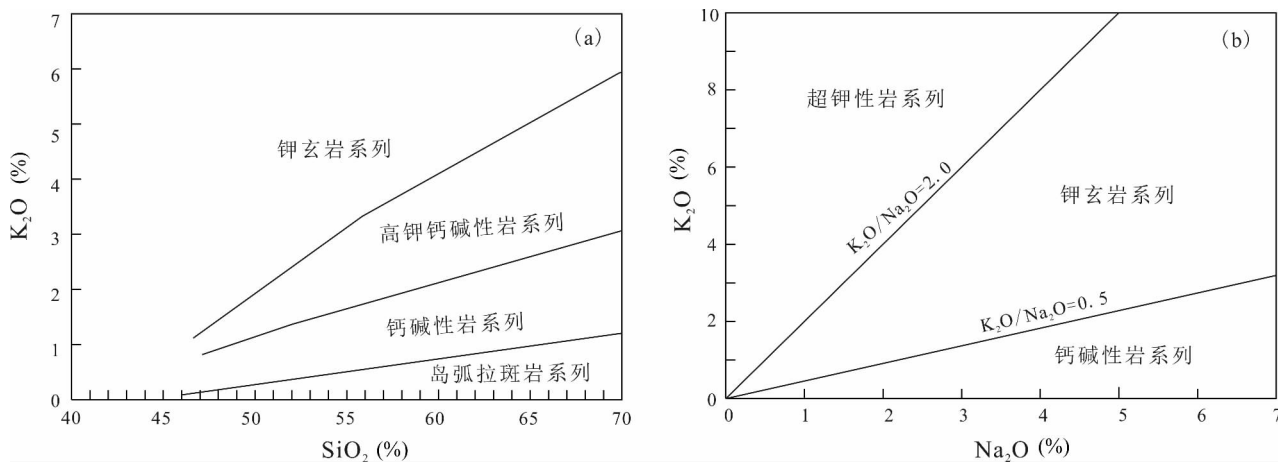


图 2 SiO₂—K₂O(a) (Peccerillo and Taylor,1976)和 Na₂O —K₂O(b) (Turner et al. ,1996) 图解
Fig. 2 SiO₂—K₂O(a) (Peccerillo and Taylor,1976) and Na₂O —K₂O(b) (Turner et al. ,1996) diagrams

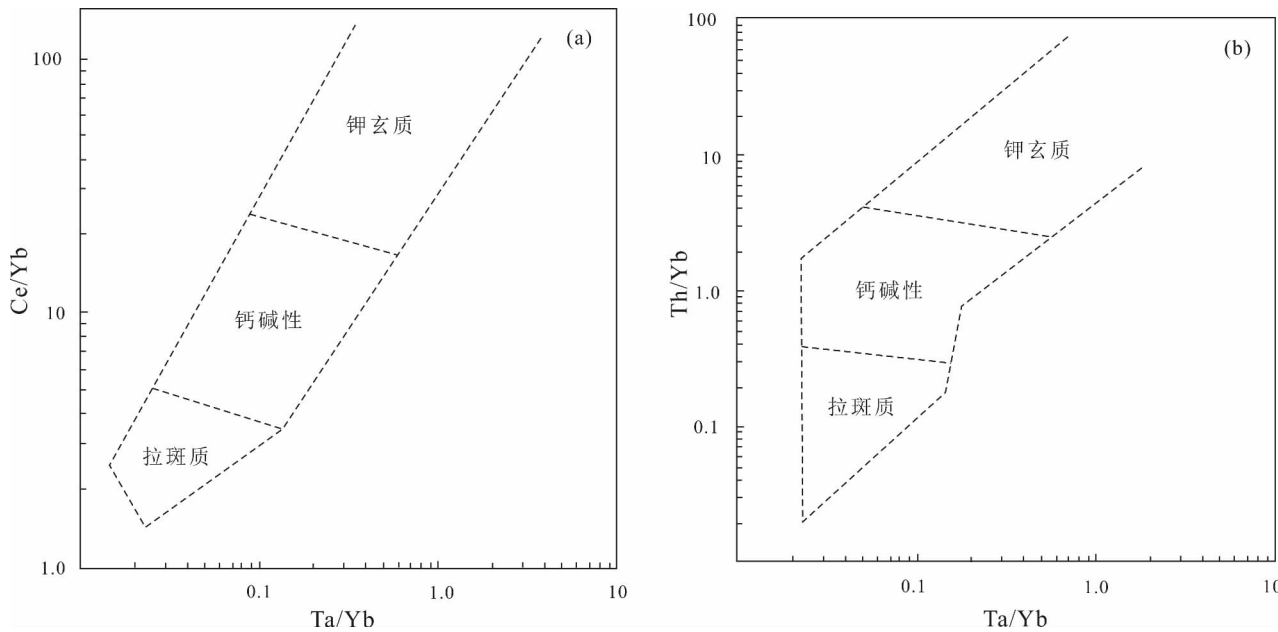


图 3 Ta/Yb—Ce/Yb(a) 和 Ta/Yb—Th/Yb 关系图解(b) (Pearce,1982)
Fig. 3 Ta/Yb—Ce/Yb (a) and Ta/Yb—Th/Yb diagrams (b) (Pearce,1982)

集大离子亲石元素和轻稀土元素等 (Müller and Groves,1995)) 为基础,结合岩石类型(岩石组合),进行必要的矿物学特征研究,再辅以相关图解。特别是对于那些高硅组分的岩石,岩石组合和矿物学更加重要,在判别时需慎之又慎。

3 岩石成因

钾玄质系列岩石的成因模式有很多种,反映了这类岩石源区组分的多样性和产出于多种构造环境

(Gill et al. ,2004),关于其源区特征通常包括下列几种观点:① 幔源岩浆经历地壳混染,钾玄质岩浆是由于幔源玄武质岩浆不同程度被壳源物质混染或与壳源岩浆相混合形成 (Benito et al. , 1999; Battistini et al. ,2001; Hébert et al. ,2014);② 陆壳物质再循环形成的富集地幔部分熔融,钾玄质岩浆是含金云母的富集地幔橄榄岩高压下部分熔融形成的 (Turner et al. ,1996; 岳雅惠和丁林,2006);③ 交代地幔,岩浆源区受到富集 LILE 和 LREE 的交代组

分混染,这些交代组分来源于俯冲的岩石圈,包括俯冲沉积物,尤其是随俯冲进入地幔的大洋沉积物(Nelson,1992;Schiano et al.,2004);④玄武质岩浆的结晶分异,钾玄质岩浆是由石榴石橄榄岩地幔部分熔融的玄武质岩浆经历高度结晶分异作用形成(王建等,2003;Meen,1990);⑤幔源岩浆纵向分带富集(Harris and Middlemost,1969)等。总之,钾玄质系列岩石源自地幔物质的部分熔融和/或分异结晶,幔源岩浆或经历壳源物质的混染,或经历高度结晶分异,或遭受交代作用,对反演区域地幔性质具有重要的指示意义。

上述这些观点强调了钾玄质系列岩的幔源特征,但需要指出的是被研究对象通常为低硅的钾玄质系列岩石(SiO_2 常小于56%),而对于一些相对高硅的岩石(如钾玄质英安岩(shoshonitic dacite, $\text{SiO}_2 > 63\%$)),一个重要且根本性的问题是:地壳是否为其唯一的源区或是否需要显著地幔源组分的参与(Yang Jinhui et al.,2012),即是说,高硅钾玄质系列岩石的源区是否应为壳源或主要为壳源组分,与花岗岩相当;而低硅钾玄质岩则以幔源为主。Yang Jinhui 等(2012)在研究华北地区一些二叠纪—三叠纪正长岩时,认为硅饱和正长岩($\text{SiO}_2 > 69\%$)源自下地壳物质的部分熔融,并经历了辉石和斜长石高度分异结晶,而硅不饱和正长岩($\text{SiO}_2 < 58\%$)则源自富集角闪石—单斜辉石的岩石圈地幔部分熔融,硅饱和与硅不饱和分别为高硅($\text{SiO}_2 > 63\%$)和低硅($< 56\%$)。巴西北东部的 Guarany 岩体具有高的 Sr 同位素初始值 $\{[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_i = 0.71253\}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值($+9.1\text{‰} \sim +11.1\text{‰}$)、低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-14.6),但 SiO_2 含量变化较大($58\% \sim 73\%$),也被认为是古老地壳重熔的产物(Ferreira et al.,2015)。

而在下述实验岩石学研究中,由变质岩石圈地幔的减压熔融所形成的硅饱和钾玄质岩石仍然具有相对低的硅含量(SiO_2 常小于 $< 56\%$,组分与安山岩相当)(Conceição and Green,2004)。因此,在探讨钾玄质系列岩石的源区时,以高硅($\text{SiO}_2 > 63\%$)和低硅来判别其为壳源为主或幔源为主可能更为合适,而非硅饱和与硅不饱和。对于地壳是否可以作为钾玄质系列岩石(高硅)唯一源区的命题,仍值得商榷,实验岩石学研究结果表明,即便是极度高压条件下($> 1.5\text{GPa}$),正长岩质岩浆也不能由普通的长英质岩石部分熔融所形成(Litvinovsky et al.,2000)。上文所提到的正长岩—A型花岗岩共生组

合中,大部分情况下正长岩规模较小,也有以正长岩为主的情况,如俄罗斯外加贝尔,二者可能的成因模式包括:①正长质岩浆是花岗岩的母岩浆(Zanvilevich et al.,1995),但不直接或主要源自地壳物质熔融;②花岗质岩浆作为一个组分端元,与富碱玄武质岩浆混合形成正长岩;③混合的二长质熔体结晶分异形成正长岩,残余的花岗质岩浆形成A型花岗岩(Litvinovsky et al.,2000)。

因此,低硅的钾玄质岩应当主要源于地幔源区,高硅的钾玄质岩主要源于地壳源区,更多情况下是二者的混合。总体上,钾玄质岩石源区更多地强调了其幔源性质或至少幔源组分的参与。值得注意的是,如果岩石仅发育高硅组分,是否可归属于钾玄质岩仍值得商榷。

4 实验岩石学制约

有关钾质—超钾质熔体的实验岩石学也得到了一定程度的研究,Wyllie(1977)基于相平衡实验研究指出,在加厚陆壳的底部,陆壳岩石部分熔融形成的低熔岩浆是粗面岩(正长岩),而不是花岗岩。邓晋福等(1996)依据岩石相平衡理论,认为在正常陆壳厚度或加厚陆壳的中上部,陆壳岩石部分熔融产生的是具有负Eu异常的花岗质岩浆,而在加厚的陆壳底部(深度大于 $50 \sim 60\text{km}$),陆壳岩石部分熔融产生的是粗面岩(正长岩)岩浆。对钾玄质系列岩石中的云母单矿物化学成分和红外光谱分析结果显示,钾玄质系列岩石中的云母形成于高碱度环境,与钙碱性系列岩石中云母的形成环境显著不同(谢应雯等,2002)。

实验结果表明,加入少量钛磁铁矿、榍石和磷灰石等的金云母—单斜辉石相(Phl—Cpx)地幔源区较高级度的部分熔融($20\% \sim 30\%$)可以生成高K的镁铁质熔体($\text{K}_2\text{O} = 3.07\% \sim 5.05\%$, $\text{SiO}_2 = 35.0\% \sim 39.2\%$)(Lloyd et al.,1985)。地幔组分具多样性,在变化的温压和/或挥发分含量条件下,没有任何一种单一的地幔端元组分可以满足初始岩浆化学组分的多样性,一种极端现象是幔源超钾质岩浆($\text{K}/\text{Na} > 1$), (Foley et al.,1987)。Conceição等(2000)通过对无水条件下白榴石—橄榄石—石英体系熔融实验研究表明,高钾、硅饱和与硅过饱和的熔体可以由钾质方辉橄榄岩在压力高达 2.0GPa 、温度为 1200°C 部分熔融的所产生。在有羟基(OH^-)出现的地幔组分中,金云母作为钾元素的寄主矿物为钾玄质岩浆的形成提供了重要载体。实验

岩石学证明,在压力为 ~ 1 GPa、温度为 $1050 \sim 1150^\circ\text{C}$ 条件下,含金云母橄榄岩的减压脱水低度部分熔融可以产生钾玄岩的初始岩浆。当压力 ≥ 1.5 GPa的条件下,金云母在脱水固相线之上处于稳定状态,受制于钙镁闪石及其共生矿物相的存在;当实验压力 < 1.5 GPa时,缺水熔融获得的熔体相应的固体相中很难有金云母的出现;当压力为 1.0 GPa时,金云母和钙镁闪石在固相线或稍高的温度均完全消失:试验温度设定为 1075°C ,当初始含水量为 $\sim 3\%$ 时,获得 SiO_2 饱和的粗面安山岩熔体,熔融比例为 $\sim 5\%$;当初始含水量为 $\sim 4.5\%$ 时,获得 SiO_2 过饱和的玄武安山岩,熔融比例为 $\sim 8\%$,残留相为尖晶石二辉橄榄岩矿物组合,所获得的两种熔体组成均可归属于钾玄岩范围,即钾玄岩的初始岩浆(Conceição and Green, 2004)。对于上述这些硅饱和(仍然相对低硅)的钾玄质系列岩石而言,以钙镁闪石为稳定相的变质岩石圈地幔的减压熔融($1.0 \sim 1.5$ Ga)形成的岩浆可以作为它们的源区,而硅饱和的钾玄质系列岩石的岩石成因仍然缺乏相应的实验岩石学制约(Aghazadeh et al., 2010)。Holbig 和 Grove(2008)的实验结果支持初始钾玄质岩石源自交代橄榄岩地幔源区,源区中包含石榴子石和尖晶石,但下地壳深度的分异结晶对于高钾岩石的组分变化是个重要的过程。在熔体析离时($60 \sim 65$ km),地幔温度为 $1300 \sim 1420^\circ\text{C}$ 。同时指出亏损高场强元素(HFSE),暗示有先期熔体的抽取;大离子亲石元素(LILE)的富集,暗示着伴随俯冲作用的晚期交代事件的发生;重稀土元素(HREE)相对于轻稀土元素(LREE)的亏损,轻稀土元素/重稀土元素比值的亏损程度变化范围较大,则暗示着先期熔体的抽取或残留石榴子石。

壳源板片在无水条件下,当压力大于 1.5 GPa时,只有在高温下($\sim 950^\circ\text{C}$ 或更高)长英质岩石才能发生部分熔融(Stern et al., 1975),不同的源岩组分形成不同类型的硅质岩浆:钾质岩浆和钠质岩浆。在一些高压试验中,在高压条件下($1.3 \sim 2.0$ GPa)以长英质岩石为源岩的部分熔融可以获得高K的硅酸岩浆(Patiño Douce and Johnston, 1991; Skjerlie and Johnston, 1993, 1996),Schreyer 等(1987)也认为长英质岩石可能是潜在的富K花岗质岩浆的重要源区,如果在碰撞或俯冲带俯冲至高压高温,但是高压条件下长英质岩石部分熔融能否形成正长质岩浆?早期的学者认为,长英质岩石在高压部分熔融可以形成正长质岩浆,如Huang Wuliang 和 Wyllie

(1975)运用 $\text{Ab} + \text{Or} + \text{Qtz}(\pm \text{H}_2\text{O})$ 体系实验表明,当压力超过 2.0 GPa时,长英质组分的部分熔融形成的初始成分为正长质,他们认为一些正长质熔体在加厚地壳条件下可由硅酸质源区岩石部分熔融形成;而Litvinovsky 等(2000)通过对高压条件下($1.5 \sim 2.5$ GPa)长英质岩石熔融实验研究,认为与 $\text{Ab} + \text{Or} + \text{Qtz}$ 体系不同,天然硅酸盐岩石高压部分熔融不能形成低硅的正长质或石英正长质岩浆,其原因在于理想状态下的 $\text{Ab} + \text{Or} + \text{Qtz}$ 体系熔融结果是相似的,而天然岩石中包含了显著的Mg和Fe部分熔融所形成的熔体是不一致的且伴随低硅镁铁质矿物石榴子石(Grt)和单斜辉石(Cpx)的形成,多余的硅进入熔体中使之偏于花岗质而非正长质。其结论为,即使在高压条件下,正长质熔体也不能经由长英质岩石(含有显著的Mg和Fe)部分熔融所形成。

5 结论

(1)钾玄岩(Shoshonite)系列作为一个独立岩石系列仍缺失明确有效的岩石学、矿物学和地球化学等判别指标,满足目前研究所需的相对统一、规范的标准仍亟待建立;

(2)与岛弧有关的钾玄质系列岩石表现为高度富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),具有显著地TNT异常;大洋板内钾玄质系列岩石具有典型的洋岛玄武岩(OIB)的微量元素特征;大陆板内钾玄质系列岩石既有岛弧型微量元素特征,也有OIB型的微量元素特征;

(3)低硅钾玄质岩应当主要源于地幔源区,高硅钾玄质岩主要源于地壳源区,更多情况下是二者的混合。

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)
- 陈志刚,李献华,李武显,刘敦一. 2003. 赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背景的制约. 地球化学, 32(3): 223 ~ 229.
- 邓晋福,刘厚祥,赵海玲,罗照华,郭正府,李玉文. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型. 现代地质, 10(2): 137 ~ 148.
- 邓晋福,莫宣学,罗照华,赵海玲,赵国春,曹永清,于学政. 1999. 火成岩构造组合与壳幔成矿系统. 地学前缘, 6(2): 259 ~ 270.
- 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 ~ 484.

- 郭晓东,侯增谦,陈祥,王治华. 2009. 云南马厂箐富碱斑岩埃达克岩性质的厘定及其成矿意义. 岩石矿物学杂志, 24(8): 375 ~ 386.
- 贺振宇,徐夕生,王孝磊,陈荣. 2008. 赣南橄榄安粗质火山岩的年代学与地球化学. 岩石学报, 24(11): 2524 ~ 2536.
- 李献华,周汉文,刘颖,李奇崛,孙敏,陈正宏. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报, 44(18): 1992 ~ 1998.
- 李献华,周汉文,刘颖,李奇崛,陈正宏,于津生,桂训唐. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: 岩石学 and 同位素地质年代学. 地球化学, 29(6): 513 ~ 520.
- 李献华,周汉文,刘颖,李奇崛,陈正宏,于津生,桂训唐. 2001. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: 岩石学 and 同位素地质年代学. 地球化学, 29(6): 57 ~ 65.
- 李毅,吴泰然,罗红玲,赵磊. 2006. 内蒙古四子王旗早白垩世钾玄岩的地球化学特征及其形成构造环境. 岩石学报, 22(11): 2791 ~ 2800.
- 马昌前,杨坤光,许长海,李志昌,Carl E. 1999. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理. 岩石学报, 15(3): 379 ~ 395.
- 邱检生,徐夕生,蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因. 地学前缘, 10(3): 191 ~ 200.
- 邵济安,李献华,张履桥,牟保磊,刘玉琳. 2001. 南口—古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约. 地球化学, 30(6): 517 ~ 524.
- 王岳军,廖超林,范蔚茗,彭头平. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义. 地球化学, 33: 109 ~ 117.
- 王德滋,周金城,邱检生. 1991. 橄榄安粗岩系的研究现状. 南京大学学报(地球科学), (4): 321 ~ 328.
- 王德滋,任启江,邱检生,陈克荣,徐兆文,曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1): 23 ~ 34.
- 王建,李建平,王江海. 2003. 滇西大理—剑川地区钾玄质岩浆作用: 后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究. 岩石学报, 19(1): 61 ~ 70.
- 汪洋. 2007. 中国东部中生代钾质火成岩研究中的几个问题. 地质论评, 53(2): 198 ~ 207.
- 魏君奇,王建雄,牛志军. 2004. 长江源区新生代火山岩的系列及成因. 地球科学, 29(1): 25 ~ 30.
- 吴俊奇,谭桂丽,章邦桐,凌洪飞,陈培荣. 2011. 赣中早白垩世橄榄玄粗岩(Shoshonite)系列火山岩的厘定及成因研究. 高校地质学报, 17(4): 479 ~ 491.
- 谢才富,朱金初,丁式江,张业明,付太安,李志宏. 2006. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义. 科学通报, 51(16): 1944 ~ 1954.
- 谢应雯,张玉泉. 1995. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石化学. 岩石学报, 11(4): 423 ~ 433.
- 谢应雯,梁华英,张玉泉. 2002. 藏东及邻区钾玄岩系岩石云母特征及其岩石学意义. 岩石学报, 18(2): 205 ~ 211.
- 徐志刚,盛继福,孙善平. 1999. 关于“橄榄玄粗岩系列(组合)”特征及某些问题的讨论. 地质论评, 45(增刊): 43 ~ 62.
- 杨建超,章雨旭,黄泽光. 2007. 地质学某些术语用词辨析. 中国科技术语, (3): 35 ~ 39.
- 杨日红,董建乐,李才,迟效国,于学政. 2002. 藏北新生代火山岩主要造岩矿物特征及温压条件. 现代地质, 16(2): 153 ~ 158.
- 岳雅慧,丁林. 2006. 西藏林周基性岩脉的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学、地球化学及其成因. 岩石学报, 22(4): 855 ~ 866.
- 章邦桐,陈培荣,杨东生,孔兴功. 2001. 赣南中生代橄榄玄粗岩系列厘定的地质证据. 地质学报, 75(2): 213 ~ 220.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2008. 会昌早白垩世橄榄玄粗岩(shoshonite)成因的元素及 Sr—O—Nd—Pb 同位素地球化学证据. 地质学报, 82(7): 986 ~ 997.
- 章邦桐,吴俊奇,凌洪飞,陈培荣. 2011. 关于 Shoshonite 中译名的商榷和建议. 地质论评, 57(2): 216 ~ 217.
- 张树明,余达淦,吴仁贵,张丽芬. 2005. 相山铀矿田钾玄质岩石与铀成矿. 大地构造与成矿学, 29(4): 527 ~ 536.
- 张遵忠,顾连兴,吴昌志,翟建平,李伟强,唐俊华. 2006. 东天山印支早期尾亚石英正长岩: 成岩作用及成岩意义. 岩石学报, 22(5): 1135 ~ 1149.
- 赵振华,熊小林,王强,白振华,乔玉楼. 2007. 新疆北部晚古生代的底侵作用——来自橄榄玄粗岩与埃达克岩的证据. 地质学报, 81(5): 606 ~ 619.
- Aghazadeh M, Castro A, Omran N R, Emami M H, Moinvaziri H, Badrzadeh Z. 2010. The gabbro (shoshonitic)—monzonite—granodiorite association of Khankandi pluton, Alborz Mountains, NW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 38: 199 ~ 219.
- Akgul B. 2015. Geochemical associations between fluorite mineralization and A-type shoshonitic magmatism in the KebaneElazığ area, East Anatolia, Turkey. Journal of African Earth Sciences, 111: 222 ~ 230.
- Asiabanha A, Bardintzeff J M, Kananian A, Rahimi G. 2012. Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran; Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 45: 79 ~ 94.
- Avanzinelli R, Lustrino M, Mattei M, Melluso L, Conticelli S. Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins. Lithos, 2009, 113: 213 ~ 227.
- Bailey J C, Frolova T I, Burikova I A. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of Kurile island-arc basalts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1989, 102: 265 ~ 280.
- Bates R L, Jackson J A. 1980. Glossary of Geology (Second Edition). Virginia: Falls Church. American Geological Institute, 316.
- Battistini G D, Montanini A, Vernia L. 2001. Petrology of melilite-bearing rocks from the Montefiascone Volcanic Complex Roman Magmatic Province: New insights into the ultrapotassic volcanism of Central Italy. Lithos, 59: 1 ~ 24.
- Beccaluva L, Di Girolamo P, Serri G. 1991. Petrogenesis and tectonic setting of the Roman Volcanic Province, Italy. Lithos, 26: 191 ~ 221.
- Benito R, López-Ruiz J, Cebriá J M et Hertogen J, Doblas M, Oyarzun R, Demaiffe D. 1999. Sr and O isotope constraints on source and crustal contamination in the high-K calc-alkaline and shoshonitic neogene volcanic rocks of SE Spain. Lithos, 46: 773 ~ 802.
- Bitencourt M F, Nardi L V S. 2004. The role of xenoliths and flow segregation in the genesis and evolution of the Paleoproterozoic Itapema Granite, a crustally derived magma of shoshonitic affinity from southern Brazil. Lithos, 73: 1 ~ 19.
- Boettcher A L, O'Neil J R, Windom K E, Stewart D C, Wilshire H G. 1977. Metasomatism and the genesis of kimberlites and alkali basalts. In: Proceedings of the Second International Kimberlite Conference.
- Castro A, Corretge L G, De La Rosa J D, Fernandez C, Lopez S, Garcia-Moreno O, Chacon H. 2003. The appinite—migmatite complex of Sanabria, NW Iberian massif, Spain. Journal of Petrology, 44: 1309 ~ 1344.
- Chakrabarti R, Basu A R, Santo A P, Tedesco D, Vaselli O. 2009.

- Isotopic and geochemical evidence for a heterogeneous mantle plume origin of the Virunga volcanics, Western rift, East African Rift system. *Chemical Geology*, 259 (3~4): 273~289.
- Chen Zhigang, Li Xianhua, Li Wuxian, Liu Dunyi. 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China. *Geochimica*, 32 (3): 223~229.
- Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Zhang Yuquan. 1998. Diachronous Uplift of the Tibetan Plateau Starting 40 Myr Ago. *Nature*, 394: 769~773.
- Chung Sunlin, Wang Kuolung, Crawford A J, Kamenetsky V S, Chen Chenghong, Lan Chingying. 2001. High-Mg potassic rocks from Taiwan: implications for the genesis of orogenic potassic lavas. *Lithos*, 59: 153~170.
- Conceição R V, Nardi L V S, Conceição H. 2000. The Santan? polis syenite: genesis and evolution of Paleoproterozoic shoshonitic syenites in northeastern Brazil. *International Geology Review*, 42: 941~957.
- Conceição R V, Green D H. 2004. Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompressing melting of phlogopite + pargasite + ilmenite. *Lithos*, 72: 209~229.
- Dalton J A, Presnall D C. 1998. The continuum of primary carbonatitic—kimberlitic melt compositions in equilibrium with ilmenite: Data from the system $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2$ at 6 GPa, *Journal of Petrology*, 39: 1953~1964.
- Daniel T, Maughan J D, Keith E H. 2002. Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu—Au—Mo deposit, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 37: 14~37.
- Deng Jinfu, Liu Houxiang, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Guo Zhengfu, Li Yuwen. 1996. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan—Liaoning area. *Geoscience*, 10(2): 137~148.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Zhao Hailing, Zhao Guochun, Cao Yongqing, Yu Xuezheng. 1999. Igneous petroectonic assemblage and crust—mantle metallogenic system. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 32(3): 223~229.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015a. Magmatic arc and ocean—continent transition; Discussion. *Geological Review*, 61(3): 473~484.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015b. On the correct application in the common igneous petrological diagrams; discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4): 717~734.
- Ding Lixue, Ma Changqian, Li Jianwei, Robinson P T., Deng Xiaodong, Zhang Chao, Xu Wangchun. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen. *Lithos*, 126: 212~232.
- Duchesne J C, Berza T, Liegeois J P, Auwera J V. 1998. Shoshonitic liquid line of descent from diorite to granite: the Late Precambrian post-collisional Tismana pluton (South Carpathians, Romania). *Lithos*, 45: 281~303.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115~134.
- Edwards C M H, Menzies M A, Thirlwall M F, Morris J D, Leeman W P, Harmon R S. 1994. The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: The Ringgit—Beser Complex, East Java, Indonesia. *Journal of Petrology*, 35(6): 1557~1595.
- Eklund O, Konopelko D, Ruttanen H, Fröjdö S, Shebanov A D. 1998. 1. 8 Ga Svecofennian post-collisional shoshonitic magmatism in the Fennoscandian Shield. *Lithos*, 45: 87~108.
- Eyuboglu Y, Chung Sunlin, Santosh M, Dudas F O, Akaryali E. 2011. Transition from shoshonitic to adakitic magmatism in the eastern Pontides, NE Turkey: Implications for slab window melting. *Gondwana Research*, 19: 413~429.
- Ferreira V P, Sial A N, Pimentel M M, Armstrong R, Guimarães I P, da Silva Filho A F, de Lima M M C, da Silva T R. 2015. Reworked old crust-derived shoshonitic magma: The Guarany pluton, Northeastern Brazil. *Lithos*, 232: 150~161.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, Toscani L. 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification and constraints for petrographic models. *Earth Science Reviews*, 24: 81~134.
- Foley S F, Wheller G E. 1990. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanates. *Chemical Geology*, 185: 1~18.
- Foley S F, Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181~185.
- Foley S F. 1993. An experimental study of olivine lamproite: first results from the diamond stability field. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 483~489.
- Fowler M B, Henney P J, Darbyshire D P F, Greenwood P B. 2001. Petrogenesis of high Ba—Sr granites: the Rogart pluton, Sutherland. *Journal of the Geological Society of London*, 158: 521~534.
- Fowler M B, Kocks H, Darbyshire D P F, Greenwood P B. 2008. Petrogenesis of high Ba—Sr plutons from the Northern Highlands Terrane of the British Caledonian Province. *Lithos*, 105: 129~148.
- Gill R C O, Aparicio A, El Azzouzi M, Hernandez J, Thirlwall M F, Bourgois J, Marriner G F. 2004. Depleted arc volcanism in the Alboran Sea and shoshonitic volcanism in Morocco: geochemical and isotopic constraints on Neogene tectonic processes. *Lithos*, (78): 363~388.
- Guo Xiaodong, Hou Zengqian, Chen Xiang, Wang Zhihua. 2009. Identification of adakitic characteristics of Machangjing alkali rich porphyry in Yunnan Province and its significance to mineralization research. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(8): 375~386.
- Guo Zhengfu, Wilson M, Liu Jiaqi, Mao Qian. 2006. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the northern Tibetan plateau: constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms. *Journal of Petrology*, 47: 1177~1220.
- Guo Zhengfu, Wilson M, Zhang Maoliang, Cheng Zhihui, Zhang Lihong. 2013. Post-collisional, K-rich mafic magmatism in south Tibet: constraints on Indian slab-to-wedge transport processes and plateau uplift. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 1311~1340.
- Green D H, Falloon T J. 1998. Pyrolyte: a Ringwood concept and its current expression. In: Jackson, I. N. S. (Ed.), *The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution*. Cambridge Univ. Press, New York, 311~380.
- Hamilton D L, Bedson P, Esson J. 1989. The behavior of trace elements in the evolution of Carbonatites. In: Bell, K. (Ed.), *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London, Boston, 405~427.
- Harris P G, Middlemost E A K. 1969. The evolution of kimberlites.

- Lithos, 3:77 ~ 88.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, Mitchell S F. 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using Immobile trace elements: development of the Th—Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48 (12): 2341 ~ 2357.
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Wang Xiaolei, Chen Rong. 2008&. Geochronology and geochemistry of shoshonitic volcanic in southern Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2524 ~ 2536.
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Niu Yaoling. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite - syenite - gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119: 621 ~ 641.
- Hébert R, Guilmette C, Dostal J, Bezard R, Lesage G, Bédard é, Wang C. 2014. Miocene post-collisional shoshonites and their crustal xenoliths, Yarlung Zangbo Suture Zone southern Tibet: Geodynamic implications. *Gondwana Research*, 25: 1263 ~ 1271.
- Holbig E S, Grove T L. 2008. Mantle melting beneath the Tibetan Plateau: Experimental constraints on ultrapotassic magmatism. *Journal of Geophysical Research*, 113 (B4): 366 ~ 389.
- Huang Xiaolong, Niu Yaolin, Xu Yigang, Chen Linli, Yang Qijun. 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China. *Journal of Petrology*, 51(8): 1617 ~ 1654.
- Huang Wuiliang, Wyllie P J. 1975. Melting reactions in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2$ to 35 kilobars, dry and with excess water. *Journal of Geology*, 83: 737 ~ 748.
- Iacono-Marziano G, Morizet Y, Trong E L, Gaillard F. 2012. New experimental data and semi-empirical parameterization of $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ solubility in mafic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97 (22): 1 ~ 23.
- Iddings J P. 1895. Absarokite—shoshonite—banakite series. *Journal of Geology*, 3: 935 ~ 957.
- Ionov D A, Hofmann A W. 1995. Nb—Ta-rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters*, 131: 341 ~ 356.
- Jacks P, White A J R. 1972. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic Ares. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 29 ~ 40.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Zhou Xunruo, Rui Xingjian, Yang Wanzgi. 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: Implications for granitoid geneses. *Lithos*, 63: 165 ~ 187.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Dai Baozhang. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite porphyry, east Tibet: geochemical and Sr—Nd—Pb—Hf isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 617 ~ 633.
- Jiang Yaohui, Liu Zheng, Jia Ruya, Liao Shiyong, Zhou Qing, Zhao Peng. 2012. Miocene potassic granite—syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba—Sr granite genesis. *Lithos*, (134 ~ 135): 146 ~ 162.
- Jones A P, Smith J V, Dawson J B. 1982. Mantle metasomatism in 14 vein peridotites from Bullfontein Mine, South Africa. *Journal of Geology*, 90: 435 ~ 453.
- Kelemen P B, Johnson K T M, Kinzier R J. 1990. High-field-strength element depletions in arc basalts due to mantle magma interaction. *Nature*, 345: 521 ~ 524.
- Litvinosky B A, Steele I M, Wickham S M. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. *Journal of Petrology*, 41: 717 ~ 737.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, Li Jiyu, Sun Min, Chen Zhenghong. 2000. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi. *Petrology and geochemistry. Chinese Science Bulletin*, 45(7): 653 ~ 659.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, Lee Chiyu, Chen Chenghong, Yu Jinsheng, Gui Xuntang. 2000&. M esozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology. *Geochimica*, 29 (6): 513 ~ 520.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, Lee Chiyu, Chen Chenghong, Yu Jinsheng, Gui Xuntang. 2001&. M esozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: II. Trace elements and Sr—Nd isotopes. *Geochimica*, 29(6): 57 ~ 65.
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18 (3): 293 ~ 305.
- Li Yi, Wu TaiRan, Luo Hongling, Zhao Lei. 2006&. Geochemistry and tectonic setting of the early Cretaceous shoshonite of Siziwangqi area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2791 ~ 2800.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas M J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Woolley A R, Zanettin B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell, 193.
- Lloyd F E, Arima M, Edgar A D. 1985. Partial melting of a phlogopite clinopyroxenite from southwest
- Uganda: an experimental study bearing on the origin of highly potassic continental rift volcanics. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 91: 321 ~ 329.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Xu Changhai, Li Zhichang, Carl E. 1999&. Mesozoic potassic magmatism in the Dabie Mountains: Implication for exhumation mechanism of ultrahigh-pressure metamorphic terranes. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 379 ~ 395.
- Mariano G, Sial A N. 1993. High K-calc-alkalic vs. shoshonitic granitic magmatism in Northeast Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 65 (Sup1): 119 ~ 129.
- Meen J K. 1987. Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: geochemical and experimental constraints from the type locality. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 333 ~ 351.
- Meen J K. 1990. Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: The effect of pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104: 309 ~ 331.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr—Nd—Pb—O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40: 1399 ~ 1424.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13: 97 ~ 108.
- Müller D, Groves D I. 1993. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks shoshonites and gold—copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 8: 383 ~ 406.
- Müller D, Groves D I. 1995. Potassic igneous rocks and associated gold—copper mineralization. *Springer Berlin Heidelberg*, 56 (1): 249 ~ 225.
- Nelson D R. 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: Evidence for the involvement of subducted sediments in the magma genesis.

- Lithos, 28:403 ~ 420.
- Patiño Douce A E, Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelite system; implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107:202 ~ 218.
- Pearce J. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS. ed. *Andesites; orogenic andesites and related rocks*. New York: John Wiley; 525 ~ 548.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58:63 ~ 81.
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong. 2003. Deep subduction of crust materials and its implication to the genesis of potash-rich volcanic rocks. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 10(3):191 ~ 200.
- Rock N M S, Finlayson E J. 1990. Petrological affinities of intrusive rocks associated with the giant mesothermal gold deposit at Porgera, Papua New Guinea. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 4(3):247 ~ 257.
- Ryabchikov I D, Orlova G P, Senin V G, Trubkin N V. 1993. Partitioning of rare earth elements between phosphate-rich carbonatite melts and mantle peridotites. *Mineralogy and Petrology*, 49:1 ~ 12.
- Saunders A D, Norry M J, Tarney J. 1991. Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Transactions of the Royal Society of London A*, 335:377 ~ 392.
- Scarrow J H, F. Bea, P. Montero and J. F. Molina. 2008. Shoshonites, vaugnerites and potassic lamprophyres; similarities and differences between 'ultra'-high-K rocks. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 99:159 ~ 175.
- Schreyer W, Massonne H J, Chopin C. 1987. Continental crust subducted to depths near 100 km: implications for magma and fluid genesis in collision zones. In: Mysen, B. O. (ed.) *Magmatic Processes; Physicochemical Principles*. Geochemical Society, Special Publication, 1:155 ~ 163.
- Schiano P, Clocchiatti R, Ottolini L, Sbrana A. 2004. The relationship between potassic and calc-alkaline and Na-alkaline magmatism in South Italy volcanoes: A melt inclusion approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 220:121 ~ 137.
- Shao Ji'an, Li Xianhua, Zhang Lujiao, Mou Baolei, Liu Yulin. 2001. Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou—Guyaju. *Geochimica*, 30(6):517 ~ 524.
- Sillitoe R H. 2002. Some metallogenic feature of the gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*, 37:4 ~ 13.
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1993. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures; Implications for the generation of anorogenic granites. *Journal of Petrology*, 34:785 ~ 815.
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1996. Vapour-Absent Melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases; implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. *Journal of Petrology*, 37(3):661 ~ 691.
- Sommer C A, Lima E F, Nardi L V S, Figueiredo A M G, Pierosan R. 2005. Potassic and low- and high-Ti mildly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 18:237 ~ 254.
- Stern C R, Huang W L, Wyllie P J. 1975. Basalt—andesite—rhyolite—H₂O: Crystallization intervals with excess H₂O and H₂O-undersaturated liquidus surfaces to 35 kbar, with implications for magma genesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(2):189 ~ 196.
- Turner S, Arnaud N, Liu J. 1996. Post-collisional, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37:45 ~ 71.
- Vetere F, Botcharnikov R E, Holtz F, Behrens H, Rosa R D. 2011. Solubility of H₂O and CO₂ in shoshonitic melts at 1250°C and pressures from 50 to 400 MPa: Implications for Campi Flegrei magmatic systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202:251 ~ 261.
- Wang Yuejun, Liao Chaolin, Fan Weiming, Peng Toupeng. 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in center Jiangxi province and its tectonic implications. *Geochimica*, 33:109 ~ 117.
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng. 1991. Research status on shoshonite rock series. *Journal of Nanjing University (Earth Science)*
- Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, Chen Kerong, Xu Zaowen, Zeng Jiahu. 1996. Geological—geochemical characteristics and genesis of Mesozoic shoshonitic series in east China. *Acta Geologica Sinica*, 70(1):23 ~ 34.
- Wang Jian, Li Jianping, Wang Jianghai. 2003. Shoshonitic magmatism in Dali—Jianchuan area, western Yunnan: a geochemical study of arc magmatism in a post-collisional strike-slip extensional setting. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):61 ~ 70.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Jian Ping, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Li Chaofeng, Bai Zhenghua. 2006. Erogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu—Au mineralization. *Lithos*, 89:424 ~ 446.
- Wang Qiang, Li Xianhua, Jia Xiaohui, Wyman D, Tang Gongjian, Li Zhengxiang, Ma Lin, Yang Yueheng, Jiang Ziqi, Gou Guoning. 2012. Late Early Cretaceous adakitic granitoids and associated magnesian and potassium-rich mafic enclaves and dikes in the Tunchang—Fengmu area, Hainan Province (South China): partial melting of lower crust and mantle, and magma hybridization. *Chemical Geology*, 328:222 ~ 243.
- Wang Yang. 2007. A discussion on some problems in the research on the Mesozoic potassic igneous rocks in eastern China. *Geological Review*, 53(2):198 ~ 207.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions; trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104:381 ~ 397.
- Wei Junqi, Wang Jianxiong, Niu Zhijun. 2004. Series of the Cenozoic rocks in source region of the Yangtze river and their genesis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1):25 ~ 30.
- Woodard J, Sjöblom S, Fröjdö S, Selbekk R. 2012. Experimental investigation of titanium stability in natural sagenitic phlogopites from Fennoscandian lamprophyres. *Acta Mineralogica—Petrographica, Abstract Series, Szeged*, 7:154.
- Wu Junqi, Tan Guili, Zhang Bangtong, Ling Hongfei, Chen Peirong. 2011. Identification and Genesis of the Early Cretaceous Shoshonitic Volcanic Rock Series in Central Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 17(4):479 ~ 491.

- Wyllie P J. 1977. Crustal anatexis: an experimental review. *Tectonophysics*, 13:41 ~ 71.
- Xiao Long, Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: experimental and field constraints. *Lithos*, 95 (3 ~ 4): 399 ~ 414.
- Xie Caifu, Zhu Jinchu, Ding Shijiang, Zhang Yeming, Fu Taian, Li Zhihong. 2006 #. Identification Of Hercynian Shoshonitic Intrusive Rocks In Central Hainan Island And Its Geotectonic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 51 (16): 1944 ~ 1954.
- Xie Yingwen, Zhang Yuquan. 1995#. Petrochemistry of the Cenozoic magmatic rocks in the eastern Erhai, Yunnan province. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (4): 423 ~ 433.
- Xie Yingwen, Liang Huaying, Zhang Yuquan. 2002#. Petrogenic implication of the characteristics of eastern Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (2): 205 ~ 211.
- Xu Zhigang, Sheng Jifu, Sun Shanping. 1999#. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems. *Geological Review*, 45 (Sup): 43 ~ 62.
- Yang Jianchao, Zhang Yuxu, Huang Zeguang. 2007#. Discrimination of some geological terms. *China Terminology*, (3): 35 ~ 39.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Zhang Min, Wu Fuyuan, Wilde S A. 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chemical Geology*, 328: 149 ~ 167.
- Yang Rihong, Dong Jianle, Li Cai, Chi Xiaoguo, Yu Xuezheng. 2002#. Major characteristics and temperature—pressure conditions of the minerals in Cenozoic volcanic rocks in the northern Tibetan plateau. *Geoscience*, 16 (2): 153 ~ 158.
- Yue Yahui, Ding lin. 2006#. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, geochemical characteristics and genesis of the Linzhou basic dikes, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 855 ~ 866.
- Zanvilevich A N, Litvinovsky B A, Wickham S M, Bea F. 1995. Genesis of Alkaline and Peralkaline Syenite—Granite Series: The Kharitonovo Pluton (Transbaikalia, Russia). *Journal of Geology*, 103 (2): 127 ~ 145.
- Zhang Bangtong, Chen Peirong, Yang Dongsheng, Kong Xinggong. 2001#. Geological evidence for determination of Mesozoic shoshonite rock series from southern Jiangxi province. *Acta Geologica Sinica*, 75 (2): 213 ~ 220.
- Zhang Bangtong, WuJunqi, Lin Hongfei, Chen Peirong. 2008#. Geochemical evidence of element and Sr—O—Nd—Pb isotopes for petrogenesis of the Huichang early Cretaceous shoshonite, southern Jiangxi province. *Acta Geologica Sinica*, 82 (7): 986 ~ 997.
- Zhang Bangtong, WuJunqi, Lin Hongfei, Chen Peirong. 2011 #. On the translation of shoshonite: discussion and suggestion. *Geological Review*, 57 (2): 216 ~ 217.
- Zhang Shuming, Yu Dagan, Wu Rengui, Zhang Lifan. 2005#. Shoshonitic rock and uranium mineralization in Xiangshan uranium ore-field in Jiangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 29 (4): 527 ~ 536.
- Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Wu Changzhi, Zhai Jianping, Li Weiqiang, Tang Junhua. 2006#. Weiya quartz syenite in early Indosinina from eastern Tianshan Mountains: petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1135 ~ 1149.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, Bai Zhenghua, Qiao Yulou. 2007#. Underplating during late Paleozoic in north Xinjiang—evidence from shoshonitic series volcanic rocks and adakite. *Acta Geologica Sinica*, 81 (5): 606 ~ 619.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, Bai Zhiwei, Qiao Yulou. 2009. Late Paleozoic underplating in North Xinjiang: Evidence from shoshonites and adakites. *Gondwana Research*, 16: 216 ~ 226.
- Zou Haibo, Mary R R, Liu Yongshun, Yao yupeng, Xu Xisheng, Fan Qicheng. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U—Th disequilibrium data. *Chemical Geology*, 200: 189 ~ 201.

An Overview of Studies on Shoshonitic Rocks

JIA Xiaohui^{1,2)}, WANG Xiaodi^{1,2)}, YANG Wenqiang¹⁾, NIU Zhijun¹⁾

1) *China Geological Survey, Wuhan Center of Geological Survey, Wuhan, 430223;*

2) *Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, Wuhan, 430223*

Abstract: Shoshonitic rocks have special characteristics of mineralogy and geochemistry, and important significance of geodynamic and mineralization.

Tremendous progress about shoshonitic rocks has been made in recent years, however, some topics on shoshonitic rocks are still disputable, such as, expansion of its definition, existence of crustal source and discrimination index of intraplate setting.

In this paper, we mainly introduce the current advances of the study on the shoshonitic rocks by data collecting and sorting.

The main conclusions are followings: (1) As an independent rock series, it lacks unambiguous and effective discrimination indexes of petrology, mineralogy and geochemistry. Therefore, the relatively uniform standards need to be established urgently. (2) Shoshonitic rocks related to island arc are enriched in the large ion lithophile elements and light rare earth elements, with significant TNT abnormality. The shoshonitic rocks occurred in oceanic plate have typical characteristics of Ocean Island basalts, while those rocks related to continental intraplate have some features of Island Arc basalts or Ocean Island basalts. (3) Shoshonitic rocks with low and high silicon

contents may be mainly derived from the mantle and crustal competent respectively. However, in most cases, they are originated from magma mixing.

Keywords: shoshonitic rocks, geochemistry, petrogenesis, experimental petrology

Acknowledgement: This article is a research achievement of project entrusted by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41302046) and the China Geological Survey Project (nos. 12120113063600 and DD20160064-01).

First author: JIA Xiaohui, male, born in 1980, Research Associate, mainly engaged in petrology and geochemistry. Email: jxh1226@126.com

Manuscript received on:2016-02-29;Accepted on:2017-09-20;Edited by: ZHANG Yuxu

Doi:10.16509/j.georeview.2017.06.013

《地质学报》(英文版)刘恋副研究员荣获中国科学技术期刊编辑学会 中国科技期刊青年编辑奖(骏马奖)

第八届中国科学技术期刊编辑学会中国科技期刊青年编辑奖(骏马奖)颁奖大会于2017年9月20日在重庆举行。《地质学报》(英文版)专业编辑、刘恋副研究员荣获骏马奖。骏马奖是由中国科学技术期刊编辑学会设立的中国科技期刊青年编辑奖,本奖项每3年评选一次。骏马奖主要奖励40周岁以下从事科技期刊工作的优秀年轻编辑,该奖项在出版界有较高的知名度。

《地质学报》(英文版)是中国主办的最具国际影响力的英文期刊,在世界《SCI》收录期刊中,居中—上游水平。刘恋副研究员自博士毕业就进入《地质学报》(英文版)编辑部,从事期刊的专业编辑工作,踏实好学,勤勤恳恳,尽心尽力,七年如一日,全力进行《地质学报》(英文版)精品化建设,为这一成果的取得作出了重要贡献。

《地质学报》(英文版)现被《SCI》、《CA》等国外24家数据库和网站收录,在《SCI》收录的中国刊物中,其影响因子是第一个达到1.0的中国刊物;多年位居《SCI》收录的世界地学刊物的中—上游水平;刊物论文被《Nature》《Science》等114个刊物引用,超过加拿大、法国、印度、俄罗斯等国家地质学会所办刊物水平。其电子版被Wiley-Blackwell出版公司使用,表明本刊达到了世界刊物水平。

刘恋博士积极参与国际推广工程,有组

织、有计划地把我国一批优秀地学成果推向国际舞台,为提高我国科技人员国际知名度、推动科技创新作出了贡献。借助外文刊物和网站平台优势,刘恋先后参与组织了第34届和第35届国际地质大会论文集、973项目成果、IGCP项目成果、中国特色地学成果(恐龙、古鸟、流体包裹体、青藏高原等)、获国家级奖的地学成果、国际会议论文的组稿、出版工作。此外,刘恋于2013年成功申请国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“第七届世界华人地质科学研讨会”,近300位华人地质学家参会并分享了最新的研究成果,促进了海峡两岸三地及世界华人地质学家之间的学术交流,期刊也借此良机向世界优秀华人地质学家广泛约稿。刊出论文被SCI数据库全文收录,有力的推动了我国从地质大国向地质强国迈进的步伐,为推动我国科技创新、提高我国科技人员的国际知名度做出了重要贡献。

成功申报中国科协“中国科技期刊登峰行动计划”项目,为刊物的国际化发展提供充足支持。为了提高办刊支撑能力,为刊物国际化发展再添强劲动力,2016年刘恋作为答辩人、主要参与人成功申报中国科协“中国科技期刊登峰行动计划”项目,获得办刊经费540万元,为《地质学报》(英文版)成为世界主流地学科技期刊,进入国际科技期刊Q1区的实现提供了充足的资金支持。项目实施过程中,刘恋全程参与期刊国际编委的改选和增补,“青藏高原与特提斯地质研究专辑”的策划、组稿、选稿、编校,参加国际会议积极宣传期刊,约请国际顶级地质学家撰写论文,这些工作为期刊的国际化发展起到了至关重要的推动作用。

大力推动期刊数字化、网络化工程建设,成功申报中国科协“中国地学期刊网维护与建设”项目,维护和改进中国地学期刊网,为中国地学成果走向世界架起了现代化的桥梁。自2008年地质学期刊联盟“中国地学期刊网”(http://www.geojournals.cn/)成立以来,已有我国232个地学刊物加盟,成为我国最大的单学科网站,实现了科技期刊信息传播的四大功能。9年来,

(下转第1623页)

