

大兴安岭南段黄岗梁火山-侵入隆起：不同岩相之间的成因联系

苏荣昆¹, 薛怀民¹, 曹光跃²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京离子探针中心, 北京 100037)

摘要: 大兴安岭南段黄岗梁火山-侵入隆起由火山灰流相的流纹质晶屑凝灰岩、侵入相的岩穹(流纹质碎斑熔岩)和浅成侵入相的斑状二长花岗岩构成, 它们的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果分别为 140.27 ± 0.93 Ma、 140.41 ± 0.92 Ma 和 141.75 ± 0.96 Ma, 均属早白垩世初期岩浆活动的产物。3个岩相的同位素年龄在误差范围内一致, 表明其间没有明显的间断, 为粘稠的富晶岩浆(晶粥)连续作用的产物。这些火山-侵入杂岩属高钾钙碱性系列, 主要为准铝质-过铝质岩石, 它们的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 变化范围很小, 为 $-0.43 \sim -0.08$, 相应的二阶段模式年龄为 $0.98 \sim 0.96$ Ga, 表明其应起源于相同的源区。岩浆作用产物表现出从早到晚 SiO_2 和 K_2O 含量呈连续降低的趋势, 不同岩相间成分上有一定的互补关系, 暗示可能是由成分分带的岩浆房近于逐层排出/侵位形成流纹质晶屑凝灰岩和碎斑熔岩, 残留岩浆充填到火山根部及火山机构周边的环状裂隙中冷却固结形成斑状二长花岗岩。该火山-侵入杂岩具有 A 型花岗岩特征, 地球化学上均表现为富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素, 强烈亏损 Ti、Nb、Ta 等高场强元素, 具有明显负 Eu 异常, 稀土元素配分图呈右倾的 V 字型, 其可能是早白垩世软流圈上涌或者幔源镁铁质岩浆的底侵作用, 诱发上覆地壳发生部分熔融形成的。

关键词: 黄岗梁火山-侵入隆起; 碎斑熔岩; A 型花岗岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 测年; 晶粥

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0727-19

Huanggangliang volcanic-extrusive uplift in the southern Da Hinggan Mountains: Discussion on genetic relation between different lithofacies

SU Rong-kun¹, XUE Huai-min¹ and CAO Guang-yue²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 2. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract: Huanggangliang volcanic-extrusive uplift in the southern Da Hinggan Mountains is composed of the rhyolitic crystalline tuff of the ash flow facies, the dome of the extrusive facies (rhyolite porphyroclastic lava), porphyritic monzogranite of the superficial intrusive facies. Their SHRIMP zircon U-Pb ages are 140.27 ± 0.93 Ma, 140.41 ± 0.92 Ma and 141.75 ± 0.96 Ma respectively, which were produced by magmatic activities in Early Cretaceous. The isotopic ages of the three lithofacies are consistent within the error range, indicating that there is no obvious discontinuity between the three lithofacies, and they are the products of continuous action of thick rich crystal magma (crystal mush). These volcanic-intrusive complexes belong to the high-K calc-alkaline series, and are mainly peraluminous and quasi-aluminous rocks, their $\varepsilon\text{Nd}(t)$ change little which range from -0.43 to -0.08 , and the corresponding two-stage Nd model ages range from 0.98 to 0.96 Ga, suggesting that originated from the same

收稿日期: 2021-11-02; 接受日期: 2022-05-05; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190001, DD20190370)

作者简介: 苏荣昆(1997-), 男, 在读硕士生, 岩浆岩岩石学专业, E-mail: 2323830353@qq.com; 通讯作者: 薛怀民(1962-), 男, 博士, 研究员, 从事岩石学与地球化学研究, E-mail: huaiminx@sina.com。

网络首发时间: 2022-05-19; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20220518.1413.002.html>

source region. The contents of SiO_2 and K_2O in magmatic products decreased continuously from early to late, and there is a certain complementary relationship between the compositions of different lithofacies, suggesting that rhyolitic crystalline tuff and rhyolite porphyroclastic lava may be discharged/emplaced layer by layer by magma chamber of composition zonation, and the residual magma is filled into the ring fissure of volcanic root and surrounding to form porphyritic monzogranite. The volcano-intrusive complex have the characteristics of A-type granite, which are characterized by LILE (Rb, Th, U, etc.) enrichment and HFSE (Ti, Nb, Ta, etc.) strong depletion, and enriched LREE patterns with strong negative Eu anomaly, and its genesis may be related to partial melting of the overlying crust induced by the upwelling of asthenosphere mantle or mafic magma underplating in the Early Cretaceous.

Key words: Huanggangliang volcanic-extrusive uplift; porphyroclastic lava; A-type granite; SHRIMP zircon U-Pb dating; crystal mush

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20190001, DD20190370)

研究中酸性火山岩-侵入岩之间的联系,对于理解硅质大陆地壳的成因等重大地质问题有着重要意义。自18世纪 James Hutton 提出火成岩的定义后,学者们基于野外观察,对中酸性火山岩与侵入岩之间的联系做了大量研究(王硕等,2020)。目前对于两者之间的成因联系还存在较大的争议,主要有两种观点:①认为火山岩由“晶粥”中的熔体抽离后喷发而成(Hildreth, 2004; Bachmann and Bergantz, 2004),但富含晶体的火山岩并非简单的晶粥模型可以解释,可能与岩浆系统的再活化有关(Watts *et al.*, 2016);②认为火山岩是由独立于同期侵入岩的岩浆喷发而成(Glazner *et al.*, 2015)。上述两种观点的争论点主要在于火山岩和侵入岩是否来自相同的岩浆房,形成时间和空间展布是否一致。大兴安岭南段的黄岗梁火山-侵出隆起由火山喷发的流纹质晶屑凝灰岩、侵出岩穹(流纹质碎斑熔岩)及侵入的斑状二长花岗岩构成,它们之间在空间分布、矿物组成、地球化学特征等方面具密切联系,形成时代也连续,为研究中酸性火山岩与侵入岩之间关系提供了一个难得的实例。本文在对该火山机构不同岩相较系统的岩相学、年代学、地球化学和 Sr-Nd 同位素研究的基础上,重塑了该机构岩浆活动的历史,阐明了火山岩与侵入岩之间的成因联系。

1 地质背景

黄岗梁火山-侵出隆起位于大兴安岭南段,南邻西拉木伦河-长春断裂,叠置在松辽地块之上(图1a)。研究区出露的地层包括二叠系大石寨组、哲斯组、林西组,侏罗系新民组,白垩系满克头鄂博组、

玛尼吐组、白音高老组和第四系乌尔吉组。其中二叠系大石寨组主要为玄武岩、安山岩及凝灰质砂岩;二叠系哲斯组主要为角岩、白色糖粒状大理岩和矽卡岩化灰岩;二叠系林西组主要为变质粉砂岩、粉砂岩;侏罗系新民组主要为粉砂岩、砂岩、砾岩、中酸性凝灰岩和安山质熔结角砾岩;白垩系主要为火山岩与沉积岩;第四系乌尔吉组主要为亚砂土,柱状节理发育(Ying *et al.*, 2010)。

区内出露大面积中生代火山岩,前人(内蒙古地质矿产局,1991; Ying *et al.*, 2010)将其划分为满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组,其中满克头鄂博组主要为流纹岩、流纹质角砾凝灰岩及流纹质熔结凝灰岩等,与新民组沉积岩呈不整合接触;玛尼吐组主要为安山岩、火山碎屑岩;白音高老组主要为流纹岩、流纹质熔结凝灰岩、含角砾熔结凝灰岩和沉积岩夹层。此外,区内也发育大量侵入岩体,主要有早白垩世斑状二长花岗岩、石英二长斑岩、闪长玢岩和早白垩世中细粒黑云母花岗岩等。

2 岩相学及样品特征

黄岗梁火山-侵出隆起位于克什克腾旗北侧,呈北东东向展布的串珠状,是黄岗梁地区晚中生代火山活动末期的产物,叠置在早期形成的一系列火山机构之上,其产物在黄岗梁火山-构造隆起出露广泛,占据了整个构造隆起出露面积的一半以上(约700 km²),是导致黄岗梁火山-构造隆起形成的决定性因素(图1b)。

黄岗梁火山-侵出隆起的岩浆活动可以划分为3个期次:第1期的产物为火山灰流相的灰白色、灰色的流纹质晶屑凝灰岩,分布于火山-侵出隆起的

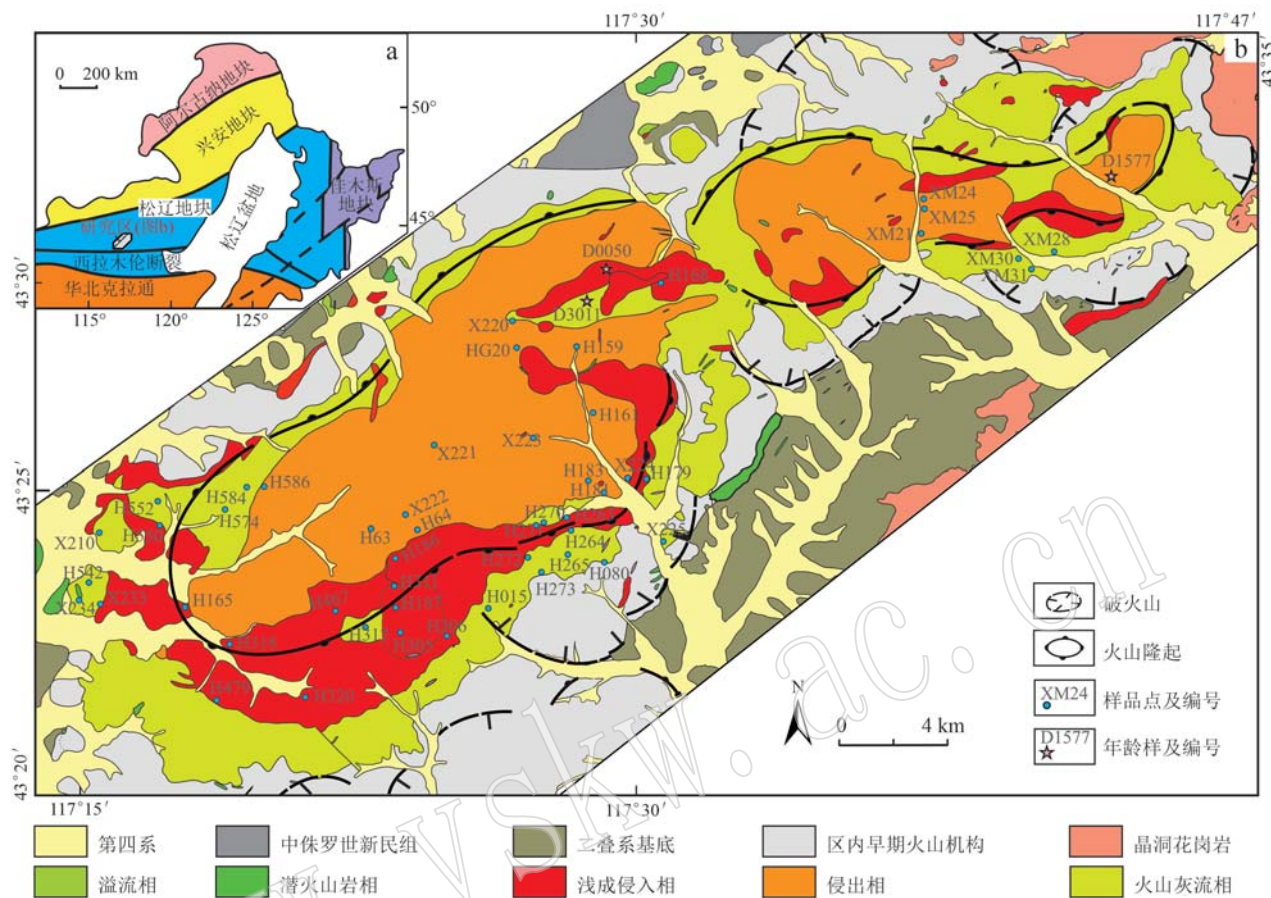


图1 中国东北地区大地构造位置简图(a)和黄冈梁火山-侵出隆起火山岩相图(b)

Fig. 1 Simplified geological map of tectonic location of NE China (a) and volcanic lithofacies map of the Huanggangliang volcanic-extrusive uplift (b)

最外侧, 局部有塑性变形不明显的岩浆团块(图2a), 推测其为富含挥发分的岩浆沸腾外溢或火山灰云喷发所形成的, 火山喷发方式为中心式喷发。第2期产物为侵出相的碎斑熔岩体, 侵出覆盖在第1期产物流纹质晶屑凝灰岩之上, 它们构成黄冈梁火山-侵出隆起的主体, 推测其为流纹质岩浆侵出所形成的。核部的碎斑熔岩与边部的晶屑凝灰岩之间呈渐变过渡关系, 其界线野外很难区分, 整体表现为越向外侧晶屑粒径越小、晶屑含量略有减少、角砾(岩屑)含量增多、熔结现象越来越明显, 该现象类似于部分学者所描述的熔离成因的熔结凝灰岩或碎斑熔岩所表现的特征(谢家莹等, 1993)。第3期是斑状二长花岗岩的侵入, 其总体围绕碎斑熔岩体的外侧侵位, 从形态和产出部分可以推测是沿该火山机构晚期发育的环状断裂侵位的(图1b)。从火山机构中心到边缘的岩相依次为侵出相、浅成侵入相和火山灰流相, 侵出相覆盖在灰流相之上, 浅成

侵入相围绕侵出相展布, 这一接触关系为该火山岩和侵入岩的成因联系提供了空间上的依据。

本次分析的样品采自该火山机构岩浆活动第1期的产物流纹质晶屑凝灰岩、第2期的产物碎斑熔岩和第3期的产物斑状二长花岗岩。详细的采样位置见图1b、表1和表2。

流纹质晶屑凝灰岩, 岩石新鲜面为灰色, 风化面为浅灰色-灰色, 主要成分为晶屑和凝灰物, 晶屑主要为石英晶屑(15%~20%)和长石晶屑(15%~20%), 石英晶屑粒径约2 mm, 长石粒径为2~3 mm; 凝灰物约占60%~70%, 粒径小于2 mm(图2b)。局部可见熔结条带(图2c)。

碎斑熔岩主要为灰白色、灰黄色, 块状构造, 碎斑结构, 碎斑晶主要为钾长石(20%~35%)、斜长石(10%~20%)和石英(10%~25%), 碎斑晶总体呈“碎而不散、散而不乱、乱而不远”的特征, 且发育珠边结构。基质主要为粒状结构(图2d、2e、2f、2g)。

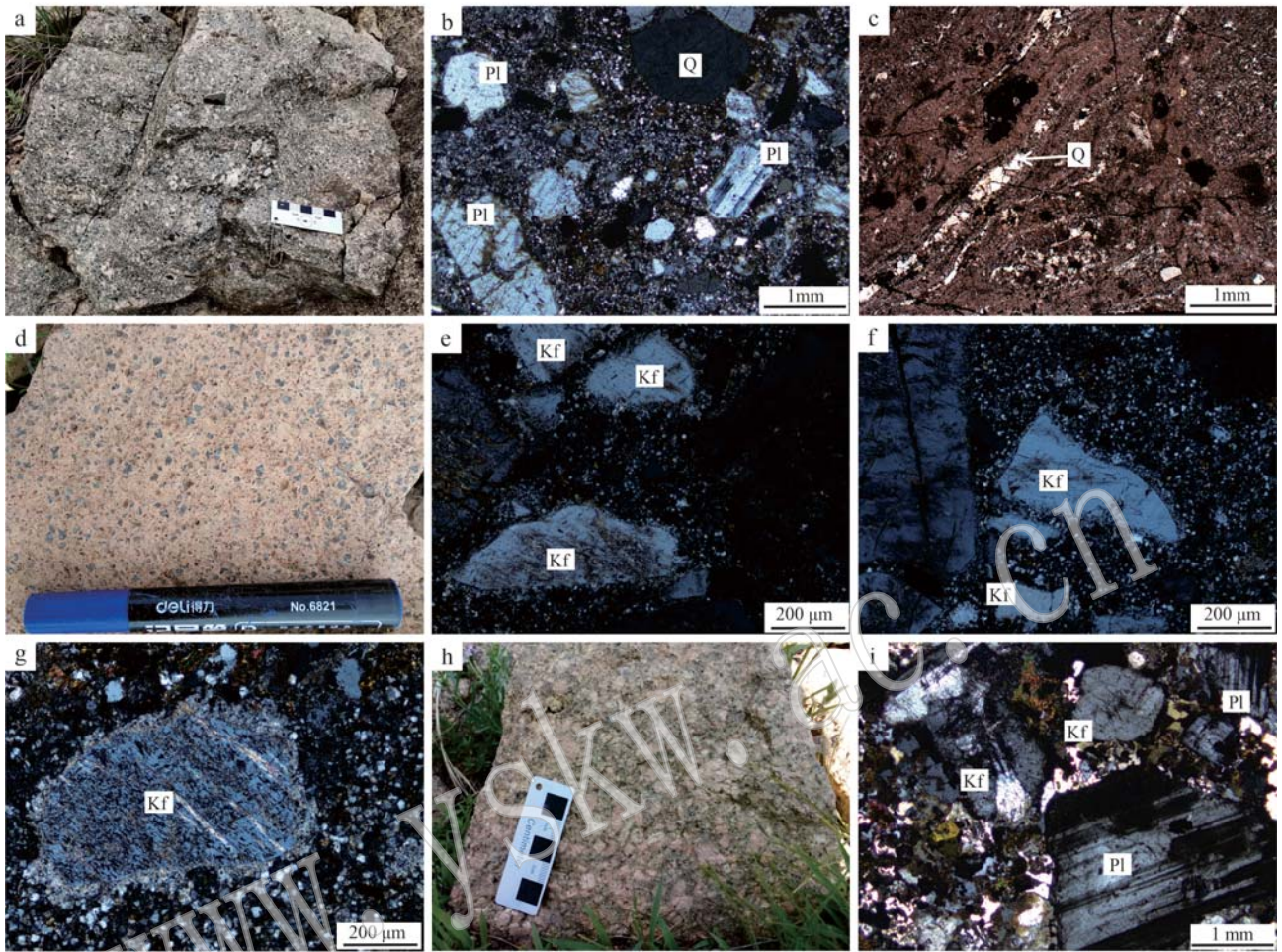


图2 黄岗梁火山-侵出隆起岩浆岩野外和显微照片

Fig. 2 Field and micrographs of the magmatic rocks in the Huanggangliang volcanic-extrusive uplift
a—未变形的岩浆团块; b—流纹质晶屑凝灰岩; c—熔结条带; d、e、f、g—碎斑熔岩; h、i—斑状二长花岗岩(c单偏光,
f、g、i为正交偏光)

a—undeformed masses of magma; b—rhyolitic crystalline tuff; c—weld belt; d, e, f, g—porphyroclastic lava; h, i—porphyritic monzogranite
(c is plain-polarized light; f, g, i are crossed polars)

Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石

Q—quartz; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar

斑状二长花岗岩为浅肉红色,似斑状结构,块状构造。斑晶主要为钾长石(10%~15%)、斜长石(10%~15%)和石英(~10%),钾长石为自形-半自形板状,粒径为2~5 mm,斜长石为自形-半自形板状,粒径3~5 mm,石英为他形粒状,粒径为3~5 mm。基质含量为60%~70%,成分主要为石英(15%~20%)、钾长石(~20%)、斜长石(~20%)及少量黑云母(5%~10%),半自形-他形粒状,粒径为0.2~0.5 mm(图2h、2i)。

3 分析方法

锆石的制靶、阴极发光和 SHRIMP U-Pb 同位素测试全部在北京离子探针中心完成,单个锆石分析二次离子流束斑直径大小为 25 μm,具体测试方法及流程参考宋彪等(2002)。对锆石测年结果采用 Isoplot 3 程序处理。单个测试数据误差和²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄加权平均值误差为 1σ。

样品主、微量元素分析在国家地质实验测试中心完成, 主量元素分析采用的仪器为 X 射线荧光光谱仪 (PW4400), H_2O^+ 的检测方法依据为 GB/T14506.2-2010, FeO 的检测依据为 GB/T14506.14-2010, 其余主量元素的检测依据为 GB/T14506.28-2010。利用湿化学法可得到 FeO 的含量, 而 Fe_2O_3 的含量为 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 FeO 的差值。微量元素及稀土元素分析采用的仪器为等离子质谱仪 (PE300Q), 检测依据为 GB/T 14506.30-2010。

全岩 Sr-Nd 同位素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司 (MC-ICP-MS (Neptune Plus)) 上完成, 相关的测试步骤及仪器参数详见 Li 等 (2012)。实验采取的标样包括 NBS987、AlfaSr、GSB、AlfaNd、BCR-2、RGM-2, 其测试值与标准推荐值在误差范围内基本一致。本实验选择的岩石标样流纹岩 RGM-2 具有较高的 Rb 含量 (149×10^{-6}) 和适中的 Sr 含量 (108×10^{-6}), 可以有效监控 Rb 的分离过程和测试结果。实验得到的 $^{145}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 数据可以很好地指示质量分馏校正和 ^{144}Sm 校正。 $^{145}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 推荐值为 $0.348\,416 \pm 0.000\,008$ (2σ ; $n=26$; Li *et al.*, 2012)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本次实验分别在 3 个靶样中选取形态完整、以长柱状为主的锆石进行测年, 结果见表 1。这些锆石 Th/U 值在 0.27~0.56 之间, 其 CL 高清图像呈现环带发育的特征 (图 3a~3c), 属于岩浆锆石。

在流纹质晶屑凝灰岩 (D3011) 中共测试了 15 个锆石, 其中, 测试点 2 和点 12 不谐和, 剩余 13 个测试点都位于 U-Pb 谐和线及其附近 (图 3d), 最终得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 140.27 ± 0.93 Ma (MSWD=0.40), 代表流纹质晶屑凝灰岩的形成年龄。

在碎斑熔岩 (D1577) 中共测试了 15 个锆石, 其中, 测试点 10 和点 12 不谐和, 剩余 13 个测试点都位于 U-Pb 谐和线及其附近 (图 3e), 最终得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 140.41 ± 0.92 Ma (MSWD=0.94), 这一年龄值代表了碎斑熔岩的形成年龄。

在斑状二长花岗岩 (D0050) 中共测试了 16 个锆石, 其中, 测试点 5 和点 14 不谐和, 剩余 14 个测试点都位于 U-Pb 谐和线及其附近 (图 3f), 最终得到

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 141.75 ± 0.96 Ma (MSWD=1.2), 代表斑状二长花岗岩的形成年龄。

综上, 黄岗梁火山-侵出隆起中火山岩与侵入岩的锆石结晶年龄在误差范围内一致 ($141.75 \sim 140.27$ Ma), 说明该火山机构大规模的酸性岩浆是在短时间内定位的, 这为其火山岩和侵入岩的成因联系提供了年代学制约。

4.2 岩石地球化学

4.2.1 主量元素

从表 2 可见, 黄岗梁火山-侵出隆起第 1 期到第 3 期产物样品的 SiO_2 含量介于 66.13%~75.57% 之间, K_2O 含量为 3.82%~5.21%, 全碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) 含量为 8.12%~9.00%, 表现出富碱和富钾的特征。在 TAS 图解上, 样品点位于流纹岩-粗面岩区域, 属于亚碱性岩类 (图 4a)。在 A/NK-A/CNK 图解上, 样品点属于准铝质-过铝质岩 (图 4b)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上, 样品都属于高钾钙碱性系列 (图 4c)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解上, 样品都属于钾质岩 (图 4d)。从第 1 期产物到第 3 期产物, 其 SiO_2 和 K_2O 的含量呈连续降低的趋势 (图 4), 显示岩浆活动是由成分分带的酸性岩浆房逐层排出定位的。

4.2.2 稀土元素

从表 2 可见, 黄岗梁火山-侵出隆起第 1 期到第 3 期产物样品均表现出富集轻稀土元素 (LREE) 以及重稀土元素分布 (HREE) 相对平坦的特征, ΣREE 为 $137.7 \times 10^{-6} \sim 363.9 \times 10^{-6}$, 在稀土元素球粒陨石标准化图 (图 5a) 中, 表现为右倾的 V 字形, 强烈的负 Eu 异常, 其中 δEu 介于 0.14~0.47 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 3.10~9.98。从第 1 期到第 3 期产物, δEu 的平均值连续增加, 分别为 0.22、0.21 和 0.39, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的平均值连续升高, 分别为 5.96、6.46、7.46。

4.2.3 微量元素

在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5b) 上, 黄岗梁火山-侵出隆起第 1 期到第 3 期产物样品均表现出富集大离子亲石元素 Rb、Th 和 U, 强烈亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Ti、Nb、Ta 的特征, 并且异常程度从第 1 期到第 3 期逐渐降低。过渡元素 Cr ($< 10.00 \times 10^{-6}$)、Co ($0.63 \times 10^{-6} \sim 11.70 \times 10^{-6}$)、Ni ($0.56 \times 10^{-6} \sim 8.92 \times 10^{-6}$) 的含量均很低, 且从 1 期到第 3 期逐渐升高 (表 2)。

黄岗梁火山-侵出隆起不同岩相之间主量元素的连续变化, 稀土元素球粒陨石标准化曲线和微量

表 1 黄冈梁山-侵入杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学分析测试结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Pb data of the Huanggangliang volcano-intrusive complex

样品 $w(^{206}\text{Pb}_c)/\%$	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				不谐和度/%					
	U	Th		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	误差/%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	误差/%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$						
D3011 晶屑凝灰岩 E117°29.2', N43°29.8'																	
1	0.49	123	50	2.3	0.40	0.047 6	8.9	0.143 0	9.0	0.021 8	139.0	± 2.3	81	± 210	132.0	± 10.0	-72
2	1.42	306	100	6.1	0.33	0.048 1	8.9	0.151 0	9.0	0.022 7	144.9	± 1.9	105	± 210	153.0	± 17.0	-38
3	0.12	717	237	13.6	0.33	0.049 0	2.1	0.149 3	2.4	0.022 1	140.8	± 1.5	148	± 49	141.0	± 3.2	5
4	0.00	392	112	7.4	0.29	0.049 2	2.6	0.148 2	2.8	0.021 8	139.2	± 1.6	158	± 60	145.0	± 4.1	12
5	0.00	402	157	7.5	0.39	0.049 1	2.6	0.147 3	2.8	0.021 8	138.9	± 1.6	151	± 60	138.8	± 3.5	8
6	0.16	286	151	5.5	0.53	0.046 5	3.7	0.142 1	3.9	0.022 2	141.2	± 1.7	25	± 88	135.6	± 4.0	-464
7	0.42	449	218	8.6	0.49	0.047 3	3.5	0.145 1	3.7	0.022 2	141.8	± 1.6	66	± 84	133.9	± 4.4	-116
8	0.00	573	257	10.9	0.45	0.048 3	2.2	0.147 2	2.5	0.022 1	140.9	± 1.8	114	± 52	141.3	± 3.7	-24
9	0.17	303	96	5.7	0.32	0.048 9	5.5	0.148 5	5.6	0.022 0	140.4	± 1.7	143	± 130	147.6	± 5.8	2
10	0.70	188	68	3.5	0.36	0.048 4	4.9	0.145 1	5.0	0.021 7	138.6	± 1.9	120	± 110	124.5	± 6.1	-15
11	0.00	372	143	7.0	0.38	0.048 7	2.8	0.146 5	3.0	0.021 8	139.2	± 1.6	132	± 65	141.4	± 5.1	-5
12	0.18	579	154	11.3	0.27	0.048 8	2.9	0.152 4	3.1	0.022 7	144.4	± 1.6	138	± 69	144.7	± 4.8	-5
13	0.00	437	162	8.3	0.37	0.049 7	3.0	0.151 1	3.2	0.022 1	140.6	± 1.6	181	± 69	140.7	± 3.9	22
14	0.00	469	179	8.9	0.38	0.050 3	2.7	0.153 6	2.9	0.022 2	141.3	± 1.6	207	± 61	141.4	± 3.8	32
15	0.00	255	123	4.8	0.48	0.049 2	3.7	0.149 8	3.9	0.022 1	140.9	± 1.8	156	± 86	138.1	± 5.8	10
D1577 碎斑熔岩 E117°42.3', N43°32.2'																	
1	0.10	752	319	14.3	0.42	0.048 9	2.1	0.148 6	2.4	0.022 1	140.6	± 1.5	141	± 50	139.7	± 2.9	0
2	0.00	234	118	4.5	0.50	0.048 2	3.6	0.149 5	3.8	0.022 5	143.3	± 2.0	110	± 85	139.2	± 4.4	-30
3	0.00	541	173	10.2	0.32	0.048 2	2.4	0.146 5	2.7	0.022 0	140.5	± 1.9	110	± 56	141.9	± 4.4	-28
4	0.11	642	204	12.2	0.32	0.049 5	2.3	0.150 9	2.5	0.022 0	140.9	± 1.5	173	± 53	138.8	± 3.5	19
5	0.17	402	140	7.6	0.35	0.049 2	3.4	0.149 4	3.6	0.022 0	140.3	± 1.6	159	± 79	138.1	± 5.1	12
6	0.08	731	277	14.1	0.38	0.047 9	2.2	0.148 4	2.5	0.022 5	143.2	± 1.5	96	± 53	145.2	± 3.3	-50
7	0.00	431	155	8.2	0.36	0.047 1	2.6	0.144 0	2.8	0.022 2	141.3	± 1.6	55	± 62	143.3	± 3.7	-155
8	0.29	280	139	5.2	0.50	0.047 9	3.8	0.143 4	4.0	0.021 7	138.5	± 1.8	93	± 91	135.1	± 4.4	-49
9	0.42	530	160	10.1	0.30	0.047 2	2.9	0.143 6	3.1	0.022 1	140.6	± 1.5	60	± 68	134.7	± 4.1	-135
10	0.15	284	129	5.2	0.45	0.049 3	3.4	0.144 5	3.6	0.021 3	135.6	± 1.6	163	± 80	120.4	± 3.9	17
11	0.36	484	190	9.2	0.39	0.049 1	2.6	0.148 5	2.9	0.022 0	140.0	± 1.5	151	± 62	135.4	± 3.5	7
12	0.00	482	200	8.9	0.42	0.048 1	2.4	0.141 9	3.3	0.021 4	136.5	± 3.0	104	± 57	135.0	± 4.1	-31
13	0.24	325	114	6.1	0.35	0.047 4	4.0	0.142 2	4.2	0.021 7	138.6	± 1.6	71	± 96	140.8	± 5.7	-94
14	0.00	214	85	4.0	0.40	0.048 0	3.6	0.143 9	3.9	0.021 8	138.7	± 1.9	99	± 86	147.2	± 4.9	-40
15	0.00	131	48	2.4	0.37	0.051 3	4.4	0.152 5	4.7	0.021 6	137.6	± 2.0	254	± 100	134.9	± 6.5	46
D0050 斑状二长花岗岩 E117°29.4', N43°30.4'																	
1	0.35	279	153	5.5	0.55	0.049 1	5.0	0.153 4	5.2	0.022 7	144.6	± 1.9	151	± 120	137.5	± 6.1	4
2	0.13	481	192	9.1	0.40	0.048 0	2.9	0.145 5	3.2	0.022 0	140.2	± 1.6	98	± 70	133.8	± 3.9	-43
3	0.59	392	157	7.6	0.40	0.048 5	5.3	0.149 7	5.5	0.022 4	142.7	± 1.8	124	± 130	142.3	± 7.4	-15
4	0.19	561	161	10.8	0.29	0.048 0	2.5	0.148 2	2.7	0.022 4	142.7	± 1.6	101	± 58	147.8	± 4.0	-41
5	0.17	286	130	5.7	0.45	0.050 0	3.7	0.159 3	3.9	0.023 1	147.2	± 1.8	197	± 86	143.0	± 10.0	25
6	0.00	237	127	4.5	0.54	0.048 5	3.6	0.148 4	3.8	0.022 2	141.6	± 1.8	122	± 85	139.4	± 4.2	-16
7	0.89	173	85	3.4	0.49	0.047 6	9.0	0.147 0	9.1	0.022 4	142.6	± 2.2	80	± 210	140.0	± 9.6	-78
8	0.21	322	167	6.2	0.52	0.049 9	4.0	0.152 9	4.2	0.022 2	141.7	± 1.7	192	± 92	138.3	± 4.6	26
9	0.12	394	222	7.8	0.56	0.048 5	3.1	0.153 0	3.3	0.022 9	145.8	± 1.8	124	± 73	149.1	± 3.8	-18
10	0.00	118	42	2.3	0.35	0.046 8	5.2	0.143 4	5.4	0.022 2	141.8	± 2.2	37	± 120	149.2	± 7.1	-287
11	0.32	478	163	9.0	0.34	0.048 5	2.8	0.146 0	3.0	0.021 8	139.2	± 1.6	124	± 66	134.6	± 4.0	-12
12	0.14	359	138	6.8	0.38	0.049 1	3.2	0.147 8	3.5	0.021 8	139.3	± 1.6	151	± 76	139.3	± 4.4	8
13	0.16	640	207	12.2	0.32	0.047 5	2.6	0.145 3	2.8	0.022 2	141.4	± 1.4	76	± 61	134.9	± 3.8	-87
14	1.52	647	219	11.8	0.34	0.046 7	7.5	0.135 0	7.6	0.021 0	133.6	± 1.6	33	± 180	145.0	± 12.0	-301
15	0.57	88	38	1.7	0.42	0.046 4	9.3	0.138 0	9.7	0.021 6	137.5	± 3.6	20	± 220	123.0	± 11.0	-602
16	0.52	227	123	4.4	0.54	0.050 8	9.6	0.157 0	9.7	0.022 4	142.7	± 1.9	233	± 220	151.0	± 12.0	39

注: Pb_c 表示普通铅, Pb^* 表示放射性 Pb 同位素组成, 普通铅用 ^{204}Pb 校正。

表 2 黄冈梁火山-侵入杂岩主量 ($w_B/\%$) 和微量元素、稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成
Table 2 Major ($w_B/\%$), trace elements and REE compositions ($w_B/10^{-6}$) of the Huanggangliang volcano-intrusive complex

样号	X225	X210	X233	X234	X28	X30	X31	H015	H080	H264	H265	H270	H271a	H272	H273	H312	H542	H550	H574	H584	X21	X24	X25	X220	
期次	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	
北纬	43°24.9'	43°25.1'	43°23.6'	43°23.6'	43°30.7'	43°30.7'	43°30.5'	43°23.7'	43°24.7'	43°25.3'	43°24.9'	43°25.3'	43°25.3'	43°24.7'	43°24.5'	43°23.2'	43°24.0'	43°25.3'	43°25.9'	43°25.7'	43°26.1'	43°30.8'	43°31.7'	43°31.5'	43°29.3'
东经	117°30.7'	117°15.6'	117°15.6'	117°15.6'	117°41.3'	117°39.9'	117°40.3'	117°40.9'	117°17.4'	117°28.5'	117°28.4'	117°27.6'	117°27.5'	117°27.1'	117°27.7'	117°22.7'	117°15.3'	117°17.3'	117°17.2'	117°19.2'	117°19.9'	117°37.7'	117°37.6'	117°37.6'	117°26.6'
岩性	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩
SiO ₂	73.85	73.94	73.56	73.43	74.92	74.19	75.53	73.82	73.92	74.93	74.66	73.51	72.82	74.41	74.03	73.24	73.14	73.59	75.50	74.08	73.26	74.43	75.23	75.57	71.84
Al ₂ O ₃	13.05	13.15	13.26	13.30	12.02	12.49	11.80	12.88	13.27	13.08	13.18	13.40	13.51	13.32	13.03	13.58	13.64	13.09	12.47	13.32	13.37	11.90	12.01	11.91	13.72
CaO	0.75	0.55	0.90	0.92	0.40	0.34	0.51	0.93	0.79	0.61	0.56	1.04	1.00	0.41	0.79	0.67	0.84	0.67	0.37	0.57	0.73	0.77	0.51	0.39	1.08
Fe ₂ O ₃	0.29	1.11	1.62	1.31	0.8	0.715	0.035	0.85	1.03	1.00	1.23	1.43	1.18	1.45	0.49	1.79	1.57	1.35	0.89	1.25	1.37	1.07	0.78	1.05	2.95
FeO	1.89	1.05	0.69	1.05	0.60	0.65	0.95	1.13	1.12	0.84	0.88	0.74	1.17	0.66	1.45	0.84	0.47	0.68	0.61	0.72	0.86	1.10	0.95	0.65	1.53
K ₂ O	5.21	5.16	4.95	4.93	4.93	5.08	5.12	4.73	4.81	4.85	4.88	4.98	4.88	5.14	4.87	4.99	5.14	5.00	5.12	5.12	5.04	4.51	5.15	5.05	4.91
MgO	0.23	0.25	0.23	0.25	0.14	0.16	0.13	0.25	0.28	0.19	0.23	0.26	0.27	0.18	0.22	0.27	0.27	0.20	0.17	0.23	0.25	0.13	0.08	0.08	0.35
MnO	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.05
Na ₂ O	3.48	3.44	3.72	3.62	3.64	3.42	3.32	3.79	3.74	3.65	3.44	3.84	3.75	3.73	3.48	4.01	3.64	3.84	3.23	3.72	3.78	3.94	3.40	3.60	3.76
P ₂ O ₅	0.05	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.04	0.03	0.05	0.07	0.06	0.03	0.03	0.08
TiO ₂	0.21	0.22	0.26	0.25	0.18	0.20	0.18	0.21	0.23	0.20	0.24	0.24	0.28	0.22	0.21	0.28	0.28	0.21	0.15	0.23	0.29	0.20	0.15	0.15	0.33
LOI	0.93	1.02	0.69	0.83	1.34	1.65	0.99	0.30	0.70	0.74	0.86	0.43	0.54	0.86	0.44	0.67	0.68	0.68	0.95	0.90	0.46	1.42	1.29	1.13	0.91
总和	99.98	99.99	99.97	99.99	99.03	98.98	98.65	99.00	100.00	100.20	100.30	99.80	99.40	99.60	99.50	100.20	99.80	99.40	100.20	99.50	99.60	99.60	99.60	99.98	98.98
TFeO	2.15	2.05	2.15	2.23	1.32	1.29	0.98	1.89	2.05	1.74	1.99	2.03	2.23	1.96	1.89	2.45	1.88	1.89	1.41	1.84	2.09	1.07	0.79	1.01	2.81
A/CNK	1.02	1.07	1.01	1.03	1.00	1.06	0.99	0.99	1.04	1.06	1.10	0.98	1.02	1.07	1.05	1.03	1.04	1.01	1.08	1.05	1.03	0.93	0.99	0.98	1.02
A/NK	1.15	1.17	1.15	1.18	1.06	1.12	1.07	1.13	1.17	1.16	1.20	1.14	1.18	1.14	1.18	1.13	1.18	1.11	1.15	1.14	1.14	1.05	1.07	1.04	1.19
Mg [#]	16.2	17.9	16.2	16.7	15.9	18.1	19.1	19.0	19.6	16.3	17.1	18.6	17.7	14.0	17.2	16.4	20.4	15.8	17.7	18.2	17.6	17.8	15.7	12.0	18.2
t _m /°C	827	834	825	825	822	812	839	818	842	827	832	820	836	835	825	832	823	810	801	815	823	819	828	826	842
T _{FeO} /MgO	9.19	8.16	9.22	8.88	9.43	8.08	7.55	7.58	7.31	9.16	8.64	7.80	8.27	10.92	8.60	9.08	6.97	9.47	8.30	8.02	8.37	8.25	9.55	13.06	8.00
Pb	43.4	27.9	24.3	27.4	31.0	304.0	28.6	23.8	30.9	26.8	24.9	23.4	22.2	23.2	22.7	28.7	29.4	31.4	42.1	41.1	32.5	27.2	28.1	28.2	32.3
Sc								3.94	5.12	2.85	3.31	3.74	3.68	3.03	3.44	4.67	4.37	3.93	2.58	4.11	4.04				
V								7.48	8.89	4.50	6.77	6.06	7.10	5.41	6.16	8.53									
Cr								1.46	1.76	0.37	0.91	0.66	0.63	0.72	1.07	0.85	1.00	0.06	0.41	2.21	0.83				
Co	1.74	1.78	1.77	2.11	1.08	1.07	0.93	1.64	2.11	1.24	1.56	1.56	1.77	1.21	1.40	1.61	1.50	1.23	0.63	1.50	1.28	1.24	0.84	0.89	2.63
Ni	1.30	2.08	1.44	1.57	0.56	1.35	0.70	2.07	2.01	0.77	1.40	0.86	1.54	0.93	1.25	1.14	1.16	0.65	5.35	1.91	0.61	2.08	1.07	0.97	3.34
Ga	34.8	32.4	29.8	33.9	20.8	20.1	25.1	24.8	27.5	23.5	23.6	23.3	23.1	24.2	24.0	23.7	23.3	22.8	22.1	24.1	22.4	21.8	22.9	22.8	35.1
Rb	255	227	201	210	221	199	289	239	273	242	220	210	198	221	249	204	201	215	260	238	190	197	246	246	198
Sr	83.7	81.5	109.0	102.0	58.1	67.2	54.4	90.3	75.1	66.7	90.1	98.7	96.3	72.2	86.3	105.0	92.3	70.1	53.2	72.7	88.0	70.4	51.2	51.2	124.0
Ba	401	412	452	447	233	326	248	458	458	284	375	424	411	335	354	409	463	345	234	418	442	359	255	263	476
Zr	254	257	253	249	238	201	288	237	291	239	241	249	283	261	239	271	239	212	172	215	243	254	255	251	310

续表 2-1
Continued Table 2-1

样号	X225	X210	X233	X234	X28	X30	X31	H015	H080	H264	H265	H270	H271a	H272	H273	H312	H542	H550	H552	H574	H584	X21	X24	X25	X220
期次	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
北纬	43°24.9'	43°25.1'	43°23.6'	43°23.6'	43°30.7'	43°30.1'	43°30.5'	43°23.7'	43°24.7'	43°25.3'	43°24.9'	43°25.3'	43°25.3'	43°24.7'	43°24.5'	43°23.2'	43°24.0'	43°25.3'	43°25.9'	43°25.7'	43°26.1'	43°30.8'	43°31.7'	43°31.5'	43°29.3'
东经	117°30.7'	117°15.6'	117°15.6'	117°15.6'	117°41.3'	117°39.9'	117°40.3'	117°40.9'	117°17.4'	117°28.5'	117°28.4'	117°27.6'	117°27.5'	117°22.1'	117°22.7'	117°15.3'	117°15.3'	117°17.3'	117°17.2'	117°19.2'	117°19.9'	117°37.7'	117°37.6'	117°37.6'	117°26.6'
岩性	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	熔结 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	晶屑 凝灰岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩	碎斑 熔岩
Hf	9.17	9.12	9.13	8.91	9.65	7.73	10.30	8.34	9.44	8.05	7.76	7.95	9.06	8.65	7.62	8.28	8.33	7.73	7.13	7.89	8.49	9.16	10.20	9.53	10.70
Th	24.4	25.6	22.0	23.4	27.6	22.1	32.2	22.9	26.4	26.7	22.3	23.4	20.7	23.9	24.1	21.0	19.8	20.3	22.7	22.3	16.9	22.8	27.2	28.4	20.7
U	5.90	5.49	4.71	6.33	4.58	4.06	7.27	5.54	5.17	5.14	4.13	4.62	3.96	3.45	4.59	3.98	4.04	4.03	7.01	5.94	4.67	4.31	4.46	4.34	4.30
Y	54.8	49.9	43.4	55.2	59.8	42.7	72.6	51.8	63.0	44.6	27.8	49.5	40.7	24.8	45.9	27.9	40.4	32.8	31.7	36.7	29.5	36.2	68.3	54.5	75.5
Nb	21.0	20.7	20.0	20.8	20.6	15.8	23.0	18.3	23.7	20.5	20.2	18.8	18.2	19.9	20.9	19.0	15.9	19.9	21.7	22.9	17.8	17.2	18.6	18.1	21.0
Ta	1.86	1.79	1.70	1.70	2.09	1.53	2.48	1.76	2.23	1.97	1.90	1.64	1.59	1.86	1.99	1.60	1.49	1.70	1.97	2.01	1.61	1.52	1.75	1.81	1.75
La	61.1	52.8	46.1	63.4	41.8	33.3	45.8	51.3	52.4	43.7	27.0	51.7	40.0	37.3	42.2	36.6	42.3	43.0	21.9	30.3	35.4	42.6	46.8	36.2	66.0
Ce	120.0	109.0	99.2	124.0	76.5	63.1	95.2	110.0	114.0	86.9	54.9	101.0	80.9	73.0	69.1	90.5	88.6	88.5	56.8	57.4	65.9	89.2	92.3	93.4	120.0
Pr	15.0	13.0	11.8	15.4	10.3	8.1	11.9	12.2	12.5	10.4	7.0	12.7	10.3	9.6	10.2	10.1	11.8	12.7	6.2	8.0	9.5	10.5	11.9	9.3	15.9
Nd	57.9	50.1	46.5	60.1	39.9	30.9	44.6	49.9	48.9	35.5	24.1	47.2	37.1	32.5	37.3	35.8	43.8	45.3	22.7	29.3	35.2	39.1	45.9	35.4	63.1
Sm	11.70	10.00	9.47	12.10	8.32	6.43	9.61	10.90	12.10	8.05	5.69	10.30	8.60	6.74	8.22	7.85	9.60	9.47	5.10	6.57	7.58	7.41	9.68	7.62	13.10
Eu	0.75	0.68	0.73	0.81	0.45	0.52	0.43	0.59	0.68	0.47	0.54	0.72	0.69	0.46	0.59	0.73	0.88	0.63	0.30	0.55	0.71	0.63	0.53	0.47	1.00
Gd	10.70	9.00	8.34	10.10	7.66	5.52	9.09	10.20	11.90	7.36	5.16	9.17	7.63	5.32	7.76	6.75	9.72	9.77	6.10	7.72	8.01	6.24	9.15	6.70	14.00
Tb	1.87	1.65	1.49	1.78	1.57	1.19	1.91	1.62	1.94	1.32	0.96	1.60	1.38	0.97	1.30	1.20	1.43	1.38	0.97	1.18	1.13	1.22	1.91	1.50	2.50
Dy	10.90	9.25	8.81	10.90	9.76	7.53	11.80	8.72	10.20	7.48	5.42	8.35	7.47	5.25	7.18	6.32	7.94	7.18	5.84	6.98	6.21	7.24	11.80	9.48	14.00
Ho	1.89	1.78	1.59	1.88	2.02	1.55	2.44	1.77	1.99	1.55	1.12	1.73	1.46	1.07	1.49	1.25	1.70	1.46	1.37	1.55	1.35	1.38	2.41	1.93	2.69
Er	5.61	5.20	4.93	5.41	6.29	4.70	7.47	5.13	6.12	4.50	3.28	4.66	4.24	3.12	4.25	3.53	5.05	4.39	4.31	4.63	4.00	4.06	7.01	6.12	7.70
Tm	0.83	0.73	0.74	0.75	1.04	0.79	1.26	0.82	0.94	0.72	0.54	0.74	0.66	0.50	0.67	0.55	0.71	0.65	0.68	0.74	0.60	0.66	1.16	1.01	1.05
Yb	5.52	5.42	4.67	5.36	6.83	5.07	7.80	5.21	6.12	4.80	3.48	4.60	4.29	3.41	4.42	3.64	4.76	4.56	4.77	4.99	3.89	4.43	7.49	6.56	6.81
Lu	0.74	0.68	0.68	0.76	0.91	0.66	1.06	0.77	0.92	0.71	0.53	0.69	0.63	0.50	0.67	0.53	0.69	0.63	0.68	0.74	0.58	0.56	0.99	0.84	0.85
LREE	266.4	235.6	213.8	275.8	177.3	142.4	207.5	234.9	240.6	185.0	119.2	223.6	177.6	159.6	167.6	181.6	197.0	199.6	113.0	132.1	154.3	189.4	207.1	182.4	279.1
HREE	38.1	33.7	31.2	36.9	36.1	27.0	42.8	34.2	40.1	28.4	20.5	31.5	27.8	20.1	27.7	23.8	32.0	30.0	24.7	28.5	25.8	25.8	41.9	34.1	49.6
ΣREE	304.5	269.3	245.0	312.7	213.3	169.4	250.4	269.1	280.7	213.5	139.7	255.2	205.4	179.7	195.4	205.4	229.0	229.6	137.7	160.7	180.1	215.2	249.0	216.5	328.7
(La/Yb) _N	7.46	6.57	6.66	7.97	4.13	4.43	3.96	6.64	5.77	6.14	5.23	7.58	6.29	7.37	6.44	6.78	5.99	6.36	3.10	4.09	6.14	6.48	4.21	3.72	6.53
Nb/Ta	11.29	11.56	11.76	12.24	9.86	10.33	9.27	10.40	10.63	10.41	10.63	11.46	11.45	10.70	10.50	11.88	10.67	11.71	11.02	11.39	11.06	11.32	10.63	10.00	12.00
Nb/U	3.56	3.77	4.25	3.29	4.50	3.89	3.16	3.30	4.58	3.99	4.89	4.07	4.60	5.77	4.55	4.77	3.94	4.94	3.10	3.86	3.81	3.99	4.17	4.17	4.88
Ce/Pb	2.76	3.91	4.08	4.53	2.47	0.21	3.33	4.62	3.69	3.24	2.20	4.32	3.64	3.15	3.04	3.15	3.01	2.82	1.35	1.40	2.03	3.28	3.28	3.31	3.72
δEu	0.20	0.22	0.25	0.22	0.17	0.26	0.14	0.17	0.17	0.18	0.30	0.22	0.26	0.23	0.22	0.30	0.28	0.20	0.16	0.24	0.28	0.27	0.17	0.20	0.22
10 ⁴ Ga/Al	5.03	4.65	4.24	4.81	3.26	3.04	4.01	3.63	3.91	3.39	3.38	3.28	3.23	3.43	3.48	3.29	3.22	3.29	3.34	3.41	3.16	3.46	3.60	3.61	4.83

续表 2-3
Continued Table 2-3

样号	X221	X222	X223	X224	H020	H64	H159	H161	H181	H183	H586	H165	H179	H187	H263	H271b	H305	H306a	H306b	H318b	H320	H467	H479	H168	H186
期次	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
北纬	43°26.9'	43°25.7'	43°27.1'	43°26.1'	43°28.9'	43°25.2'	43°28.8'	43°27.7'	43°26.4'	43°26.1'	43°26.3'	43°23.7'	43°26.2'	43°23.9'	43°25.5'	43°25.3'	43°23.2'	43°23.2'	43°23.2'	43°23.2'	43°22.9'	43°21.9'	43°23.7'	43°21.8'	43°24.5'
东经	117°24.4'	117°23.7'	117°21.1'	117°29.8'	117°26.4'	117°24.1'	117°28.7'	117°28.7'	117°29.4'	117°28.8'	117°21.1'	117°18.1'	117°30.3'	117°24.1'	117°28.2'	117°27.5'	117°24.2'	117°24.8'	117°24.8'	117°24.8'	117°19.1'	117°21.4'	117°22.1'	117°18.9'	117°30.6'
岩性	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩	碎斑熔岩
Hf	8.54	9.57	9.29	10.20	10.30	9.91	9.44	8.24	9.13	6.99	7.74	11.70	11.70	9.79	10.50	9.68	9.92	9.74	10.70	12.00	11.10	10.40	10.60	11.10	11.00
Th	24.1	26.2	30.7	29.6	19.7	19.2	20.9	21.4	25.9	17.8	13.3	13.9	12.4	13.5	13.7	12.8	12.7	12.7	16.9	13.7	19.8	18.3	17.1	13.3	13.4
U	3.90	6.29	3.87	5.08	3.46	4.80	3.71	3.20	2.72	4.89	4.11	2.36	2.54	1.83	1.70	2.46	1.87	2.46	2.46	1.83	4.92	3.48	4.42	3.32	2.79
Y	41.7	53.1	57.4	59.5	45.6	39.9	45.8	44.8	54.2	46.8	34.7	44.1	38.4	34.0	46.5	45.5	42.6	46.3	46.3	54.0	45.2	47.2	31.0	43.7	40.2
Nb	19.1	22.0	25.3	22.8	18.9	18.0	19.5	18.5	18.5	19.8	18.0	18.9	19.0	16.8	18.6	20.5	19.0	20.6	20.6	25.1	22.9	19.9	21.1	19.9	18.2
Ta	1.71	1.94	2.41	2.13	1.57	1.49	1.66	1.65	1.62	2.03	1.52	1.35	1.34	1.24	1.30	1.33	1.35	1.34	1.50	1.57	1.71	1.49	1.53	1.46	1.20
La	26.7	59.9	54.7	60.9	52.7	45.3	49.5	51.3	83.2	44.4	44.8	55.4	48.0	46.2	43.2	48.6	46.2	46.2	38.9	50.8	48.5	49.8	29.3	44.5	57.7
Ce	131.0	126.0	114.0	121.0	116.0	109.0	114.0	107.0	129.0	80.4	83.8	132.0	115.0	100.0	95.1	103.0	100.0	98.2	95.6	113.0	109.0	108.0	110.0	107.0	115.0
Pr	6.1	15.1	13.8	14.9	12.7	11.3	11.8	12.4	18.6	10.4	11.7	14.0	12.8	11.1	11.7	11.8	12.6	11.8	11.2	14.1	12.3	12.0	8.3	10.9	14.8
Nd	22.7	57.5	53.0	57.6	52.4	47.5	49.9	52.9	76.9	43.1	42.5	56.4	56.6	47.9	44.4	44.0	47.6	44.3	43.0	55.8	44.9	44.9	25.4	50.1	55.6
Sm	4.83	11.60	11.10	11.90	11.70	9.85	10.80	11.30	15.50	9.34	9.12	12.40	11.60	10.40	9.55	10.20	10.30	9.66	9.80	11.80	10.20	9.77	6.52	11.10	11.40
Eu	0.49	0.75	0.60	0.62	0.92	0.72	0.74	0.82	0.93	0.46	0.67	1.69	1.42	1.37	1.26	1.33	1.44	1.44	0.95	1.12	0.98	1.04	0.70	1.45	1.57
Gd	5.23	10.60	10.40	11.00	10.60	8.90	9.94	9.90	11.60	7.73	9.43	11.50	8.79	7.83	8.25	8.86	9.28	8.58	8.98	10.80	9.17	9.55	6.64	8.79	12.80
Tb	1.05	1.88	1.83	1.97	1.57	1.38	1.56	1.56	2.13	1.45	1.39	1.75	1.61	1.46	1.37	1.56	1.56	1.39	1.55	1.81	1.63	1.56	1.10	1.62	1.61
Dy	6.77	10.50	10.70	11.00	8.62	7.56	8.54	8.47	10.80	7.96	7.61	8.98	8.05	7.47	7.23	8.02	8.16	7.50	8.19	9.66	8.86	8.20	6.57	8.43	8.44
Ho	1.40	1.76	1.98	2.09	1.62	1.41	1.61	1.61	1.97	1.55	1.55	1.63	1.50	1.42	1.45	1.60	1.62	1.46	1.69	1.91	1.73	1.62	1.37	1.60	1.72
Er	4.50	5.61	5.87	5.92	4.54	4.25	5.02	4.62	5.93	5.01	4.45	4.84	4.38	4.31	3.82	4.16	4.40	3.90	4.47	5.03	4.74	4.46	3.95	4.67	5.04
Tm	0.65	0.82	0.82	0.93	0.72	0.66	0.79	0.74	0.87	0.80	0.64	0.72	0.65	0.63	0.58	0.64	0.64	0.59	0.69	0.74	0.74	0.68	0.62	0.69	0.68
Yb	4.95	5.59	5.94	5.83	4.45	4.29	5.04	4.65	5.62	5.13	4.43	4.51	4.23	4.12	3.67	3.97	4.08	3.79	4.33	4.92	4.70	4.41	4.02	4.49	4.56
Lu	0.63	0.74	0.79	0.77	0.70	0.65	0.77	0.71	0.84	0.81	0.63	0.68	0.64	0.63	0.54	0.60	0.61	0.57	0.63	0.71	0.69	0.67	0.59	0.68	0.70
LREE	191.9	270.8	247.2	266.9	246.4	223.7	236.7	235.7	324.1	188.1	192.6	271.9	250.5	218.8	208.2	213.5	220.5	211.6	199.5	246.6	225.9	225.5	180.2	225.1	256.1
HREE	25.2	37.5	38.3	39.5	32.8	29.1	33.3	32.3	39.8	30.4	30.1	34.6	29.9	27.9	26.9	29.4	30.4	27.8	30.5	35.6	32.3	31.2	24.9	31.0	35.6
ΣREE	217.0	308.3	285.5	306.4	279.2	252.8	270.0	268.0	363.9	218.5	222.7	306.5	280.4	246.6	235.1	242.9	250.9	239.4	230.0	282.2	258.1	256.7	205.0	256.0	291.6
(La/Yb) _N	3.64	7.22	6.21	7.04	7.98	7.12	6.62	7.44	9.98	5.84	6.82	8.28	8.46	7.85	8.49	7.34	8.03	8.22	6.06	6.96	6.96	7.61	4.91	6.68	8.53
Nb/Ta	11.17	11.34	10.50	10.70	12.04	12.08	11.75	11.21	11.42	9.75	11.84	14.00	14.18	13.55	14.31	15.41	14.07	14.33	13.73	15.99	13.39	13.36	13.79	13.63	15.17
Nb/U	4.90	3.50	6.54	4.49	5.46	3.75	5.26	5.78	6.80	4.05	4.38	8.01	7.48	7.18	10.16	12.06	7.72	10.27	8.37	13.72	4.65	5.72	4.77	5.99	6.52
Ce/Pb	4.83	5.55	3.06	4.26	4.89	4.98	5.11	4.25	4.61	3.15	3.21	2.77	6.15	5.10	5.23	5.00	5.15	4.72	5.43	4.81	7.36	7.11	6.40	4.04	5.00
δEu	0.30	0.20	0.17	0.16	0.25	0.23	0.21	0.23	0.20	0.16	0.22	0.43	0.41	0.45	0.42	0.42	0.44	0.47	0.30	0.30	0.30	0.32	0.32	0.43	0.40
¹⁰⁷ Ca/ ^{Al}	4.04	4.93	4.77	4.94	3.65	3.55	3.31	3.42	3.80	3.75	3.34	3.33	3.38	3.11	3.11	3.21	3.04	3.11	3.19	3.31	3.19	3.15	3.25	3.50	3.07

注: 全岩饱和温度计据 Watson et al. (1983), 空白表格表示没有检测。

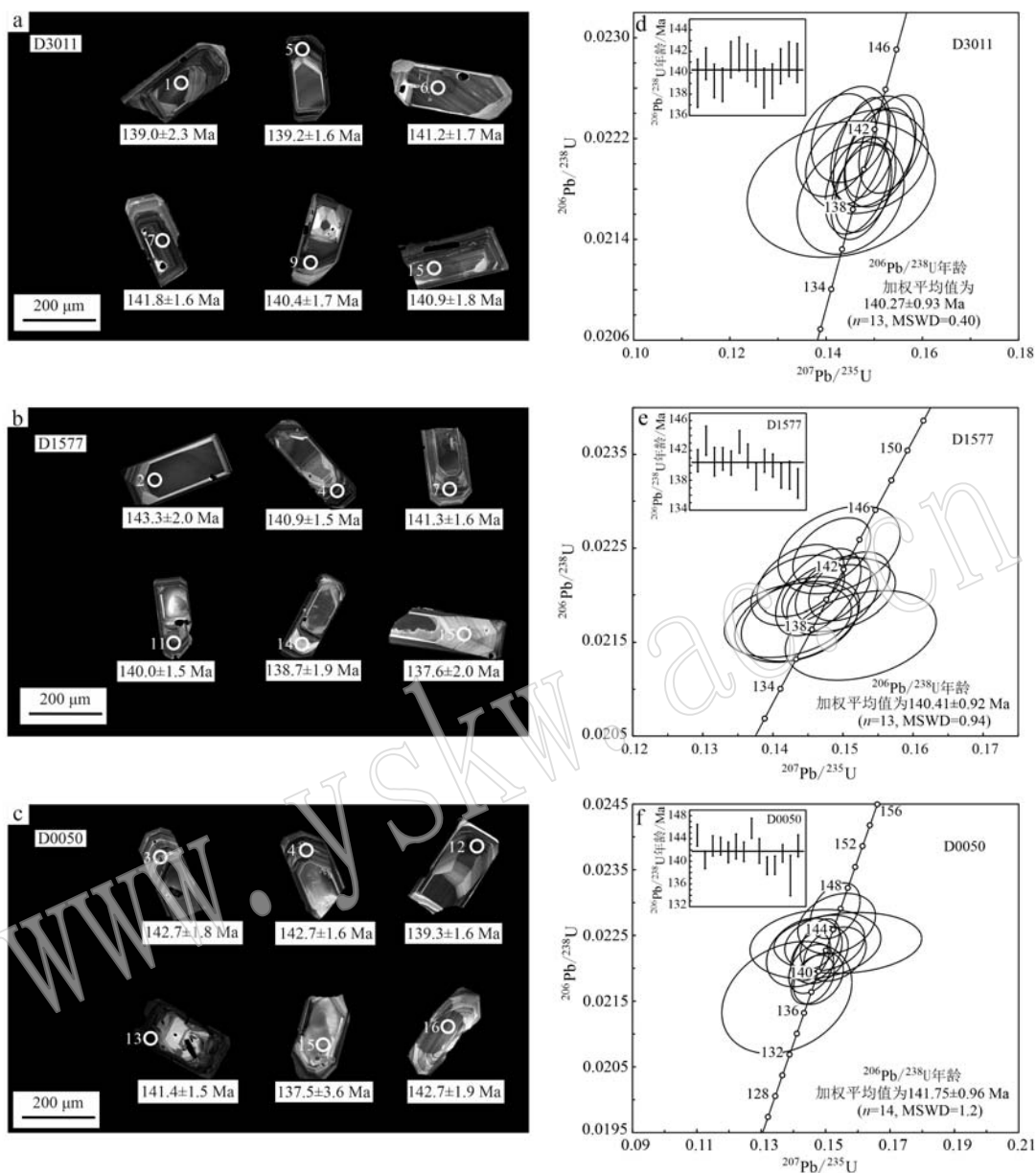


图 3 黄岗梁晶屑凝灰岩、碎斑熔岩和斑状二长花岗岩的部分锆石阴极发光图(a~c)和 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图(d~f)

Fig. 3 Partial zircon CL images (a~c) and SHRIMP zircon U-Pb concordia and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagrams (d~f) of the crystalline tuff, porphyroclastic lava, and porphyritic monzogranite from Huanggangliang

元素原始地幔标准化蛛网图的形态一致, 均指示彼此之间密切的成因联系。

4.2.4 Sr-Nd 同位素组成

黄岗梁火山-侵入隆起第 1 期到第 3 期产物样品的全岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。所有样品具有几乎一致的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和二阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}2}$, 第 1 期产物流纹质晶屑凝灰岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-0.43 \sim -0.40$, 相应的二阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}2}$

均为 0.98 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.702 2~0.703 3。第 2 期产物碎斑熔岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-0.36 \sim -0.10$, 相应的二阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 0.98 Ga 和 0.96 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.704 5~0.704 7。第 3 期产物斑状二长花岗岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $-0.16 \sim -0.08$, 相应的二阶段 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 均为 0.96 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.705 4~0.705 7(图 6)。

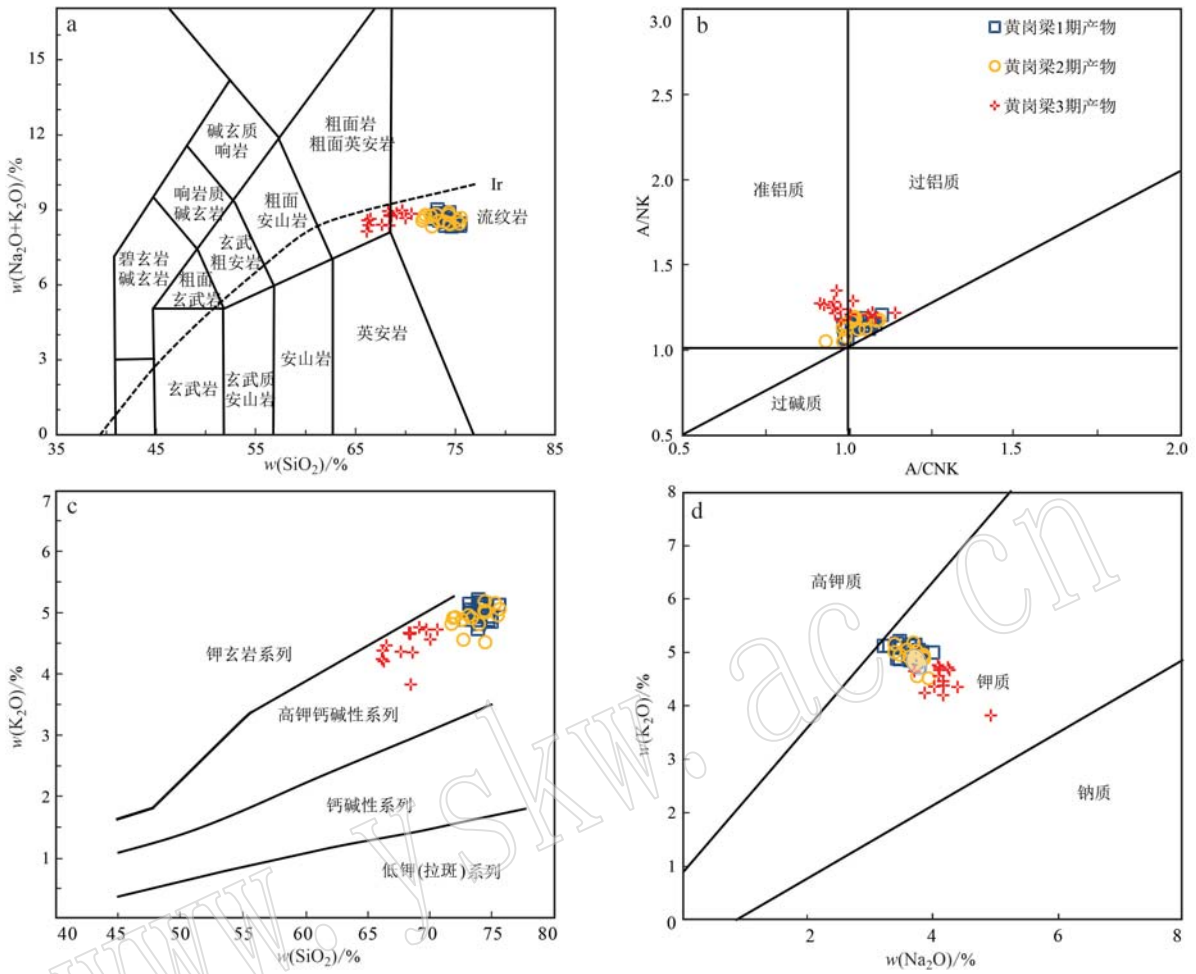


图4 黄岗梁火山-侵入杂岩 TAS(a, Ir 实线据 Irvine and Baragar, 1971)、A/NK-A/CNK(b, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989)、 K_2O-SiO_2 (c, 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 K_2O-Na_2O (d, 据 Middlemost, 1975)图解

Fig. 4 TAS(a, Ir line after Irvine and Baragar, 1971), A/NK-A/CNK(b, after Maniar and Piccoli, 1989), K_2O-SiO_2 (c, after Peccerillo and Taylor, 1976), and K_2O-Na_2O (d, after Middlemost, 1975) diagrams from the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang

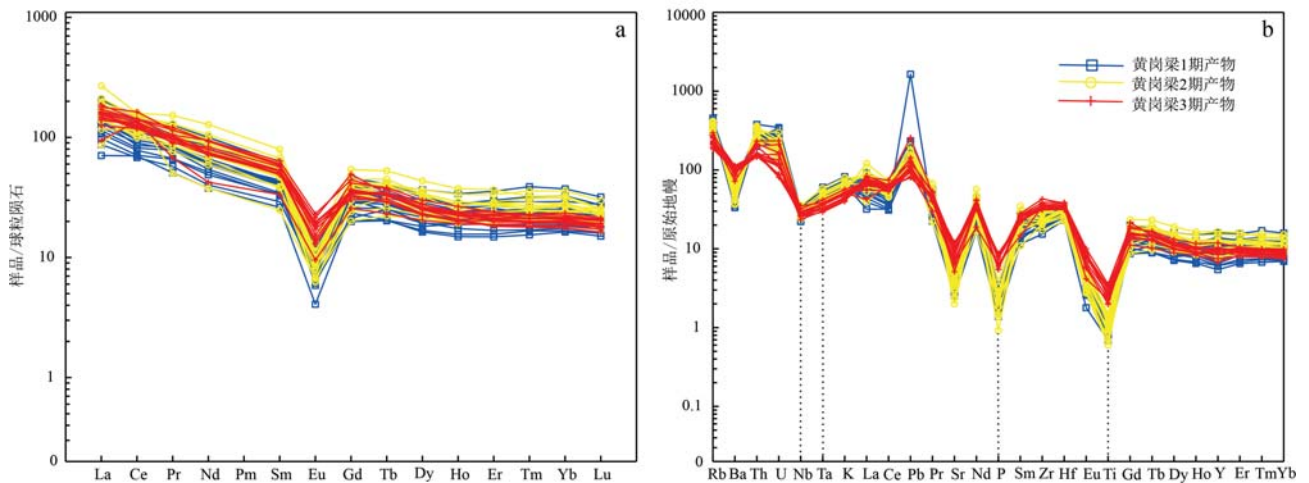


图5 黄岗梁火山-侵入杂岩稀土配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化数据据 Sun and McDougough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b) from the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang (normalized values are from Sun and McDougough, 1989)

表 3 黄岗梁火山-侵入杂岩全岩 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Huanggangliang volcano-intrusive complex

岩性 样品	流纹质晶屑凝灰岩		碎斑熔岩		斑状二长花岗岩	
	H272	H574	H586	H63	H311	H186
坐标	E117°27.1' N43°24.7'	E117°19.2' N43°25.7'	E117°21.0' N43°26.3'	E117°22.8' N43°25.3'	E117°23.6' N43°24.2'	E117°23.5' N43°24.5'
年龄/Ga	0.140	0.140	0.140	0.138	0.141	0.141
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	221	238	187	74	145	132
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	72.2	72.7	81.9	50.8	243.0	182.0
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	8.87	9.48	6.61	4.22	1.73	2.10
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.720 982	0.721 108	0.717 744	0.712 973	0.708 886	0.709 938
2σ	14	14	10	9	14	15
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.703 3	0.702 2	0.704 5	0.704 7	0.705 4	0.705 7
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	6.74	6.57	9.12	13.40	9.64	11.40
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	32.5	29.3	42.5	61.9	49.4	55.6
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.125 4	0.135 6	0.129 7	0.130 9	0.118 0	0.124 0
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 552	0.512 560	0.512 571	0.512 560	0.512 557	0.512 567
2σ	5	14	7	6	10	10
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-0.40	-0.43	-0.10	-0.36	-0.16	-0.08
t_{DM1}/Ga	1.03	1.15	1.05	1.09	0.95	0.99
t_{DM2}/Ga	0.98	0.98	0.96	0.98	0.96	0.96

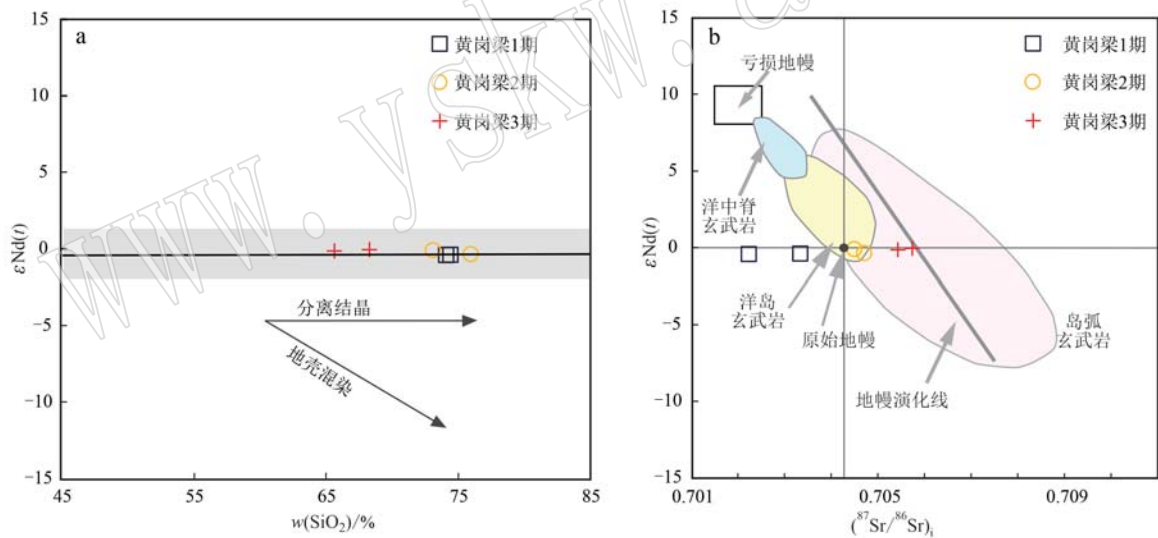


图 6 黄岗梁火山-侵入杂岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 图解(a)和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(b) (底图据 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 6 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - SiO_2 (a) and $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (b) diagrams from the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang (after Zindler and Hart, 1986)

5 讨论

5.1 黄岗梁火山岩与侵入岩的关系

晶粥模型可以解释流纹质火山岩-花岗岩的成因联系，这一模型自 2004 年被提出至今，已得到了物理过程计算、计算机模拟、地球化学反演等方式的验证 (Hildreth, 2004; Bachmann and Bergantz,

2004; Gelman *et al.*, 2014)。该模型所构建的结晶分异过程主要是指颗粒在重力驱动下，可通过受阻沉降、压实作用等机制与熔体分离，受阻沉降是指在岩浆停止对流后，晶体颗粒以较低速率下沉，压实则是指晶粥体中的晶体颗粒受到重力作用，自下而上地将晶间熔体挤出。抽离熔体可形成高硅花岗岩或流纹质火山岩，而剩余堆晶则可能固结成花岗岩 (Gelman *et al.*, 2014)。质疑晶粥模型的证据主

要是全球全岩地球化学汇编中与火山岩同期的堆晶岩出露并不明显 (Glazner *et al.*, 2015)。黄岗梁晶屑凝灰岩、碎斑熔岩、斑状二长花岗岩的形成时代基本一致, 为 141.75~140.27 Ma。它们的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化范围很小, 为 -0.43~-0.08, 相应的 Nd 模式年龄 (t_{DM2}) 为 0.98~0.96 Ga, 表明其应起源于相同的源区, 在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图中 (图 6b), 样品点分布在原始地幔附近, 指示其可能来源于新元古代含有大量幔源组分的新生地壳物质 (季根源等, 2021)。并且, 研究区火山岩与侵入岩产出的空间位置紧邻, 说明它们之间存在密切相关的成因联系。黄岗梁火山-侵入隆起晶屑凝灰岩、碎斑熔岩、

斑状二长花岗岩的 SiO_2 和 K_2O 含量呈连续降低的趋势, 呈现右倾的轻稀土富集模式, 表现出富集大离子亲石元素 Rb、Th 和 U, 强烈亏损 Ba、Sr 和高场强元素 Ti、Nb、Ta 的特征, 说明其来源具有相关性, 很可能为同一岩浆房的产物。从主要氧化物与 SiO_2 的协变图 (图 7) 中可以看出: Al_2O_3 、 MgO 、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ 、 TiO_2 、 Na_2O 、 CaO 、 MnO 、 P_2O_5 与 SiO_2 呈明显的负相关关系。这可能与岩浆演化过程中铁钛氧化物、斜长石和磷灰石的分离结晶有关。结合该隆起岩石样品强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti 的特征, 说明在岩浆演化过程中可能也发生了强烈的黑云母、斜长石、钾长石、磷灰石和铁钛氧化物的分离结晶作用。

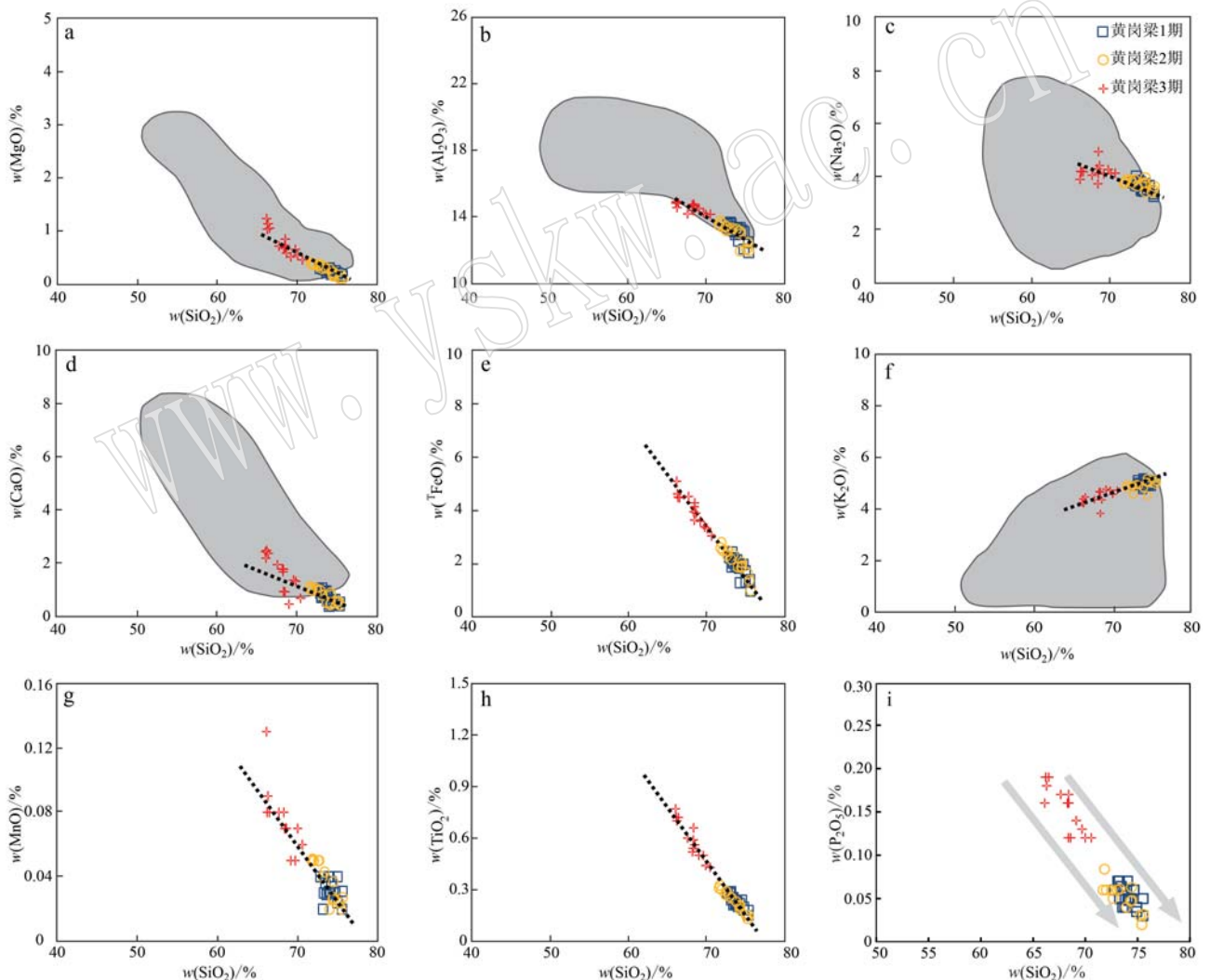


图 7 黄岗梁火山-侵入杂岩主要氧化物和 SiO_2 协变图 (阴影部分为实验下地壳部分熔融熔体的组成) (据 Wolf and Wyllie, 1994; Rapper and Watson, 1995; Springer and Seck, 1997; Sisson *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2007)

Fig. 7 Major element oxide variations of the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang (the shaded area represents the compositions of the experimental melts produced by partial melts of lower crustal rocks) (after Wolf and Wyllie, 1994; Rapper and Watson, 1995; Springer and Seck, 1997; Sisson *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2007)

从主量元素与 SiO_2 的协变图上(图7), 可以看出晶屑凝灰岩、碎斑熔岩和斑状二长花岗岩呈现出明显的分带性, 推测其为同一岩浆房3个不同期次排出的产物。结合黄岗梁火山-侵入杂岩富含晶体的特征, 推测其岩浆房可能为富含晶体的多晶粥状态, 经过黑云母、斜长石、钾长石、磷灰石、锆石和铁钛氧化物的结晶分离, 形成演化程度较高的熔体和演化程度较低的晶粥体。3种岩相的 Eu/Eu^* 变化也支持了长石的结晶, 经过晶屑凝灰岩(δEu 平均值为 0.22)和碎斑熔岩(δEu 平均值为 0.21)的抽离, 残留的晶粥为相对富含斜长石的斑状二长花岗岩(δEu 平均值为 0.39)。晶屑凝灰岩和碎斑熔岩显示强烈的 Ba 和 Eu 亏损, 这是典型的流纹质熔体的特

征(Hildreth, 2004)。相对于晶屑凝灰岩和碎斑熔岩, 斑状二长花岗岩中富集 Zr、Ba, 表明其富集锆石和长石(\pm 黑云母), 这与晶粥模型中抽离熔体和堆晶体化学成分互补的特点一致(图8)。

黄岗梁火山岩与侵入岩之间具有成分上的互补关系, 火山岩属于抽离的高硅熔体喷发/侵出的产物, 而第3期较为基性的斑状二长花岗岩则属于同时期相对应的堆晶岩, SiO_2 含量较低。从早到晚, SiO_2 含量在很多地方都呈降低的趋势(张招崇等, 1994; 王德滋等, 2000; 周华等, 2016; Watts *et al.*, 2016; Schaen *et al.*, 2017), 黄岗梁火山机构也是如此, 这与晶粥模型的特点一致, 即岩浆房中的岩浆演化程度自上而下逐渐降低。

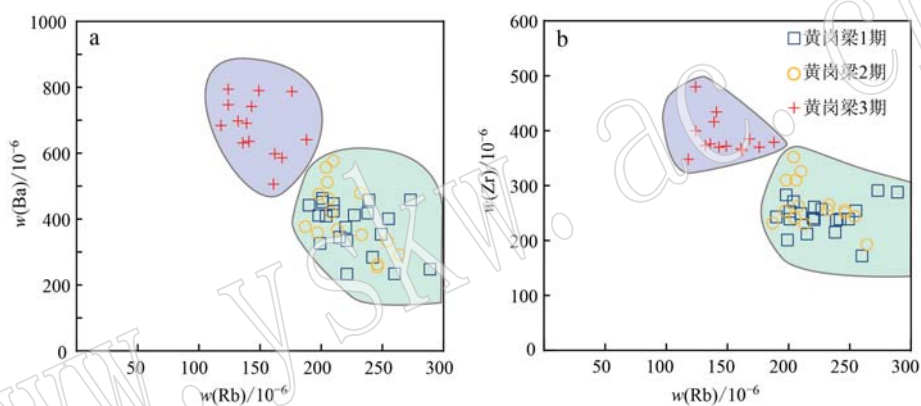


图8 黄岗梁火山-侵入杂岩 Ba-Rb 谐和图(a)和 Zr-Rb 谐和图(b)

Fig. 8 Ba-Rb (a) and Zr-Rb (b) diagrams from the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang

影响岩浆最终定位方式的因素很多, 既有岩浆自身的物理化学性质(尤其是粘度), 也有岩浆周边的构造条件、火山通道的宽窄及其中堵塞物的强度等因素。在诸多因素中, 岩浆粘度是一个主要控制因素, 岩浆粘度主要与岩浆成分、温度、挥发分含量及斑晶矿物的含量有关, 酸性岩浆的粘度较大, 不易溢出地表, 更多表现为猛烈爆发(挥发分含量较高)或侵出(缺少挥发分)。火山通道的宽度与火山喷发的烈度往往成反比, 火山通道越窄, 越有利于岩浆中挥发分的聚集, 一旦爆发, 其烈度较大。火山通道越宽畅, 岩浆更易溢出地表, 也不利于岩浆中挥发分的聚集, 即使爆发, 其烈度往往也不大。

随着矿物颗粒的结晶, 晶间熔体逐渐演变成高硅组分, 晶体颗粒通过受阻沉降、压实作用等与熔体分离, 晶间熔体被“抽离”到岩浆房顶部, 形成 SiO_2 含量较高的分层(Bachmann and Bergantz, 2004)。这些高硅高钾的熔体粘度较大, 易从带状

火山通道喷发而出, 形成流纹质晶屑凝灰岩(图9a)。随着岩浆中的挥发分被大量消耗和火山通道的宽度增大, 火山作用的烈度降低, 这些高硅熔体便沿火山通道挤出地表, 形成碎斑熔岩(图9b)。最后在火山活动的末期, 挥发分消耗殆尽, 岩浆房压力较小, 相对贫硅低钾的晶粥体沿着环状断裂侵入到火山口附近, 形成斑状二长花岗岩(图9c)。

5.2 岩石成因

黄岗梁火山-侵入隆起火山-侵入杂岩属于高钾钙碱性准铝质-过铝质岩石, 地球化学上表现为高 Si、K 和 Na, 低 Ca、Al、Mg、P, 富集大离子亲石元素 Rb、Th 和 U, 强烈亏损 Ba、Sr 和高场强元素 Ti, Eu 呈强烈的负异常(δEu 介于 0.14~0.47 之间, 平均值为 0.27), 稀土元素配分曲线呈右倾的 V 字型, $^1\text{FeO}/\text{MgO}$ (4.06~13.06) 和 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ (3.04~5.03) 值较高, 与 A 型花岗岩的地球化学特征相似。在 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 与 Nb、Ce、 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 、 $^1\text{FeO}/\text{MgO}$ 等花

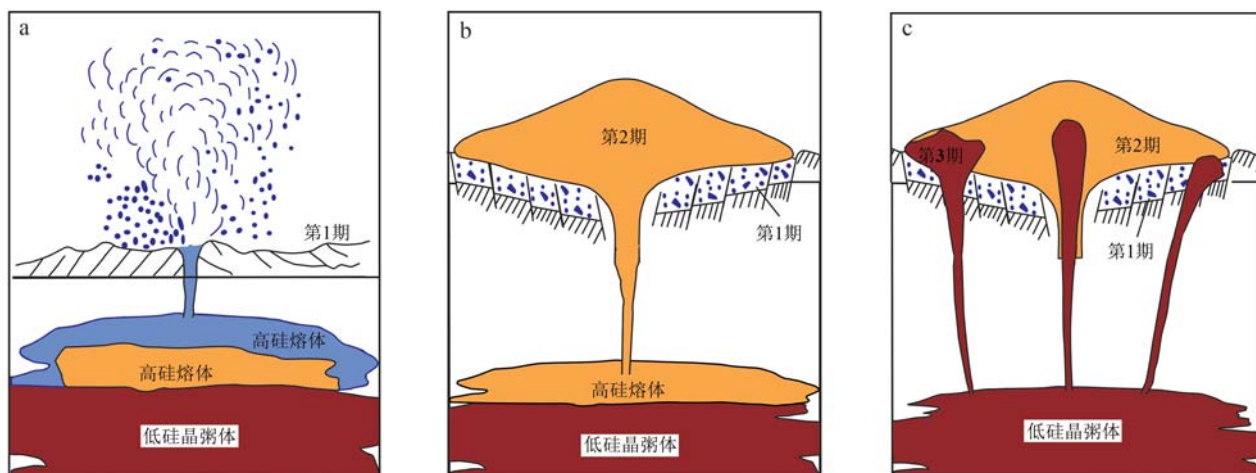


图9 黄岗梁火山-侵入隆起形成过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the formation process of Huanggangliang volcanic-extrusive uplift

岗岩分类判别图解中(Whalen *et al.*, 1987), 黄岗梁地区所有样品点均落在 A 型花岗岩区域(图 10)。在高分异的情况下, A 型花岗岩与 I 型、S 型花岗岩难以通过地球化学和矿物组成来区分(吴福元等, 2007)。但高分异 S 型花岗岩的一个重要特征是 P_2O_5 含量与 SiO_2 呈明显的正相关关系(Chappell and White, 1992), 黄岗梁岩石样品的 P_2O_5 含量与 SiO_2 呈明显的负相关关系, 明显不同于高分异 S 型花岗岩的化学特征。高分异 I 型花岗岩的 $TFeO$ 含量较低, 一般小于 1%, 形成温度较低, 平均值为 $764^\circ C$; 而 A 型花岗岩的 $TFeO$ 含量较高, 一般大于 1%, 形成温度较高, 一般大于 $800^\circ C$ (Chappell and White, 1992; King *et al.*, 1997)。黄岗梁岩石样品的 $TFeO$ 含量为 0.79%~5.11%, 平均值为 2.51%; 采用锆石饱和温度计得出的岩石形成温度为 $801\sim 874^\circ C$, 这些都属于 A 型花岗岩的特征, 明显不同于高分异 I 型花岗岩。

目前对于 A 型花岗岩的成因仍有不同认识, 主要的成因模式是: ① 富 F 麻粒岩相下地壳部分熔融(Whalen *et al.*, 1987); ② 幔源岩浆与壳源岩浆混合(Yang *et al.*, 2006); ③ 幔源的碱性基性岩-中性岩分异演化(Bonin, 2007)。幔源岩浆分异形成的 A 型花岗岩往往伴随着大规模同时代的基性-超基性岩产出(Turner *et al.*, 1992)。黄岗梁地区仅在火山机构中部及西南边出现少量的闪长玢岩等中性岩石, 缺少同时代的基性岩-超基性岩, 基本可以排除其由幔源岩浆分异成因的可能。再者, 如果是由于幔源岩浆和壳源岩浆混合成因, 那么 A 型花岗岩中应

当有大量的暗色镁铁质包体发育(Yang *et al.*, 2006; 张舒等, 2009), 而黄岗梁火山-侵入杂岩中并未见到大量的暗色镁铁质包体, 指示其由幔源与壳源岩浆混合而成的可能也不成立。一般地, 地幔来源的岩浆其 Nb/Ta 值约为 17.5, Nb/U 平均值为 47, Ce/Pb 平均值为 27; 而地壳来源的岩浆其 Nb/Ta 值为 11.0~12.0, Nb/U 平均值为 6.2, Ce/Pb 平均值为 3.9(Green, 1995; Hofmann, 1988; Rudnick and Gao, 2003)。黄岗梁火山-侵入杂岩的 Nb/Ta 值为 9.27~15.99, Nb/U 值为 3.10~13.72, Ce/Pb 值为 0.21~7.36, 这与地壳来源的岩浆成分相似。实验岩石学显示, 玄武岩/变玄武岩在 $800\sim 3\ 200$ MPa 压力下部分熔融可形成具有高钾钙碱性特征的中酸性熔体(Rapp and Watson, 1995), 并且熔体具有低 MgO 、 $Mg^\#$ (<45) 和高 Al_2O_3 含量。黄岗梁火山-侵入杂岩主量元素的组成与实验岩石学下地壳部分熔融的熔体一致(图 7)。

黄岗梁岩石样品 Sr 含量为 $42.2\times 10^{-6}\sim 253.0\times 10^{-6}$, Yb 含量为 $3.41\times 10^{-6}\sim 7.80\times 10^{-6}$, 属于低 Sr、高 Yb 花岗岩类, 表明其形成时源区处于较低的压力环境(张旗等, 2006)。此外, A 型花岗岩是在高温下形成的, 这种高温热源可以由软流圈上涌或幔源镁铁质岩浆的底侵和侵入作用提供(Wu *et al.*, 2002)。

综上, 黄岗梁火山-侵入杂岩是在早白垩世软流圈上涌或者幔源镁铁质岩浆的底侵作用下, 诱发上覆地壳发生大规模部分熔融形成的。

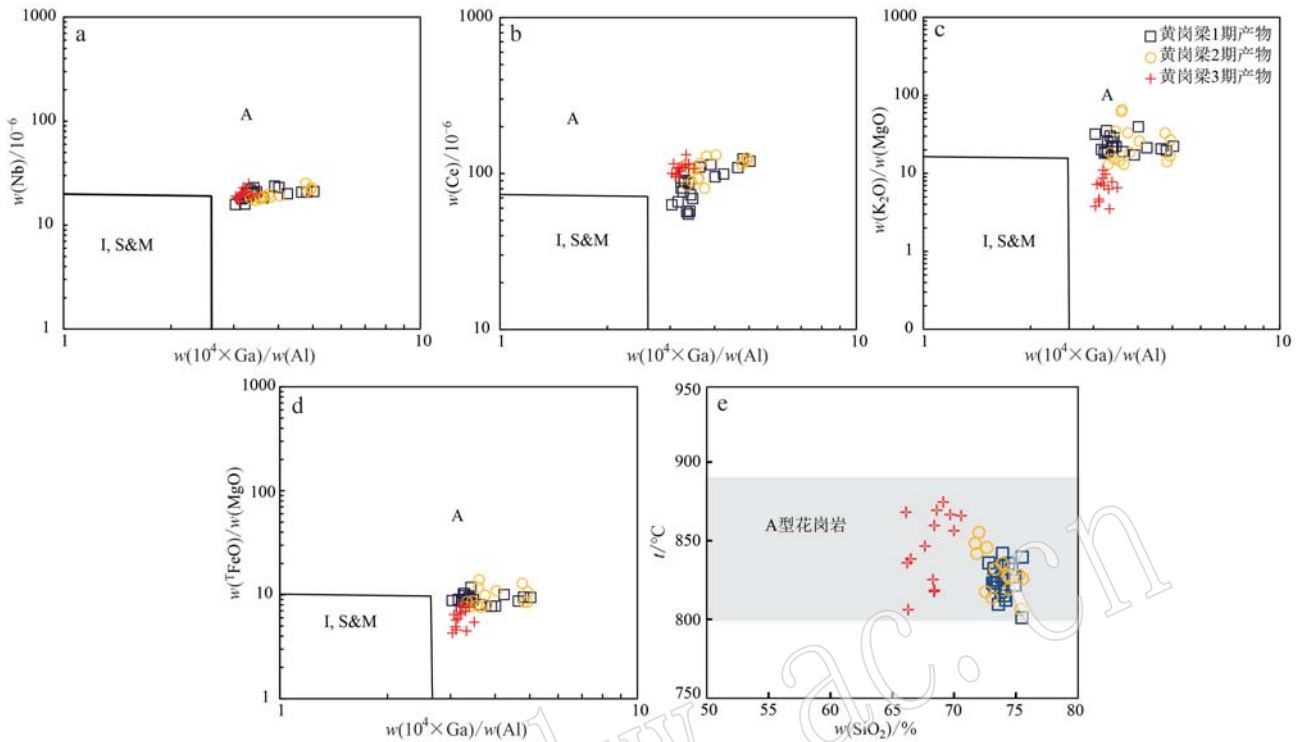


图 10 黄岗梁火山-侵入杂岩成因类型判别图解(a~d 底图据 King *et al.*, 1997)

Fig. 10 The genetic type discrimination diagrams from the volcano-intrusive complex in the Huanggangliang (a~d after King *et al.*, 1997)

6 结论

(1) 黄岗梁火山-侵入隆起晶屑凝灰岩、碎斑熔岩和斑状二长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 140.27 ± 0.93 Ma、 140.41 ± 0.92 Ma 和 141.75 ± 0.96 Ma, 在误差范围内一致, 属于早白垩世。

(2) 黄岗梁火山-侵入杂岩属于高钾钙碱性系列岩石, 具有准铝质-过铝质 A 型花岗岩的特征, 是从下地壳部分熔融形成的岩浆房中逐层排出形成的。其中, 第 1 期产物晶屑凝灰岩是演化程度较高的高硅熔体喷发形成的, 第 2 期产物碎斑熔岩是高硅熔体侵入形成的, 第 3 期产物斑状二长花岗岩是演化程度较低的晶粥体沿该火山机构晚期发育的环状断裂侵位形成的。

References

Bachmann O and Bergantz G W. 2004. On the origin of crystal-poor rhyolites: Extracted from batholithic crystal mushes [J]. *Journal of Petrology*, 45: 1 565~1 582.

- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97(1~2): 1~29.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1~2): 1~26.
- Gelman S E, Deering C D, Bachmann O, *et al.* 2014. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 403: 299~306.
- Glazner A F, Coleman D S and Mills R D. 2015. The volcanic-plutonic connection [A]. Breitkreuz C and Rocchi S. *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems: Dykes, Sills, and Laccoliths* [C]. New York: Springer International Publishing: 1~22.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 347~359.
- Hildreth W. 2004. Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: Several contiguous but discrete systems [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136 (3~4): 169~198.
- Hofmann A W. 1998. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297~314.

- Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Nei-Mongol Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Irvine T N J and Baragar W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523~548.
- Ji Genyuan, Jiang Sihong, Li Gaofeng, *et al.* 2021. Metallogenetic control of magmatism on the Maodeng Sn-Cu deposit in the Southern Great Xing'an Range: Evidence from geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45(4): 681~704(in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Li C F, Li X H, Li Q L, *et al.* 2012. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme[J]. Analytica Chimica Acta, 727(10): 54~60.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Middlemost E A K. 1975. A simple classification of volcanic rocks[J]. Bull. Volcanol., 36: 282~397.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocenecalc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63~81.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 36(4): 891~931.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. Holland H D and Turekian K K. Treatise on Geochemistry[C]. Oxford: Elsevier-Perгамon, 3: 1~64.
- Schaen A J, Cottle J M, Singer B S, *et al.* 2017. Complementary crystal accumulation and rhyolite melt segregation in a late Miocene Andean pluton[J]. Geological Society of America Bulletin, 45: 835~838.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, *et al.* 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 148(6): 635~661.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 48(S1): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Springer W and Seck H A. 1997. Partial fusion of basic granulite at 5~15 kbar: Implications for the origin of TTG magmas[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127(1): 30~45.
- Sun S S and McDougough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism[J]. Geology, 20(10): 931~934.
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, *et al.* 2000. Characteristics and petrogenesis of Late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complexes in Southeastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 6(4): 488~497(in Chinese with English abstract).
- Wang Shuo, Wang Xiaolei and Du Dehong. 2020. Studies on the volcanic-plutonic connection[J]. Geological Journal of China Universities, 26(5): 497~505(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295~304.
- Watts K E, John D A, Colgan J P, *et al.* 2016. Probing the volcanic-plutonic connection and the genesis of crystal-rich rhyolite in a deeply dissected supervolcano in the Nevada Great Basin: Source of the Late Eocene Caetano Tuff[J]. Journal of Petrology, 57: 1599~1644.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 95(4): 407~419.
- Wolf M B and Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 115(4): 369~383.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217~1238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Li H, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chemical Geology, 187(1): 143~173.
- Xiao L and Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints[J]. Lithos, 95(3~4): 399~414.
- Xie Jiaying, Tao Kuiyuan, Xie Fanggui, *et al.* 1993. Facies character and models of prophyroclastic lavas[J]. Volcanology and Mineral Resources, 14(3): 1~6(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, *et al.* 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 89(1): 89~106.
- Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, *et al.* 2010. Geochronological frame-

- work of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China, and their geodynamic implications[J]. *Journal Asian Earth Science*, 39: 786~793.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2 249~2 269(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shu, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. The petrology, mineralogy and geochemistry study of the Huangshan granite intrusion in Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 25~38(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Wang Fubao, *et al.* 1994. Essential characteristics of volcanic rocks and discussion on their genesis in Yixian basin, western Liaoning[J]. *Geoscience*, 8(4): 441~451(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hua, Qiu Jiansheng, Yu Sibin, *et al.* 2016. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from Coqen district of Tibet and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3 173~3 191(in Chinese with English abstract).
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493~571.
- 季根源, 江思宏, 李高峰, 等. 2021. 大兴安岭南段毛登 Sn-Cu 矿床岩浆作用对成矿制约: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. *大地构造与成矿学*, 45(4): 681~704.
- 内蒙古地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋 彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(S1): 26~30.
- 王德滋, 周金城, 邱检生, 等. 2000. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩特征与成因[J]. *高校地质学报*, 6(4): 487~498.
- 王 硕, 王孝磊, 杜德宏. 2020. 火山岩-侵入岩的联系[J]. *高校地质学报*, 26(5): 497~505.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 217~1 238.
- 谢家莹, 陶奎元, 谢芳贵, 等. 1993. 碎斑熔岩相特征与相模式[J]. *火山地质与矿产*, 14(3): 1~6.
- 张 旗, 王 焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(9): 2 249~2 269.
- 张 舒, 张招崇, 艾 羽, 等. 2009. 安徽黄山花岗岩岩石学、矿物学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 24(1): 25~38.
- 张招崇, 李兆鼐, 王富宝, 等. 1994. 辽西义县盆地火山岩的基本特征及其成因探讨[J]. *现代地质*, 8(4): 441~451.
- 周 华, 邱检生, 喻思斌, 等. 2016. 西藏措勤地区火山岩的年代学与地球化学及其对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 90(11): 3 173~3 191.

附中文参考文献