

越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成及其区域构造意义*

TRAN MyDung^{1, 2} 刘俊来^{1**} NGUYEN QuangLuat² 陈越¹ 纪沫¹ 唐渊¹

TRAN MyDung^{1, 2}, LIU JunLai^{1**}, NGUYEN QuangLuat², CHEN Yue¹, JI Mo¹ and TANG Yuan¹

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

2. Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

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

2. Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

2010-03-23 收稿, 2010-05-18 改回.

Tran MD, Liu JL, Nguyen QL, Chen Y, Ji M and Tang Y. 2010. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks in northwestern Vietnam and regional tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (6): 1902 – 1914

Abstract The Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks are located in western part of the southern segment of Ailao Shan-Red River shear zone, including high-potassic alkaline trachyte, lamprophyre, syenite and alkaline granite. There into, the trachyte lays unconformably upon the Upper Cretaceous sedimentary rocks. The syenite and alkaline granite intruded the Triassic terrigenous sedimentary rocks, Jurassic rhyolite and amphibole-bearing granitic intrusion of 40 ~ 35Ma. The Pu Sam Cap potassic alkaline rocks are geochemically characterized by relatively low TiO₂ (<0.8%), P₂O₅ (<0.64%) and FeO* (<7.74%) and high Na₂O (1.41% ~ 4.5%) and K₂O (5.22% ~ 9.4%), coupled with high contents of incompatible trace elements. They are ultrapotassic or shoshonitic enriched in LILE, LREE and compatible elements, and have marked Nb, Ta and Ti depletion, which is similar to a subduction related component and has the characteristics of post-collisional arc type potassic igneous rocks. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating gives the emplacement age of 32.70 ± 0.24Ma for high-potassic syenite and 35.1 ± 0.06Ma for alkaline granite. Their $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are -2.8 ~ -2.5 and -4.9 ~ -0.1 with two-stage Hf model ages of 950 ~ 1286Ma and 1107 ~ 1421Ma, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -5.63 ~ -3.26, high ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (0.706254 ~ 0.707273) and low ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd (0.512336 ~ 0.512447). It is suggested that the Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks were resulted from mixing between mantle and crust-derived magmas and may be derived from an EM2 mantle. The remnant of the subduction of Yangtze plate beneath the Indochina plate during the closure of the Mojiang Paleotethyan oceanic basin, and the Cenozoic continental collision between Indian and Eurasian plates provide a broad tectonic background for the Pu Sam Cap potassic alkaline magmatism.

Key words Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks; zircon U-Pb age; Hf isotope; Mantle source; Ailao Shan-Red River shear zone; The northwest of Vietnam

摘要 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩位于哀牢山剪切带南段西侧,由粗面岩、煌斑岩、碱性正长岩与碱性花岗岩组成。其中粗面岩不整合于晚白垩世陆相沉积岩之上,碱性侵入岩侵入到三叠纪陆源沉积岩、侏罗纪流纹岩及 40 ~ 35Ma 含角闪石二长岩-花岗岩中。该杂岩的岩石具有低 TiO₂ (<0.8%)、P₂O₅ (<0.64%) 和 FeO* (<7.74%), 高 Na₂O (1.41% ~ 4.5%) 和 K₂O (5.22% ~ 9.4%) 的地球化学属性,属于高钾碱性玄武质到高钾碱性长英质岩浆岩类型与钾质至超钾质岩浆系列。这套岩石富集大离子亲石元素 LILE、轻稀土元素 LREE 和一组相容元素,具有明显的 Ta、Nb 和 Ti 异常,表明 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩形成于与俯冲带有关的大陆弧和后碰撞弧构造环境。锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学研究表明碱性正长岩与碱性花岗岩分别形成于 32.70 ± 0.24Ma、35.1 ± 0.06Ma,上述年龄代表了 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩的侵入岩结晶年龄。两个样品

* 本文受国家“973”项目(2009CB421001)、国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200811008)、教育部 111 计划(B07011)和科技支撑计划(2006BAB01A03)联合资助。

第一作者简介: TRAN My Dung, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事区域构造与成矿规律分析研究, E-mail: meiyongshixiang@126.com

** 通讯作者: 刘俊来, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为构造地质学和构造物理学, E-mail: jliu@cugb.edu.cn

中锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围分别为 $-2.8 \sim 2.5$ 和 $-4.9 \sim 0.1$, 在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图上分析点落在下地壳和亏损地幔演化线之间, 两阶段模式年龄变化范围为 $950 \sim 1286\text{Ma}$ 和 $1107 \sim 1421\text{Ma}$ 。该杂岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围 $-5.63 \sim -3.26$, 具有低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值 ($0.512336 \sim 0.512447$) 和高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 ($0.706254 \sim 0.707273$), Sr-Nd 同位素相关图上接近于 EM2 地幔端元趋势线, 与大理地区新生代高钾岩浆岩十分相似, 表明 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩的岩浆是慢源岩浆和壳源岩浆的混合结果, 同时可与大理地区新生代高钾岩浆岩对比, 它们形成于哀牢山-红河左行走滑活动之前, 墨江古特提斯洋盆的消减与印度-欧亚大陆碰撞活动提供了宏观区域性构造背景。

关键词 Pu Sam Cap 高钾碱性岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 地幔源区; 哀牢山-红河剪切带; 越南西北部

中图法分类号 P588.12; P597.3

哀牢山-红河剪切带北起青藏高原东南缘以北西-南东走向延伸至南海, 是新生代印度-欧亚碰撞过程中起着重要调节作用的一条构造界线 (Tapponnier *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1995; 刘俊来等, 2006)。沿该带的两侧发育一系列晚始新世至早渐新世时期高钾碱性岩。这套岩浆岩的成因与形成机制是目前研究的热点问题。有一种观点认为哀牢山剪切带新生代高钾岩浆活动的形成机制与韧性剪切活动及高级变质作用关系密切 (Leloup and Kienast, 1993; Schärer *et al.*, 1994), 该岩浆岩是同剪切作用形成的, 所以岩浆结晶年龄可以代表剪切活动的时代 (Zhang and Schärer, 1999; Liang *et al.*, 2007)。另一种观点认为 $40 \sim 30\text{Ma}$, 印度-欧亚板块陆陆碰撞过程使藏东地区发生了地壳减薄陆内拉伸, 形成了一系列的高钾碱性岩, 以大理地区的高钾碱性岩与越南西北 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩为代表 (Chung *et al.*, 1997); $28 \sim 22\text{Ma}$, 哀牢山-红河剪切带左型走滑活动将该岩浆岩自北向南推移约 600km 到现在的位置 (Chung *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1998, 2000)。Wang *et al.* (2001) 提出藏东地区高钾新生代构造-岩浆活动可分成两个阶段: 第一阶段 ($40 \sim 28\text{Ma}$) 为走滑挤压环境的俯冲, 岩浆活动主要沿着哀牢山-红河剪切带分布; 第二阶段 ($16 \sim 0\text{Ma}$) 藏东地区受到东-西伸展过程的解压作用, 岩浆活动是年轻的交代地幔在减压诱导熔融机制下产生的。刘俊来等 (2006) 研究发现三江地区构造活动阶段性发展的特点与区域岩浆活动的阶段性发展相对应, 区域性递进收缩事件与走滑事件发生于碰撞过程的早期阶段, 随后伴随着早期具有岩石圈板块俯冲性质的碰撞弧高钾岩浆活动, 后期的递进伸展事件诱发了板内伸展环境中的晚期高钾岩浆活动; 二者之间的碱性岩浆活动间歇期, 对应着区域构造体制的转变与区域伸展作用的发生, 变质核杂岩的发育与钙碱性岩浆活动是其最直接的表现。王建等 (2003) 研究发现大理-剑川地区高钾碱性岩浆岩的地球化学属性具有岩浆弧型特征, 形成于与俯冲-消减有关的后碰撞造山环境。

Pu Sam Cap 杂岩 (越南) 主要分布于哀牢山-红河剪切带的西缘 (图 1), 从高钾碱性玄武质到高钾碱性长英质呈一个岩浆岩系列。地球化学与 Ar-Ar 测年研究提出该岩石系列为第三纪印度-欧亚碰撞发生陆内拉张环境下形成的高钾碱性岩浆岩系列 (Chung *et al.*, 1997; Tran *et al.*, 1999)。本文主要依据岩石地球化学、Sr-Nd 同位素、锆石 LA-ICPMS U-Pb

测年和锆石 Hf 同位素分析结果讨论该杂岩的形成时代, 成因及其构造意义。

1 区域地质背景

沿哀牢山红河的走向发育四个狭长的变质杂岩带, 由北向南依次为雪龙山、点苍山、哀牢山和大象山 (Day Nui Con Voi)。其中哀牢山地体长 500km , 宽 20km , 主要由角闪-绿片岩相变质岩组成, 其西缘为一条超基性-基性岩体与低级变质岩带, 是特提斯洋壳和地幔挤入的残留体 (张旗等, 1995), 与马江 (Song Ma) 缝合带可连接形成华南与印支板块的缝合带 (Chung *et al.*, 1997; Yumul *et al.*, 2008), 该缝合带封闭于印支期的晚二叠-早三叠世 (Lepvrier *et al.*, 2004)。

Pu Sam Cap 杂岩位于范士版 (Fan Si Pan) 构造带西侧 (图 1)。在区域构造上相当于哀牢山剪切带向南延伸的部分 (Leloup *et al.*, 2001)。该构造带主要由高级变质岩与花岗岩组成。高级变质岩由强烈热变形的元古宙深变质岩系构成, 包括一套黑云母片麻岩、角闪石黑云母片麻岩、石榴石黑云母片岩、大理岩与斜长角闪岩。岩石中的高温矿物组合包括: 夕线石 + 石榴石 + 十字石 + 蓝晶石、角闪石 + 斜长石、透辉石 + 透闪石 + 橄榄石等构成岩石的主叶理与线理构造。侵入于变质岩系中的大规模花岗岩体同时遭受了强烈的剪切变形改造, 发育了叶理微弱而线理强烈的构造岩。变形的深成岩中具有微弱发育的叶理与发育的线理构造是范士版带最典型的构造特点。范士版带岩石中线理的主体产状均为具有较小的倾状角较小, 倾状向 NW 或 SE。在具有叶理的剪切变质岩中, S-C 组构、 σ 与 δ 组构等不对称组构的主要矿物形式指示左行走滑剪切的特征。金平-沱江带内的岩石以古生代沉积岩与上二叠-三叠统陆源相岩石系列为主, 各种二叠纪基性喷出岩夹层分布与石炭纪灰岩沉积岩不整合接触, 形成一个独特的可与峨眉山玄武岩对比的岩浆系列, 形成于大陆裂谷环境 (Gatinsky and Thuc, 1982; Chung *et al.*, 1997)。秀丽 (Tu Le) 火山岩带由侏罗纪-白垩纪的陆内火山岩浆系列组成。根据岩石的化学成分特征, 秀丽火山岩带的岩石主要由三期岩浆活动组成: 早期粗面岩喷出岩, 分布在该带的西南部; 中期玄武岩、玄武岩-安山岩以及辉长岩, 岩体分布在该带的中心; 晚期为长英质喷出岩, 分布在该带的北部; 秀丽火山岩带于燕山期运动形成 (Nguyen,

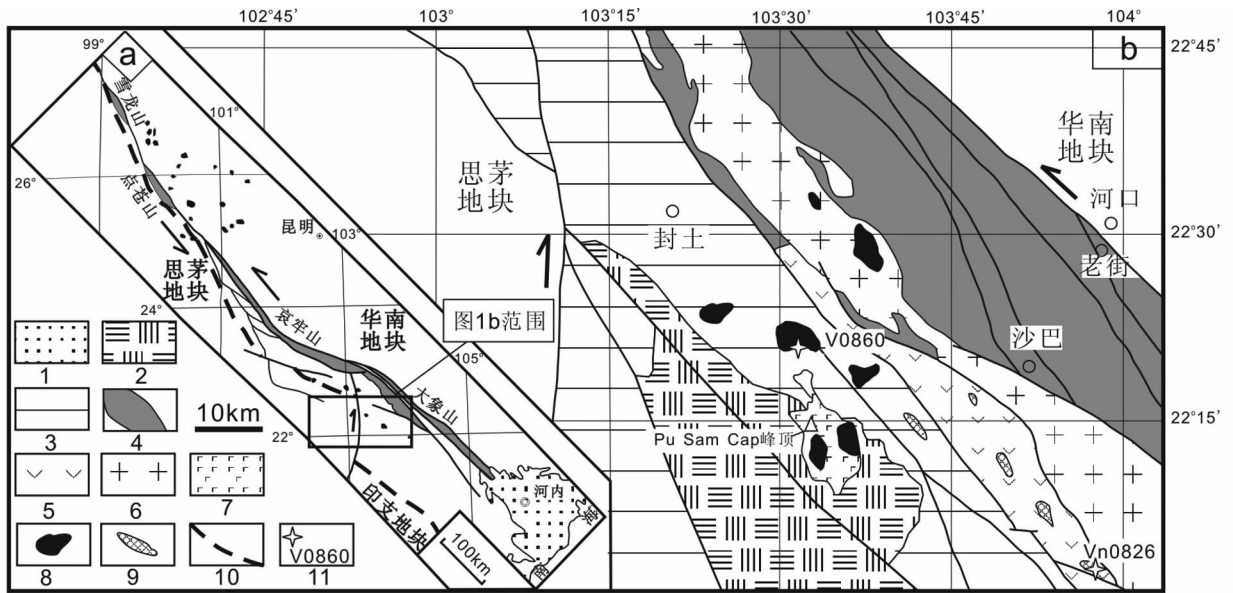


图1 哀牢山红河地区新生代高钾碱性岩岩体分布图(a,据 Wang *et al.*, 2000 修改)与范士版构造带地质简图及 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的采样位置(b)

1-红河三角洲;2-晚白垩统陆相沉积岩;3-金平-沱江带古生代沉积岩;4-哀牢山-范士版变质岩带;5-J-K 秀丽火山岩带;6-40 ~ 35Ma Ye Yen Sun 含角闪花岗岩体;7-Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩的喷出岩;8-正长岩;9-碱性花岗岩;10-缝合带;11-采样位置

Fig. 1 Simplified geologic map of the Ailao Shan- Red River shear zone and location of Cenozoic high-potassic alkaline rocks (a, modified after Wang *et al.*, 2000) and simplified geological map of the Fan Si Pan tectonic belt and sample locality map of Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks (b)

1-Red River delta; 2-Late Cretaceous terrigenous sediment rocks; 3-Jinping-Song Da Paleozoic sediment rocks; 4-Ailao Shan- Fan Si Pan metamorphic belt; 5-J-K Tu Le volcanic belt; 6-40 ~ 35Ma Ye Yen Sun amphibole-bearing popyhyritic granite; 7-Pu Sam Cap high-potassic extrusive rocks; 8-Syenite; 9-Akaline granite; 10-Suture zone; 11-Location of sampling

2003)。沱江构造带与秀丽火山岩带的变形改造主要出现在与范士版构造带交界(Leloup *et al.*, 2001),构造带的内部普遍发育了脆性走滑正断层。

Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩主要分布在封土地区(图1b),由高钾碱性喷出岩、高钾碱性侵入岩与煌斑岩组成(Dao and Huynh, 1995; Tran, 1999)。高钾碱性喷出岩出露面积约90km²,主要分布在 Pu Sam Cap 峰顶,由粗面岩、粗面安山岩、粗面流纹岩与凝灰岩组成,且不整合于晚白垩世 Yen Chau 组陆内沉积岩与晚三叠世灰岩之上。其中粗面岩为这套岩石的主要成分,岩石呈浅灰,具有明显的斑状结构,斑晶(20% ~ 30%)主要为钾长石(粒径1 ~ 5mm)与少量霓石(粒径0.6 ~ 2mm);其基质主要由黑云母、钾长石与霓石微晶体组成。空间分布上这套喷出岩与正长岩、煌斑岩有侵入接触关系。正长岩呈小规模岩体(2 ~ 10km²)侵入于早期喷出岩或晚三叠世灰岩与早始新世(40 ~ 35Ma)Ye Yen Sun 含角闪花岗岩体。岩石呈浅灰色或肉红色,岩石有明显的似斑状结构,似斑晶主要为钾长石、霓石与少量钠闪石;其余为钾长石为主的长英质及暗色矿物均在1mm以下,具半自形粒状结构,构成基质与似斑晶无截然界限。碱性花岗岩呈小岩体(<1km²)或岩墙,侵入过侏罗-白垩系流纹岩(Dao and

Huynh, 1995)(图1b)。岩石有块状结构,呈肉红色,具有似斑状结构,斑晶主要为钾长石粒径在2 ~ 5mm之间。基质为正长石与黑云母为主,矿物均在1mm以下,具半自形粒状结构。碱性煌斑岩呈岩脉宽度2 ~ 7m切过碱性喷出岩与沸煌岩喷出岩或晚三叠世灰岩与晚白垩世沉积岩,岩石成分主要为云煌岩,沸煌岩与斜闪正煌岩。其中云煌岩占主要的成分,岩石中具有明显的斑状结构,斑晶占岩石中6% ~ 32%,包括黑云母(10% ~ 20%),辉石(5% ~ 10%),钾长石(0% ~ 3%)。基质占岩石中68% ~ 94%,主要为钾长石(45% ~ 50%),黑云母(10% ~ 20%),辉石(5% ~ 10%),橄榄石(0% ~ 5%)。

2 样品选择与分析方法

2.1 样品采集位置及其岩石学特征

本文所采集的样品为碱性正长岩与碱性花岗岩。

V0860 样品采自东包岩体距封土县城东南约30km处(N22°21'12"; E103°30'55")。岩体面积约10km²,主要由碱性正长岩组成,并侵位于晚三叠世灰岩、页岩与砂岩中。围岩发育大理岩化与角岩化的热蚀变的现象。岩石呈灰白-浅

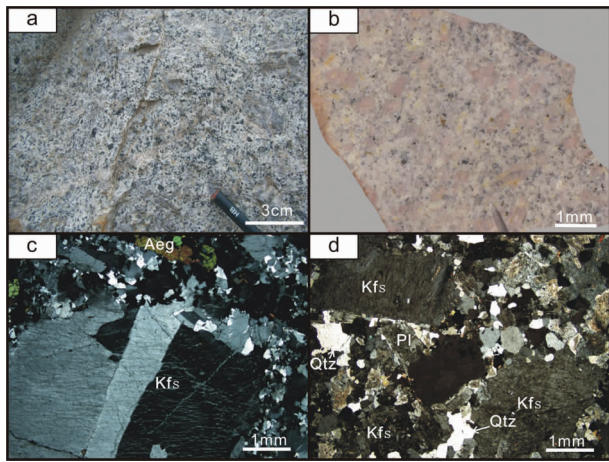


图2 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的宏观和微观特征
a-正长斑岩 (V0860); b-碱性花岗岩 (VN0826); c-钾长石斑晶与霓石斑晶; d-碱性花岗岩具有似斑状机构. Kfs-钾长石; Aeg-霓石; Pl-斜长石; Qtz-石英

Fig. 2 Macro- and microscopic characters of the Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks

a-porphry syenite (V0860); b-alkaline granite (VN0826); c-K-feldspar phenocryst and aegirine phenocrysts; d-alkaline granite with porphyroblast texture. Kfs- Potassium feldspar; Aeg-Aegirine; Pl-Plagioclase; Qtz-Quartz

肉红色, 具明显的似斑状结构, 斑晶颗粒粒度较大 (1 ~ 2cm), 主要为灰白色或肉红色的钾长石 (图 2a)。在显微镜下岩石中主要矿物组成为钾长石 75% ~ 80%, 斜长石 (0% ~ 5%), 石英 (0% ~ 2%), 角闪石 (3% ~ 5%), 霓石 (10% ~ 20%), 副矿物有榍石、锆石与磷灰石。斑晶含钾长石与少量霓石, 其中碱性长石晶体呈板状外形, 常见卡式双晶与条纹结构, 霓石呈绿色, 多色性明显 (图 2c)。

VN0826 样品采自小规模岩体距申渊县城北东约 5km 处 (22°02'45"; 103°57'20")。岩体呈透镜状宽约 60 ~ 70m, 向北西延长, 并侵位于秀丽火山岩带流纹岩中 (图 1b)。在岩体与围岩的边界发育一系列的石英小脉体, 围岩局部发生绿泥蚀变现象。岩石呈浅肉红色, 中细粒结构, 块状构造 (图 2b), 边缘发育弱定向性。在显微镜下, 主要矿物组成为石英 (30% ~ 35%), 钾长石 (50% ~ 60%), 斜长石 (0% ~ 10%), 黑云母 (0% ~ 5%), 碱性辉石 (5% ~ 10%), 碱性角闪石 (5% ~ 7%), 少量角闪石, 斑晶主要为钾长石 (图 2d)。

2.2 分析方法

主量元素与 Sr-Nd 同位素分离在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室进行, 采用稀释法进行测定。微量元素与稀土元素采用两酸高压反应釜溶样方法预处理, 使用 Agilent 7500a ICP-MS 测定, 使用 AGV-2、BHNO-2、BCR-2、BGM-1、GSR-1 进行分析质量监控, 元素分析数据误差 < 10%。Sr-Nd 同位素分离利用 Finnigan MAT-261 完成

同位素比值测试。采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 分别对 Sr 和 Nd 同位素比值标准化。

锆石 U-Pb 年龄分析和锆石 Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 LA-MC-ICPMS 实验室完成。锆石 U-Pb 年龄分析用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 与 193nm 激光器, 采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST 610 进行仪器最佳化, 采用 91500 标准锆石作为外标。激光束斑直径为 63 μm , 普通铅校正采用 Anderson (2002) 的方法, 年龄采用 ISOPLOT3.0 程序计算, 仪器的运行条件及详细的分析过程参见 Wu *et al.* (2006)。锆石 Hf 同位素测试在 Neptune MC-ICP-MS 与 193nm 激光取样系统上进行, 分析时激光束直径 63 μm , 用锆石国际标样 91500 做外标, 激光脉冲频率为 5 ~ 10Hz, 激光束脉冲能量为 100mJ。仪器的运行条件及详细的分析过程参见 Wu *et al.* (2006)。本次实验 91500 的测定结果是 1060.5 ~ 1067.5Ma, 与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致。

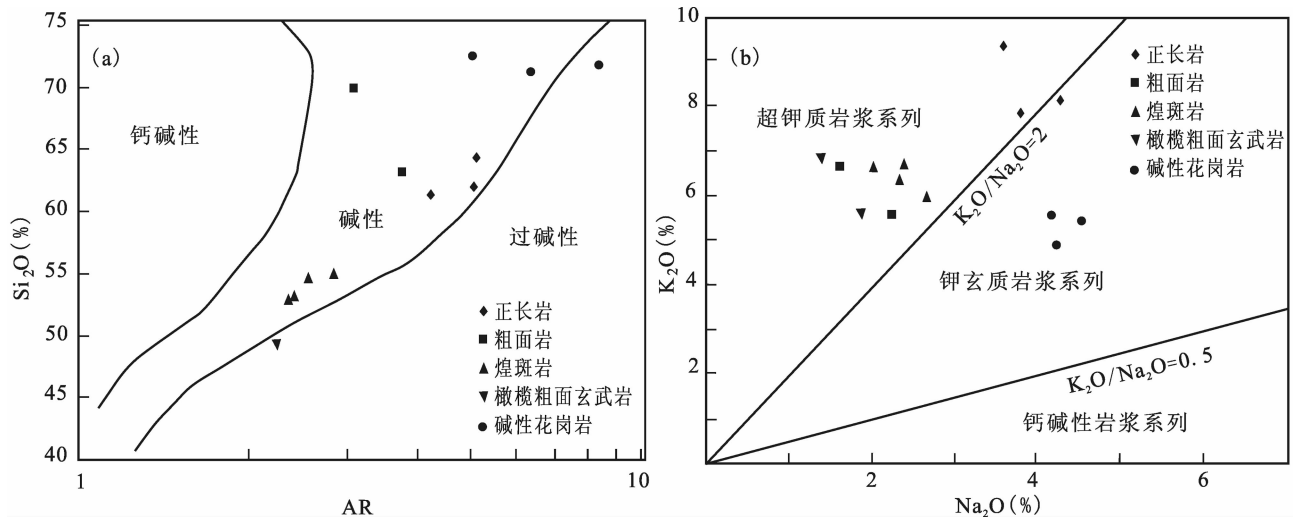
3 元素地球化学

Pu Sam Cap 杂岩的主、微量元素分析结果见表 1。样品具低 TiO_2 (< 0.8%)、 P_2O_5 (< 0.64%) 与 FeO^* (< 7.74%), 高 Na_2O (1.41% ~ 4.5%) 与 K_2O (5.22% ~ 9.4%)。Pu Sam Cap 高钾碱性岩的 SiO_2 含量变化范围为较大 49.31% ~ 72.48%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 在 7.66% ~ 12.97% 之间; 多数样品落入了碱性岩浆系列 (图 3a)。样品中 K_2O 含量较高 ($\text{K}_2\text{O} > 5.22\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值界于 1.24% ~ 4.99% 之间, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解上落在钾质至超钾质岩浆系列 (图 3b)。在 Harker 图解中 (图 4) TiO_2 , MgO , CaO , FeO , P_2O_5 氧化物均随 SiO_2 含量的增加而降低, 并呈较好的相关关系, 明显负相关; Na_2O 与 SiO_2 呈明显的正相关。表明 Pu Sam Cap 杂岩不同岩性之间为同源岩浆演化关系。 CaO , FeO , P_2O_5 , TiO_2 与 MgO 氧化物显示很好的正相关关系, 而且 CaO , FeO , P_2O_5 , TiO_2 , MgO 氧化物对之间也显示很好的正相关性 (图 4)。这表明橄榄石、辉石、磷灰石、钛铁矿等可能控制岩浆主量元素变化的分离矿物相, Pu Sam Cap 杂岩的各种岩石可能是分离结晶形成。稀土元素配分模式 (图 5b) 表明 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的岩石强烈富集 LREE, Eu 异常不明显 ($\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 1.36$), 并且曲线模式协调一致。Pu Sam Cap 杂岩代表性样品微量元素原始地幔归一化图 (图 5a) 表明, LILE 明显富集, HFSE 除个别元素 (Zr, Hf) 外, 相对亏损。Ta, Nb 和 Ti 呈明显的“TNT”负异常。稀土元素配分模式和微量元素原始地幔归一化图表明 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩与滇西大理-剑川地区的高钾碱性岩微量元素原始地幔归一化图非常相似, 表明它们可能形成于相似的构造环境。这些结果表明 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的形成与俯冲带相关 (Miller *et al.*, 1999)。

表1 Pu Sam Cap 高钾碱性岩主量 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 组成Table 1 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) composition of the Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks

样品号	V0860	H43	V111	P193	P210	T1737	T1740	RR35B	T1735	T1772	T1589	VN0826	L. 22001	L. 22001/1
岩性	正长岩			粗面岩			煌斑岩			粗面玄武岩		碱性花岗岩		
SiO ₂	61.44	64.29	62.15	69.96	63.29	52.88	53.28	55.15	54.66	49.55	49.31	72.48	71.22	71.82
TiO ₂	0.73	0.3	0.41	0.23	0.76	0.8	0.78	0.54	0.78	0.6	0.74	0.18	0.45	0.44
Al ₂ O ₃	14.53	16.81	15.63	14.69	14.04	15.36	15.62	12.86	16	11.8	12.01	14.89	12.53	12.38
Fe ₂ O ₃	4.99	2.84	4.01	2.1	6.39	6.73	6.28	6.39	6.47	7.74	7.52	0.98	3.15	3.28
FeO													0.8	0.72
MnO	0.15	0.06	0.14	0.11	0.21	0.15	0.15	0.13	0.14	0.12	0.18	0.002	0.17	0.08
MgO	0.92	0.17	0.49	1.23	2.69	5.59	4.99	3.7	4.35	7.11	8.24	0.18	0.5	0.14
CaO	4.49	2.52	2.98	0.9	0.56	6.52	6.12	5.7	5.29	7.57	7.98	0.4	0.4	0.3
Na ₂ O	3.76	3.57	4.2	2.14	1.65	2.61	2.32	2.05	2.37	1.41	1.78	4.5	4.21	4.15
K ₂ O	7.98	9.4	8.27	5.83	6.85	6.23	6.6	6.85	6.93	7.04	5.88	5.73	5.22	5.84
P ₂ O ₅	0.29	0.08	0.18	0.11	0.21	0.55	0.53	0.42	0.6	0.64	0.5	0.066	0.088	0.048
LOI	0.24	1.5	4	2.6	3.08	2.45	3.24	5.22	2.41	6	5.85	0.56	0.31	0.46
Rb	283	280	242	313	409	163	250	359	204	402	298	200	409	296
Sr	1831	1606	2535	715	979	2555	1776	821.7	1465	1017	1628	769	615	1204
Y	34.77	37.91	43.52	30.3	22.3	25	37.2	29.62	30.7	37.86	14.7	15.8	22.3	18.94
Zr	208	91.8	559	261	244	469	546	210	449	150	264	209	244	180
Nb	38.0	13.0	32.3	22.7	9.1	13.1	21	25.8	15.5	12.1	15.2	21.8	9.10	23.4
Ba	4398	6655	7511	1083	15.86	3100	3600	1662	3086	1449	1721	1858	1422	1217
La	79.09	31.35	146.1	121.9	31	117	118	51.16	121	32.29	48.8	46	128.1	117.8
Ce	163.9	70.53	268.2	179.4	72	185	188	97.63	185	59.09	89	75.9	269.6	268.3
Nd	77.27	44.09	91.79	81.84	30	81	83	44.02	78	33.59	38	25.67	79.1	71.97
Sm	13.36	9.96	14.65	16.33	5.8	17.2	18	8.08	16.3	7.43	7.8	4.1	20.42	19.04
Eu	3.41	2.55	3.27	3.67	1.5	3.7	3.8	1.72	3.71	1.76	2.3	1.01	3.75	3.73
Gd	10.35	3.28	10.07	13.3	5	13.6	11.8	6.26	12.7	6.88	6.9	3.29	13.3	12.4
Tb	1.26	1.2	1.46	1.79	0.75	1.91	1.7	0.91	1.81	1	1	0.43	2.11	1.67
Yb	2.67	3.03	3.38	2.88	1.44	2.58	2.46	2.74	2.61	2.89	1.9	1.52	3.32	7.78
Lu	0.41	0.46	0.52	0.6	0.2	0.33	0.32	0.37	0.34	0.41	0.2	0.22	0.4	0.35
Hf	5.27	3.89	13.28	5.4	4.2	9.2	9.6	4.82	9.5	3.97	4.3	5.91	4.2	5.09
Ta	2.33	0.8	1.49	1.8	0.7	1.4	1.6	1.61	1.6	0.74	0.61	1.5	0.7	1.77
Th	18.29	10.07	38.12	28	11.7	4.3	4.5	16.74	4.2	11.78	14.7	27.49	11.7	24.83
U	4.71	2.7	9.31	12	5.6	1.4	13.4	4.74	1.5	2.42	3.1	5.57	5.6	1.67
δ Eu	0.89	1.36	0.82	0.76	0.85	0.74	0.80	0.74	0.79	0.75	0.96	0.84	0.70	0.74

V0860 与 VN0826 来自本文; V111, P193, P210, T1772, T1589, T1737, T1740, T1735, RR35B 来自 Tran *et al.*, 2004; L. 22001, L22001/1 来自 GDMGV, 2003

图3 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的 AR-SiO₂ 碱度率关系图 (a, 据 Wright, 1969) 与 K₂O-Na₂O 图解 (b, 据 Turner *et al.*, 1996)Fig. 3 Diagram of AR - SiO₂ (a, after Wright, 1969) and K₂O-Na₂O (b, after Turner *et al.*, 1996) for Pu Sam Cap complex

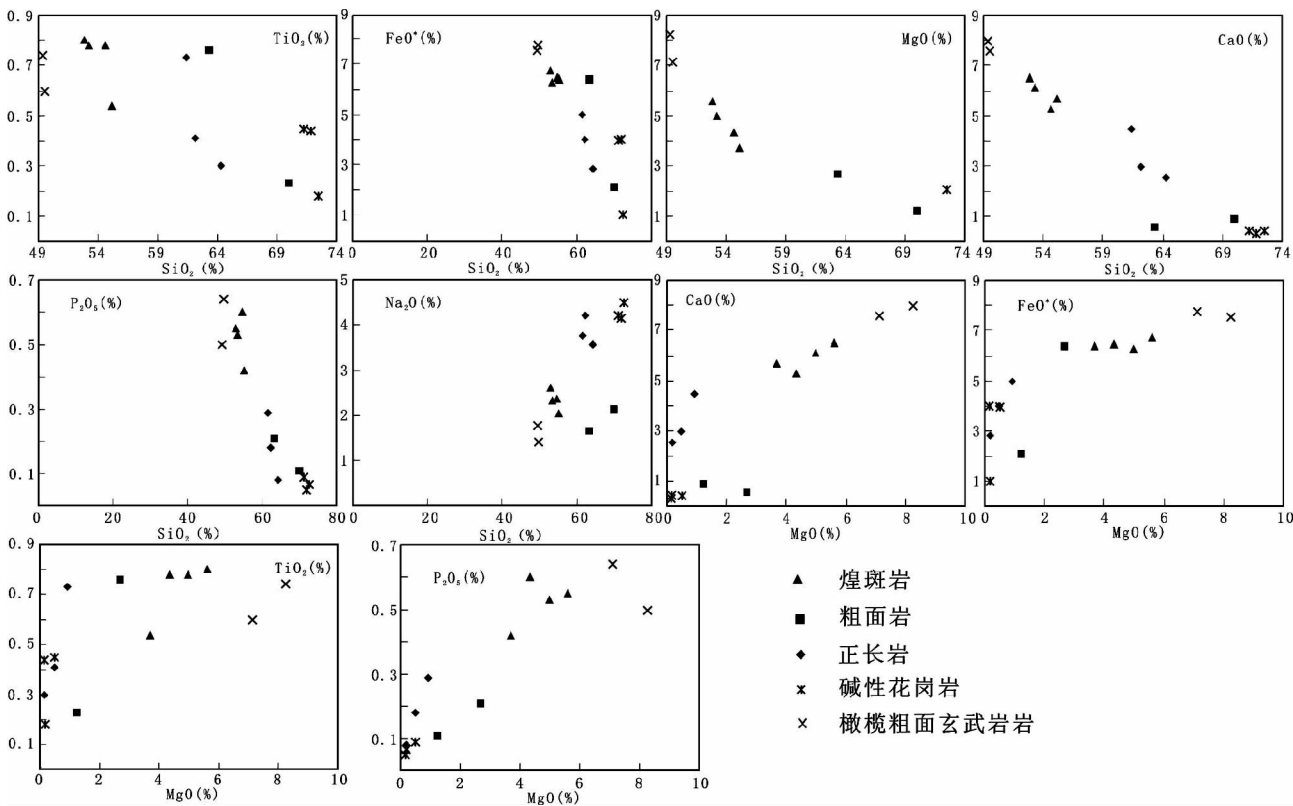


图 4 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的 Harker 图解

Fig. 4 Harker diagrams for Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks

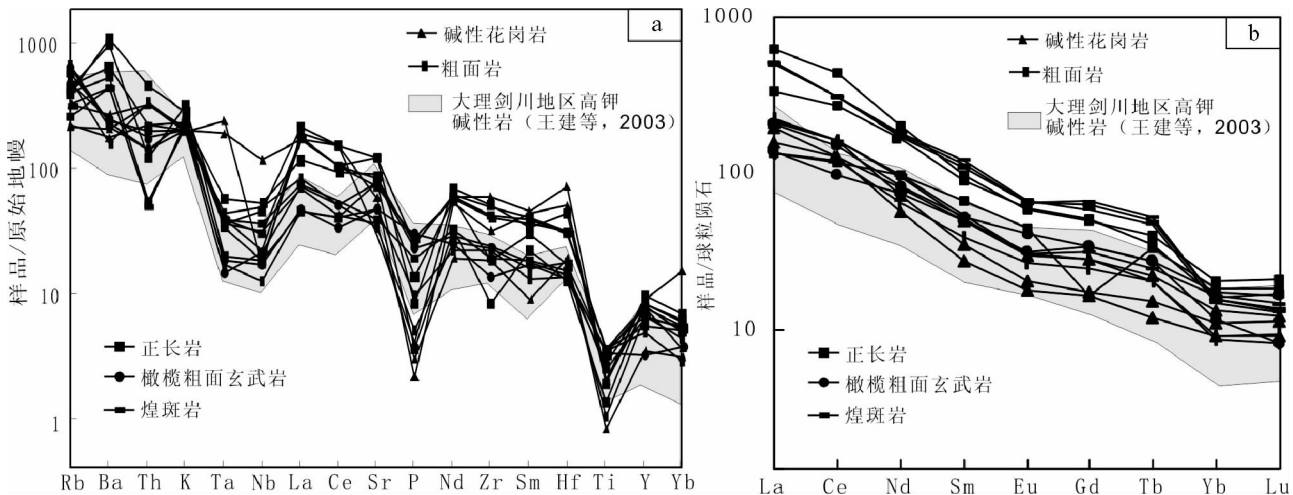


图 5 Pu Sam Cap 高钾碱性岩不相容元素原始地幔归一化图解 (a) 与球粒陨石标准化的 REE 配分模型 (b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Primitve mantle normalized incompatible elements abundances (a) and chondrite-normalized rare earth element distribution patterns for Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks (b) (after Sun and McDonough, 1989)

4 锆石 U-Pb 年代学

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本文为 V0860 与 VN0826 样品进行了 U-Pb 年龄测试

(表 2)。样品中的锆石多为他形,少量为晶形较好的短柱状,锆石晶体的长度为 50 ~ 300 μm ,长度与宽度比值主体为 1.5 : 1,少量为 2 : 1。阴极发光 (CL) 图像显示 (图 6a, b), 锆石具有典型的震荡韵律环带,显示出岩浆成因锆石的特征。所有测点的 Th/U 比值都比较高,大部分测点的 Th/U 比值为 0.4 以上,表明这些锆石为典型岩浆成因锆石 (吴元

表2 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄

Table 2 Zircon of LA-MC-ICPMS U-Pb isotopic data of Pu Sam Cap K-rich alkali magmatic rocks

分析 点号	含量($\times 10^{-6}$)				同位素比值 $\pm 1\sigma$						年龄(Ma) $\pm 1\sigma$					
	Pb	Th	U	Th/U 比值	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
01	31.31	1074.93	1536.33	0.70	0.04425	19.4	0.03086	12.6	0.00506	1.4	-58	42	31	1	32.5	0.9
02	77.91	3780	3849.57	0.98	0.04415	14.9	0.0321	10.2	0.00527	1.4	-63	31	32	1	33.9	0.9
03	54.21	1463.66	2813.53	0.52	0.0441	17.8	0.03036	11.5	0.00499	1.4	-65	38	30	1	32.1	0.9
04	12.48	275.08	587.66	0.47	0.0434	28.9	0.0316	19.9	0.00528	1.7	-102	81	32	2	34	1
05	27.94	840.28	1371.24	0.61	0.04556	19.9	0.03259	13.3	0.00519	1.5	-25	38	33	1	33.4	1
06	60.69	1338.23	3100.36	0.43	0.04538	18.2	0.03087	11.5	0.00493	1.4		33	31	1	31.7	0.9
07	85.5	2353.69	4107.08	0.57	0.0455	11.1	0.032	7.5	0.0051	1.3	-28	22	32	0.7	32.8	0.8
08	71.93	2069.5	3552.22	0.58	0.04445	16.9	0.03173	11.3	0.00518	1.4	-47	33	32	1	33.3	0.9
09	2.84	54.96	117.59	0.47	0.04783	103.1	0.03311	67.9	0.00502	3.6	91	277	33	7	32	2
10	65.71	2524.84	3307.68	0.76	0.04456	18	0.03147	11.9	0.00512	1.4	-42	35	31	1	32.9	0.9
11	38.61	1332.49	1879.36	0.71	0.04685	23.7	0.03328	15.6	0.00515	1.6	42	51	33	2	33	1
12	61.54	2341.47	3318.54	0.71	0.04787	17.8	0.03157	10.9	0.00478	1.3	93	38	32	1	30.7	0.8
13	61.52	1226.89	3076.76	0.40	0.0434	16.2	0.03144	11	0.00526	1.4	-102	37	31	1	33.8	0.9
14	28.08	602.64	1469.55	0.41	0.0473	31.8	0.03181	19.7	0.00488	1.7	64	76	32	2	31	1
15	39.56	1131.71	1884.08	0.60	0.04297	18.2	0.03159	12.5	0.00533	1.5	-125	44	32	1	34.3	1
16	69.44	2955.01	3484.51	0.85	0.05209	15.9	0.03621	10.3	0.00504	1.3	289	29	36	1	32.4	0.8
17	16.77	598.02	730.48	0.82	0.04771	23.3	0.03458	15.7	0.00526	1.6	85	53	35	2	34	1
18	8.42	249.19	396.84	0.63	0.04534	51.6	0.03297	35	0.00527	2.5	-2	147	33	3	34	2
19	59.01	2445.58	2986.52	0.82	0.0426	15.7	0.02895	10	0.00493	1.3	-144	37	29	1	31.7	0.8
20	56.5	1636.92	2794.69	0.59	0.04514	25	0.03104	15.9	0.00499	1.6	-12	52	31	2	32	1
21	75.39	3175.69	3760.4	0.84	0.04481	19.4	0.03168	12.8	0.00513	1.4	-29	38	32	1	33	0.9
高钾碱性花岗岩(VN0826 样品)																
01	9.46	750.4	434.97	1.73	0.04295	45.2	0.03315	0.00328	0.00559	2.4	-126	137	33	3	36	2
02	38.99	129.76	1887.27	0.07	0.04546	26.7	0.0335	0.00182	0.00534	1.8	-31	57	33	2	34	1
03	4.66	134.13	215.68	0.62	0.03742	74.7	0.02888	0.00557	0.0056	3.2	-445	285	29	5	36	2
04	11.77	488.53	547.42	0.89	0.04866	48.1	0.03741	0.00343	0.00557	2.5	131	124	37	3	36	2
05	108.17	904.77	4988.09	0.18	0.04535	9	0.03527	0.00069	0.00564	1.4	-2	23	35.2	0.7	36.3	0.9
06	10.62	779.48	540.43	1.44	0.05789	56.4	0.04091	0.00367	0.00512	2.3	526	119	41	4	33	1
07	40.09	1012.3	1939.61	0.52	0.04531	14.4	0.03376	0.00102	0.0054	1.4	-4	26	34	1	34.7	0.9
08	5.67	448.34	310.63	1.44	0.05263	62.8	0.03471	0.00385	0.00478	2.4	313	160	35	4	31	2
09	20.61	1128.8	945.66	1.19	0.04884	26.4	0.03863	0.00194	0.00573	1.8	140	62	38	2	37	1
10	6.63	320.96	358.76	0.89	0.05709	89.9	0.03833	0.00554	0.00487	3.3	495	202	38	5	31	2
11	14.61	467.78	740.72	0.63	0.05333	53.5	0.03827	0.0035	0.0052	2.5	343	122	38	3	33	2
12	19.9	583.14	885.08	0.66	0.06134	36.4	0.05033	0.00269	0.00595	2.1	651	58	50	3	38	1
13	10.34	415	462.8	0.90	0.06097	119.3	0.04827	0.00913	0.00574	2.9	638	423	48	9	37	2
14	16.74	1534.01	843.83	1.82	0.05452	30.2	0.04003	0.00204	0.00532	1.7	393	60	40	2	34	1
15	4.73	180.07	236.99	0.76	0.05328	58.9	0.03955	0.0041	0.00538	2.4	341	154	39	4	35	2
16	11.79	477.16	558.9	0.85	0.06009	48.2	0.04701	0.0034	0.00567	2.4	607	86	47	3	36	2

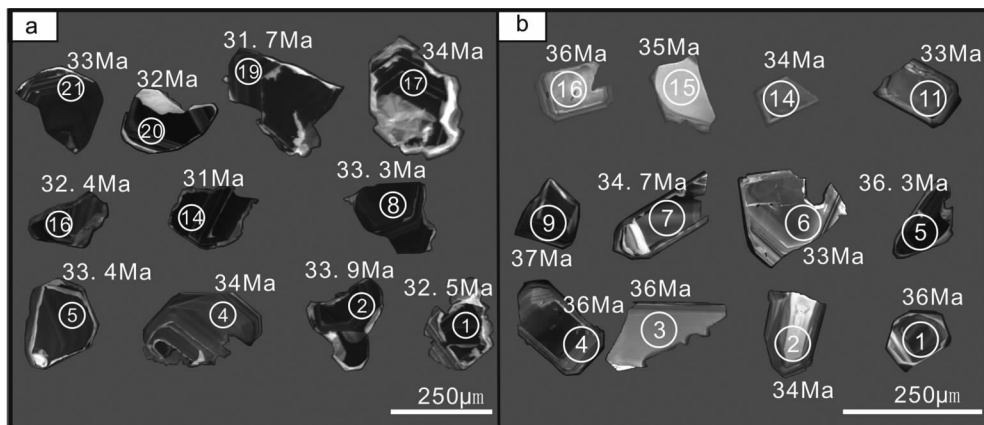


图6 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩锆石中的 CL 图像(a, 样品 V0860; b, 样品 VN0826)

Fig. 6 CL images of zircons from Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks (a, sample V0860; b, sample VN0826)

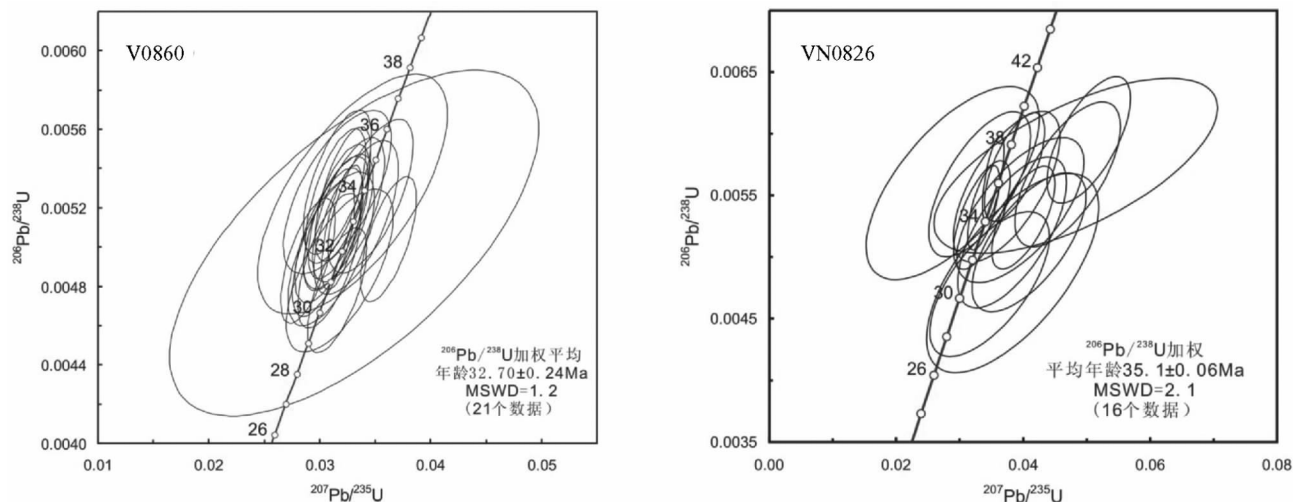


图7 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的 U-Pb 年龄

Fig. 7 The U-Pb ages of Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks

保和郑永飞, 2004), 应是同一岩浆结晶而成的。

V0860 样品 21 个分析点与 VN0826 样品的 16 个分析点位于 U-Pb 谐和线及其附近 (图 7)。V0860 样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布于 34.3 ~ 30.7 Ma 之间, 获得剩余 22 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $32.73 \pm 0.11\text{Ma}$ (2σ , MSWD = 1.4), 代表了碱性正长岩的结晶时代。VN0826 样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布于 37 ~ 31 Ma 之间, 16 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 35.1Ma (2σ , MSWD = 2.1)。

4.2 锆石 Hf 同位素结果

锆石 Hf 同位素的分析结果列于表 3。碱性正长岩与碱性花岗岩样品中锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对较低, 分别为 0.003742 ~ 0.05882 和 0.000161 ~ 0.002150 (表 3)。较低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值说明锆石在形成后基本没有明显的放射成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表

了其形成时体系的 Hf 同位素组成 (吴福元等, 2007)。碱性正长岩样品 V0860 锆石中的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.8 \sim 2.5$ (表 3), 单阶段模式年龄变化范围为 606 ~ 827 Ma, 两阶段模式年龄变化范围为 950 ~ 1286 Ma。高钾碱性花岗岩样品 VN0826 锆石中的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.9 \sim 0.1$ (表 3), 单阶段模式年龄变化范围为 710 ~ 908 Ma, 两阶段模式年龄变化范围为 1107 ~ 1421 Ma。

5 岩石成因与区域构造意义

5.1 Pu Sam Cap 高钾碱性岩形成时代

Pu Sam Cap 高钾碱性岩位于哀牢山剪切带之外的, 未遭受剪切变形 (Chung *et al.*, 1997; Searle, 2006)。研究表明含角闪石 Ye Yen Sun 花岗岩岩体与秀丽火山岩带中的岩石基本未变形, 岩体内局部有小规模的左型走滑断层切过, 仅

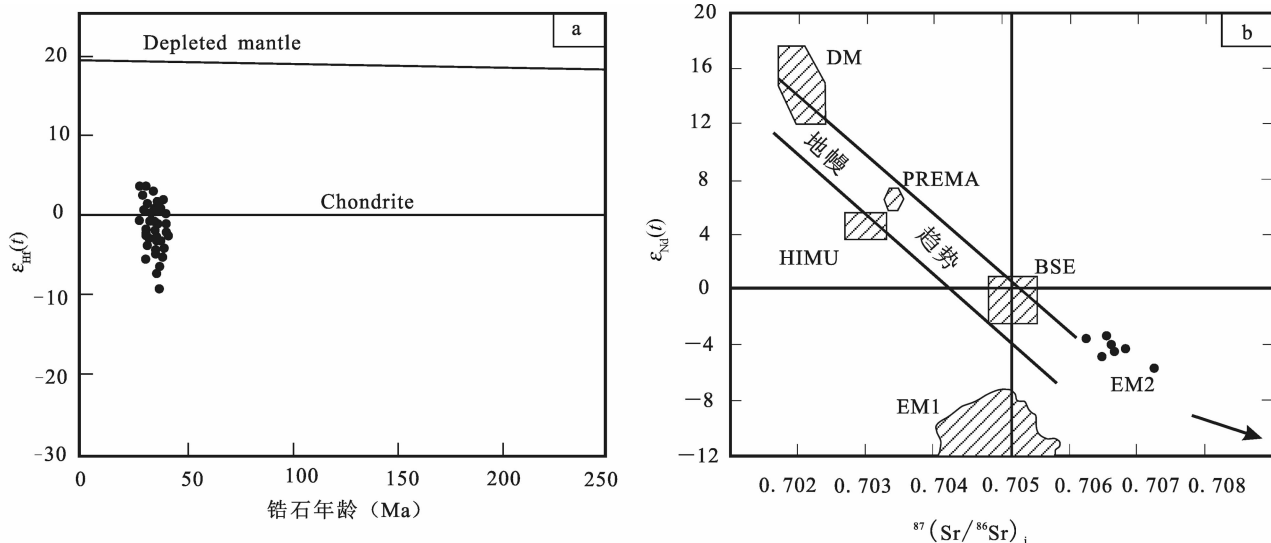


图8 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对 U-Pb 年龄相关图解(a, 据 Ji *et al.*, 2009) 及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 对 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 同位素相关图解(b, 据 Zindler and Hart, 1986)

DM-亏损地幔; BSE-全硅酸盐地球; EM1 和 EM2-富集地幔; HIMU-具高 U/Pb 比值的地幔; PREMA-原始地幔

Fig. 8 Plots of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb ages (a, after Ji *et al.*, 2009) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ isotope correlation diagram (b, after Zindler and Hart, 1986) of zircon from Pu Sam Cap high-potassic alkaline rocks

DM-Depleted mantle; BSE-Bulk standard earth; EM1 and EM2-I type and II type enriched mantle; HIMU-The high time-integrated U/Pb mantle; PREMA-Prevalent mantle

沿断层处岩石发生微弱的脆-韧性剪切 (Leloup *et al.*, 2001; Searle, 2006)。Pu Sam Cap 杂岩的几个小岩体侵位于该地质单元, 且同样没有或受到微弱的剪切作用。这些结果说明 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的 U-Pb 同位素体系仍然封闭, 两个样品的锆石年龄为 35.1 ~ 32.7Ma 代表 Pu Sam Cap 杂岩的高钾碱性岩侵入岩的结晶年龄。前人研究结果表明该杂岩的粗面岩、粗面安山岩 Ar-Ar 年龄为 36 ~ 34Ma (Tran *et al.*, 1999), 基本上与锆石 U-Pb 年龄同一致, 表明 Pu Sam Cap 杂岩的形成时代为 36 ~ 32Ma。

5.2 岩石成因

Pu Sam Cap 杂岩锆石 Hf 同位素表明模式年龄大于其形成年龄, 表明其岩浆源区受到过地壳物质的混染或来自于富集性地幔 (吴福元, 2007)。在 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图上 (图 8a) Pu Sam Cap 杂岩的分析点位于下地壳和亏损地幔演化线之间, 样品 Hf 同位素两阶段模式年龄为 950 ~ 1421Ma, 明显低于华南西部地壳的年龄 (Tran *et al.*, 2003)。因此, Pu Sam Cap 杂岩高钾碱性岩不可能来源于单一的地壳源区, 而可能来源于富集岩石圈地幔的部分熔融作用或者幔源岩浆和壳源岩浆的混合。Pu Sam Cap 高钾碱性岩的地球化学研究结果表明这些岩石的形成与俯冲运动有关。本文对 Sr, Nd 同位素成分进行年龄校正, 利用 35Ma 进行计算 (表 4)。结果表明 Pu Sam Cap 高钾碱性岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围 -4.7813 ~ -0.7639, 具低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值 (0.512336 ~ 0.512447) 和

高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.706254 ~ 0.707273) 与滇西地区 40 ~ 28Ma 的超钾或钾质碱性岩非常相似 (Wang *et al.*, 2001)。可见这套钾质岩石样品的 Sr, Nd 在常规的 Nd-Sr 同位素相关图上, 数据点均落在富集的第四象限, 演化趋势线偏离地幔排列, 但接近于 EM2 地幔端元趋势线 (图 8b)。结合锆石 Hf 同位素结果提出岩浆物质可能来源于幔源岩浆和壳源岩浆的混合。

5.3 区域构造意义

有关正长岩成因的观点很多, 一种观点认为正长岩的岩浆形成于高压下长英质地壳物质的部分熔融 (Huang and Wyllie, 1975), 一种观点则认为正长岩质岩浆来源于富集的岩石圈地幔的部分熔融, 是碱性玄武质岩浆结晶分异作用的产物 (Brown and Beeker, 1986; Yang *et al.*, 2008), 而另外一种观点认为正长岩是镁铁质岩浆和长英质岩浆混合之后结晶分异的产物, 或者为幔源硅不饱和的碱性岩浆和壳源花岗岩质岩浆混合形成 (Zhao *et al.*, 1995; Riishuus *et al.*, 2005)。碱性花岗岩的成因也存在很多争论, 不同学者根据不同地区的研究提出了不同的成因模式, 归纳起来大致有四种: (1) 侵入地壳拉张环境中的地幔玄武质岩浆通过高度结晶分异和/或液态不混溶作用直接衍生 (Turner *et al.*, 1992; Kerr and Fryer, 1993); (2) 壳幔相互作用 (Harris, 1995; Bowden *et al.*, 1987); (3) 残余模式 (Collins *et al.*, 1982); (4) 不发生亏损作用的英云闪长质成分的岩石在水不饱和条

表4 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性岩 Nd-Sr 同位素分析结果

Table 4 Nd-Sr isotopic data of Pu Sam Cap K-rich alkali magmatic rocks in the northwest of Vietnam

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2s ($\times 10^{-6}$)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2s ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	数据来源
G916	256.5	2138	0.706566	8	0.706566	8.1	46	0.51245	3	-3.26	Tran <i>et al.</i> , 2004
T1545	205	1456	0.706641	5	0.706641	8.6	46	0.512411	5	-4.05	Tran <i>et al.</i> , 2004
P188	259	1472	0.707273	6	0.707273	11.4	50	0.512336	4	-5.63	Tran <i>et al.</i> , 2004
P236	227	966	0.706254	7	0.706254	8.2	34	0.512447	4	-3.50	Tran <i>et al.</i> , 2004
P9496	232	1135	0.706676	4	0.706676	6.8	29.9	0.512402	2	-4.34	Tran <i>et al.</i> , 2004
V0860	282.7	1831	0.707252	4	0.706833	13.36	77.27	0.512401	2	-4.25	本文
VN0826	200.2	768.6	0.707233	3	0.706491	4.1	25.67	0.512370	6	-4.78	本文

件下部分熔融 (Creaser *et al.*, 1991)。正长岩与碱性花岗岩属于碱性岩的岩浆系列,代表了碰撞后、裂谷或者板内伸展构造背景 (Nedelec *et al.*, 1995; Yang *et al.*, 2008)。关于藏东地区新生代构造演化,研究表明该地区在 45 ~ 30Ma 由于印度板块与欧亚板块后碰撞过程引致藏北与藏东地区受到强烈的伸展构造,导致幔源碱性岩岩浆活动 (Chung *et al.*, 1998, 2005; Ji *et al.*, 2009)。Pu Sam Cap 杂岩的地球化学特征表明该杂岩的各种岩性可能由分离结晶形成,岩石地球化学特征与藏东地区碱性岩十分相似,表明 Pu Sam Cap 碱性杂岩形成与第一类型地壳拉张环境中的地幔玄武质岩浆有关。

对新生代高钾岩浆岩的研究表明,高钾岩浆岩主要起源于与俯冲作用有关的高钾和 LILE 交代地幔 (Foley *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1996), EM2 型富集地幔端元的成因与大陆地壳俯冲作用有关,但是由于高钾岩浆岩类岩石构造环境的多样性,同样是 EM2 型富集地幔端元,在成因上也有各自的特殊性 (Müller *et al.*, 1992)。高钾岩浆岩的微量元素出现 Nb、Ta 和 Ti 亏损主要由于岩浆源区受到了古俯冲带流体的交代,反映的是岛弧岩浆的特点 (Müller *et al.*, 1992)。因此 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值要求地幔源区富集 LREE 和 Rb、Nb、Ta、Ti 的负异常,表明可能有古大洋板片俯冲作用的存在。

区域上,在晚三叠世前由思茅-印支地块与扬子地块碰撞引起的墨江古特提斯洋盆的闭合 (张旗等, 1995)。天然地震层析成像资料 (Liu *et al.*, 2000) 也显示在扬子板块西缘和兰坪-思茅地块之下存在一个马鞍状高速异常体,且该马鞍状高速异常体的中心顶部位置正好位于金沙江古缝合带之下。他们将该马鞍状高速异常体向西倾伏的西段解释为向西俯冲的扬子板块,而该马鞍状高速异常体的东段没有给予解释。但有观点认为 50Ma 以来扬子地块一直没有发生向西的俯冲,早期闭合后洋盆的岩石层是早已下沉到地幔软流圈中 (赵文津, 2007); 天然地震层析成像资料显示的马鞍状高速异常体被认为是被掩埋于扬子板块和兰坪-思茅地块之下的金沙江古特提斯洋岩石圈残片 (Xu *et al.*, 2007)。大

约 45 ~ 30Ma 印度-欧亚陆陆碰撞过程,新特提斯大洋板片断离下去,藏东地区遭受了 N-S 伸展环境 (Chung *et al.*, 2005; 刘俊来等, 2006), 导致幔源流体隆升。上升的热岩浆可以在一路上升的过程中与被掩埋的古特提斯洋板片、上地壳和下地壳不同的物质发生混染混合,壳-幔过渡带岩浆房形成并沿断裂上升进入上部地壳,就位形成新生代岛弧型高钾碱性岩岩浆系列。岩体主要沿着思茅-印支与扬子板块交界处发育的哀牢山-红河断裂带就位。30Ma 以来印度板块与欧亚板块晚碰撞与后碰撞造山过程致使在藏东南地区产生大规模走滑断裂,形成哀牢山-红河左行走滑剪切带 (Tapponnier *et al.*, 1990; Chung *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1998, 2000), 该带左行走滑活动把原先集聚在一起的高钾碱性岩地区分离成相隔数百千米的大理与金平-封土两个高钾碱性岩集中区。

6 结论

(1) Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩的岩石属于钾质与超钾质岩浆系列,强烈富集 LREE, Eu 异常不明显, LILE 明显富集, HFSE 除个别元素 (Zr, Hf) 外, 相对亏损。Ta、Nb 和 Ti 呈明显的“TNT”负异常,与滇西大理-剑川地区的钾玄质岩石微量元素原始地幔归一化图非常相似,表明 Pu Sam Cap 高钾碱性岩的形成与俯冲带相关。

(2) 越南西北部 Pu Sam Cap 高钾碱性杂岩碱性正长岩与碱性花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $32.70 \pm 0.24\text{Ma}$ 和 $35.1 \pm 0.06\text{Ma}$, 该杂岩形成时代与青藏东缘高钾碱性岩一致。

(3) 锆石 Hf 同位素与 Sr-Nd 同位素结果提出岩浆物质可能来源于幔源岩浆和壳源岩浆的混合。Pu Sam Cap 高钾碱性岩的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值要求地幔源区富集 LREE 和 Rb、Nb、Ta 和 Ti 的负异常表明可能有古大洋板片俯冲作用的存在。Pu Sam Cap 高钾碱性岩形成于哀牢山-红河左行走滑活动之前,为墨江古特提斯洋盆的消减与印度-欧

亚陆陆碰撞活动为区域性提供了宏观构造背景。

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59–79
- Bowden P, Black R, Martin RF *et al.* 1987. Niger-Nigerian alkaline ring complexes: A classic example of African Phanerozoic anorogenic mid-plate magmatism. In: Fitton JG and Upton BGJ (eds.). *Alkaline Igneous Rocks*. Geol. Soc. London Spec. Publ., 30: 357–379
- Brown PE and Becker SM. 1986. Fractionation, hybridisation and magma-mixing in the Kialineq centre East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92 (1): 57–70
- Chung SL, Lee TY, Lo CH *et al.* 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geology*, 25: 311–314
- Chung SL, Lo CH, Lee TY *et al.* 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394: 769–773
- Chung SL, Chu MF, Zhang YQ *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68: 173–196
- Collins WJ, Beams SD, White AJR *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189–200
- Crease RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. *Geology*, 19: 163–166
- Dao DT and Huynh T. 1995. *Geology of Vietnam*. Vol. II. Magmatic Formations. Hanoi: Pub. House Sci. & Techn., 240–294 (in Vietnamese)
- Foley FF and Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28: 181–185
- Gatinsky YG and Dao DT. 1982. Geological structure and development of Song Da paleorift zone in Vietnam. *Bull. Miner. Soc. Nat. Explores*, 57(3): 12–25
- General Department of Mines and Geology of the Socialist Republic of Vietnam (GDMGV). 2003. *Geology and Mineral Resources of Lao Cai Area*, 179–181
- Harris NBW, Kelley S and Okay AI. 1994. Post-collision magmatism and tectonics in northwest Anatolia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(3): 241–252
- Huang WL and Wyllie PJ. 1975. Melting reaction 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
- Ji WQ, Wu FY, Chung SL *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262: 229–245
- Kerr A and Fryer BJ. 1993. Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador Canada. *Chemical Geology*, 104: 39–60
- Leloup PH and Kienast JR. 1993. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: The Ailao Shan-Red River, People's Republic of China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 118: 213–234.
- Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P *et al.* 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84
- Leloup PH, Arnaud N, Lacassin R *et al.* 2001. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone. *Journal of Geophysical Research*, 106: 6683–6732
- Lepvrier C, Maluski H, Vu VT *et al.* 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393: 87–118
- Liang HY, Campbell IH, Allen CM *et al.* 2007. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River Shear Zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing. *The Journal of Geology*, 115: 231–242
- Liu FT, Liu JH, Zhong DL *et al.* 2000. The subducted slab of the Yangtze continental block beneath the Tethyan orogen in western Yunnan. *Chinese Science Bulletin*, 45 (5): 466–469
- Liu JL, Song ZJ, Cao SY *et al.* 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 775–786 (in Chinese with English abstract)
- Miller C, Schuster R, Klötzli U *et al.* 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 (9): 1399–1424
- Müller D, Rock NMS and Groves DI. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic setting: A pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46: 259–289
- Nedelec A, Stephens WE and Fallick AE. 1995. The Panafrican straitoid granites of Madagascar: Alkaline magmatism in a post-collisional extensional setting. *Journal of Petrology*, 36: 1367–1391
- Nguyen TC. 2003. Petrology and metallogeny of alkaline formations of North Vietnam. *Research Institute of Geology and Mineral Resources*, 170–185 (in Vietnamese)
- Riisshuus MS, Peate DW, Tegner C *et al.* 2005. Petrogenesis of syenites at a rifted continental margin: Origin, contamination and interaction of alkaline mafic and felsic magmas in the Astrophyllite Bay Complex, East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3): 350–371
- Schärer U, Zhang LS and Tapponnier. 1994. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River Belt, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 126: 379–397
- Searle MP. 2006. Role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 163: 1025–1036
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for the mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. London Spec. Pub., 313–345
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH *et al.* 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437
- Tran TH, Hoang HT, Ngo TP *et al.* 1999. Potassic alkaline magmatic rocks in Northwest Viet Nam manifestation of Late Paleogene intraplate extension. *Journal of Geology (Vietnam)*, 250 (1–2): 7–14 (in Vietnamese with English abstract)
- Tran NN, Toriumi M, Sano Y *et al.* 2003. 2.9, 2.36, and 1.96Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Viet Nam: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 743–753
- Tran TH, Poliakov GV, Ngo TP *et al.* 2004. Intraplate magmatism in Vietnam and associated mineralization. *Institute of Geological Sciences, VAST, Ha Noi, Vietnam*, 204–328 (in Vietnamese)
- Turner SP, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on 'postorogenic' magmatism. *Geology*, 20: 931–934
- Turner S, Arnaud N, Liu J *et al.* 1996. Post-collision, 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
- Wang J, Li JP and Wang JH. 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 (in Chinese with English abstract)
- Wang JH, Yin A, Harrison TM *et al.* 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 188: 122–133
- Wang PL, Lo CH, Lee TY *et al.* 1998. Thermochronological evidence for the movement of the AilaoShan-Red River shear zone: A perspective

- from Vietnam. *Geology*, 26: 887 – 890
- Wang PL, Lo CH, Chung SL *et al.* 2000. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan-Red River shearzone; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraint from the Nam Dinh area, northeastern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 281 – 292
- Wright JB. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106 (4): 370 – 384
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105 – 126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554 – 1569
- Xu XW, Cai XP, Xiao QB and Peters SG. 2007. Porphyry Cu-Au and associated polymetallic Fe-Cu-Au deposits in the Beiya Area, western Yunnan Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 31: 224 – 246
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA *et al.* 2008. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214: 99 – 125.
- Yumul GP, Zhou MF, Wang CY *et al.* 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite (Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow-spreading oceanic basin origin. *Journal of Asian Earth Sciences* 32: 385 – 395.
- Zhang LS and Schärer U. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt. *China. Mineralogy and Petrology*, 134: 67 – 85
- Zhang Q, Zhou DJ, Li XY and Chen Y. 1995. Characteristics and genesis of Shuanggou Ophiolites, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11: 190 – 202 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JX, Shiraishi K, Ellis DJ and Sheraton JW. 1995. Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamato Mountains, East Antarctica; Implications for the origin of syenitic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1363 – 1382
- Zhao WJ. 2007. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits. *Geology in China*, 34 (2): 179 – 205 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 – 571

附中文参考文献

- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云等. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的运动学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为列. *岩石学报*, 22(4): 775 – 786
- 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
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185 – 220
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589 – 1604
- 张旗, 周德进, 李秀云, 陈雨, 黄忠祥, 韩松, 贾秀勤, 董金泉. 1995. 云南双沟蛇绿岩的特征和成因. *岩石学报*, 11: 190 – 202
- 赵文津. 2007. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景. *中国地质*, 34(2): 179 – 205