



内蒙古赤峰早白垩世多斑流纹斑岩岩相学特征及成因

钟辉, 刘欣, 张渝金, 伍月

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 内蒙古赤峰双胜地区早白垩世多斑流纹斑岩, 发育气孔构造, 具多斑状结构, 斑晶含量高达 70%, 成分为透长石(30%)、石英(35%)及斜长石(5%)。斑晶透长石呈半自形宽板状且具有梳状反应边, 反应边成分为 Na-正长石, 反应边中含针柱状矿物雏晶。斑晶石英边缘或内部被强烈熔蚀, 并发育碎斑结构, 具有“裂而不离”或“离而不散”的特点, 碎斑石英之间被基质成分充填。岩石兼具熔岩及碎斑熔岩的双重结构。岩石中含气孔。岩石结构特征反映岩浆经历了绝热-减压快速上升过程, 可能指示成岩时期区域伸展构造背景的开始。

关键词: 早白垩世; 流纹斑岩; 多斑结构; 岩石成因; 内蒙古

PETROGRAPHY AND GENESIS OF THE EARLY CRETACEOUS DOSEMIC RHYOLITE PORPHYRY IN CHIFENG CITY, INNER MONGOLIA

ZHONG Hui, LIU Xin, ZHANG Yu-jin, WU Yue

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The Early Cretaceous dosemic rhyolite porphyry in Shuangsheng area of Chifeng, Inner Mongolia, is characterized by vesicular structure and multi-porphyrific texture, with 70% of phenocryst content, including sanidine (30%), quartz (35%) and plagioclase (5%). The sanidine phenocryst shows subhedral wide tabular structure with comb-like reaction rim, which is composed of Na-orthoclase and contains needle-columnar mineral crystallite. The edge or interior of the quartz phenocryst is strongly corroded, where porphyroclastic texture is developed, with the characteristics of “cracked or dispersed but not separated”. Matrix components are filled in between the quartz porphyroclasts. The rock contains vesicles, showing the dual structure of lava and porphyroclastic lava. The structure characteristics of the rock reflect a rapid uplift process with adiabatic-decompression of magma, probably indicating the beginning of regional extensional tectonic setting in diagenetic period.

Key words: Early Cretaceous; rhyolite porphyry; dosemic structure; petrogenesis; Inner Mongolia

0 序言

火成岩的研究经历了岩类学、实验岩石学至岩理

学(岩石成因)的进程^[1], 其研究的目的之一是揭示岩石的成因。岩类学是研究岩石成因的基础, 岩石的结

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-08-03. 编辑: 黄欣.

基金项目: 中国地质调查局项目“内蒙古 1:5 万老房身等五幅区域地质调查”(编号 DD20190039-06).

作者简介: 钟辉(1964—)女, 教授级高级工程师, 从事岩石矿物学研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 26 甲 3 号, E-mail//2418734955@qq.com

通信作者: 刘欣(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事岩石学、矿物学鉴定测试工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 26 甲 3 号, E-mail//306541493@qq.com

构造及矿物组合不仅是岩石分类命名的主要依据,也是分析岩石成因的重要物质基础. 火成岩的结构和构造记录了岩浆运移和冷凝过程中地质环境和物理化学条件的变化,为研究火成岩的形成和演化提供了最直接的依据^[2]. 大兴安岭发育中生代火山岩,尤其是早白垩世火山岩广泛分布,是大兴安岭中生代火山岩重要的组成部分. 关于早白垩世火山岩成因及形成的构造背景,已有的资料多从年代学及岩石地球化学方面进行探讨,认为其形成于伸展构造背景^[3-7],但从岩石组构特征等岩相学方面来研究讨论其岩浆活动及反映的构造背景方面鲜有报道. 内蒙古赤峰双胜地区也发育有大面积中生代火山岩,以往多据岩石组合划分为中—晚侏罗世,近年 1:5 万区域地质调查(中国地质调查局沈阳地质调查中心,李家园子等三幅,2019—2021年),在该地区解体出大量早白垩世火山岩,划分出以中性火山岩为主的龙江组(K_1l)、以酸性火山岩为主的光华组(K_1gh),其中侵入有多斑流纹斑岩;在流纹斑岩中获得 131 Ma(锆石 U-Pb, LA-ICP-MS)年龄. 本文通过对双胜地区多斑流纹斑岩的岩相学及结构构造特征的研究,分析探讨其可能的成因.

1 研究区地质背景

研究区位于内蒙古自治区赤峰市巴林右旗,在晚古生代增生造山带基底之上,发育中生代火山岩系,隶属于中生代大兴安岭火山岩带, NNE 向大庙—呼玛火山喷发带,阿鲁科尔沁—海拉苏火山喷发盆地(图 1a)^[8]. 火山盆地基底主要出露于火山盆地边缘,由晚古生代浅变质海相火山岩—陆源碎屑岩夹碳酸盐岩和陆相河—湖相碎屑沉积岩组成. 有的岩石经历了较强的变形作用. 火山盆地主要充填有中侏罗世中酸性火山碎屑岩夹碎屑岩及含煤沉积、晚侏罗世中基性—酸性火山熔岩及其相应的火山碎屑岩、早白垩世中—酸性火山熔岩及其碎屑岩. 研究区由于更新世—全新世冲—洪积及风积物的大面积掩盖,中生代地质体多呈“孤岛”状出露,岩石有早白垩世龙江组(K_1l)中性火山熔岩及火山碎屑岩,光华组(K_1gh)酸性火山熔岩、凝灰熔岩及凝灰岩、伴生的潜火山相流纹斑岩(图 1b).

2 多斑流纹斑岩的岩相学特征

本研究样品采自内蒙古赤峰市巴林右旗宝日勿苏东南约 12 km 毛瑞毛都嘎查附近,其岩性为多斑流纹

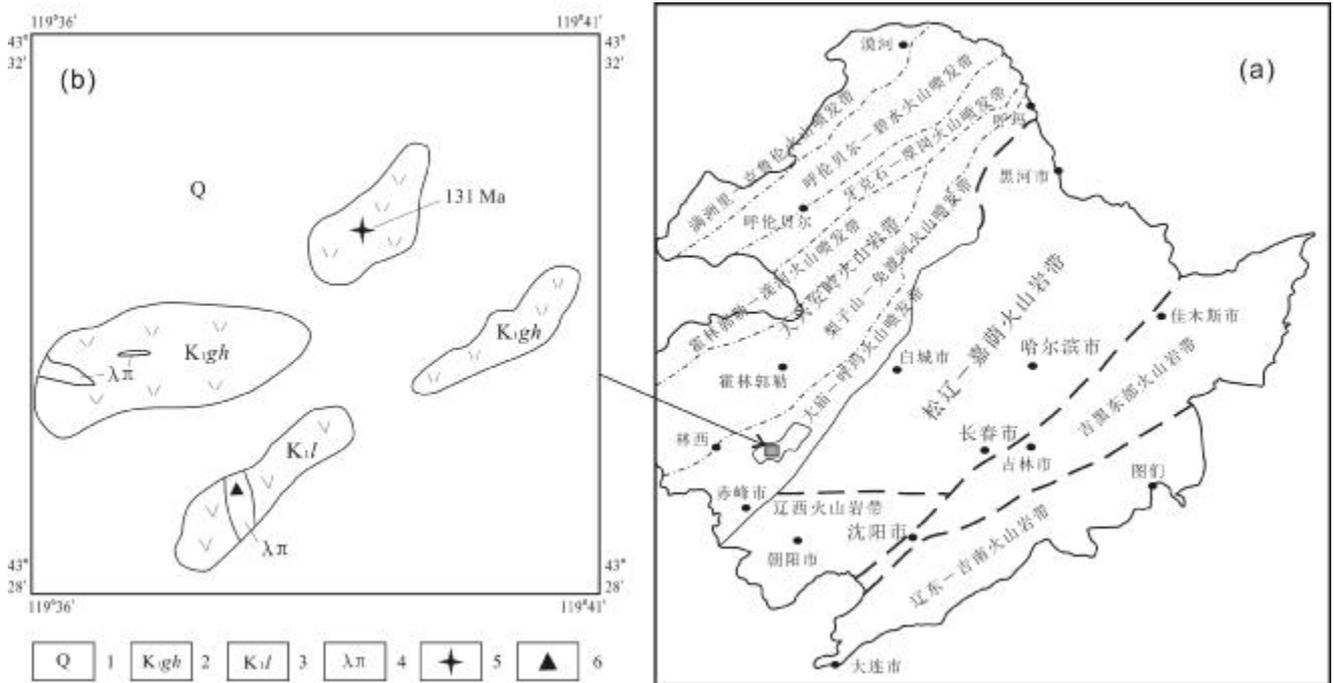


图 1 研究区构造位置及地质简图

Fig. 1 Tectonic location and geological sketch maps of the study area

1—第四系(Quaternary); 2—下白垩统光华组(Lower Cretaceous Guanghua fm.); 3—下白垩统龙江组(Lower Cretaceous Longjiang fm.); 4—流纹斑岩(rhyolite porphyry); 5—同位素年龄(isotopic age); 6—样品位置(sampling location)

斑岩,呈NNW走向的岩脉侵入于下白垩统龙江组安山质晶屑凝灰岩、安山岩之中(图2a).考虑临近大面积出露有早白垩世光华期(K_1gn)酸性火山岩及其中同样有潜火山岩相流纹斑岩伴生,研究样品应为早白垩世光华期(K_1gn)潜火山岩相产物.手标本上,岩石呈浅灰-浅肉红色调,多斑状结构,基质呈隐晶质结构,块状构造,局部具气孔状构造(图2b).气孔含量约5%,形态有圆形、椭圆形、舌形、葫芦形,少量为不规则状,分布无方向性,孔径介于0.5~3.0 mm.

斑晶含量多达70%,成分主要为石英(35%)及透长石(30%),少量斜长石(5%)(图3a).石英斑晶在手标本呈浅褐-淡茶色,显微镜下呈聚斑状或与透长石一起呈联斑状,以他形粒状为主,少量呈棱角状,粒径0.6~2.4 mm;大部分石英斑晶被熔蚀,边缘呈浑圆形、港湾状、波浪形,有的内部熔蚀形成鸟眼形孔洞并被后期生长的石英及基质充填(图3b);有的石英斑晶发育裂纹,裂纹无方向性,部分石英斑晶具“裂而不离”或“离而不散”特征,裂缝中充填长英质霏细状基质(图3c).斑晶透长石手标本呈灰白色,镜下见其粒径0.7~1.8 mm,多呈不规则柱状、板柱状及宽板状,边缘略显港湾状,发育较清晰的卡氏双晶,少量具有对角线双晶,也发育裂纹;有的见其边缘发育梳状正长石反应边(图3b),梳状正长石延长方向垂直透长石斑晶边缘生长,部分正长石为斑晶透长石的延续;少量透长石斑晶具有隐晶质环带状反应边(图3d),反应边内带暗褐色,外带淡黄褐色,外带中含无方向性分布的针柱状暗色矿物雏晶,雏晶长径0.02~0.1 mm.斑晶斜长石粒径

0.4~0.8 mm,呈半自形宽板状、板柱状,发育隐约显示的细密聚片双晶纹,并见斜长石被包含于透长石之中的现象.

基质含量30%,呈显微晶质结构,结构不均匀;大部分为霏细状、花瓣状长英质集合体;局部可见半自形长柱状、板柱状及宽板状正长石微晶,粒径介于0.1~0.3 mm;此外,还含有针状、针柱状暗色矿物雏晶,雏晶长径介于0.05~0.08 mm,无方向性.

3 矿物的化学成分特征

矿物成分测定在东北矿产资源监督检测中心进行,采用JXA-8100型电子探针.加速电压为15 kV,电流为10 nA,束斑直径为1 μ m,分别对多斑流纹斑岩中的透长石斑晶、透长石斑晶的梳状反应边、基质中的正长石成分进行了测试,并用Geokit软件,计算基本分子组成An-Ab-Or含量.分析及计算结果见表1.

利用透长石斑晶、透长石斑晶梳状反应边及基质中正长石的电子探针分析的化学成分,分别计算出其An、Ab、Or组分.投点到长石在Or-Ab-An体系中的成分和命名图中^[9]:透长石斑晶5个样品中有4个样品落入歪长石区域,另外一个点在钠长石与歪长石界线处;透长石斑晶的梳状反应边的5个样品全部落入Na-正长石区域;基质中的正长石成分主要落在Na-正长石区与歪长石成分区,有1个样品落入钠长石与更长石边界,表现出向钾含量增加方向演化的趋势(图4).斑晶透长石的 Na_2O 含量为7.57%~9.29%(平均8.26%), K_2O 含量为1.82%~6.63%(平均4.47%);透长

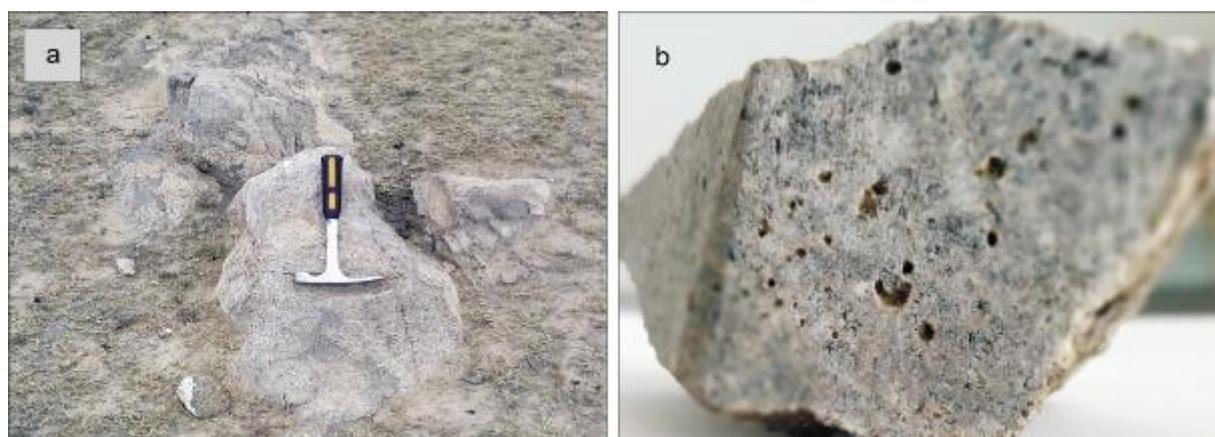


图2 早白垩世多斑流纹斑岩

Fig. 2 The Early Cretaceous dosemic rhyolite porphyry

a—岩石野外照片(field photograph); b—气孔构造(vesicular structure)

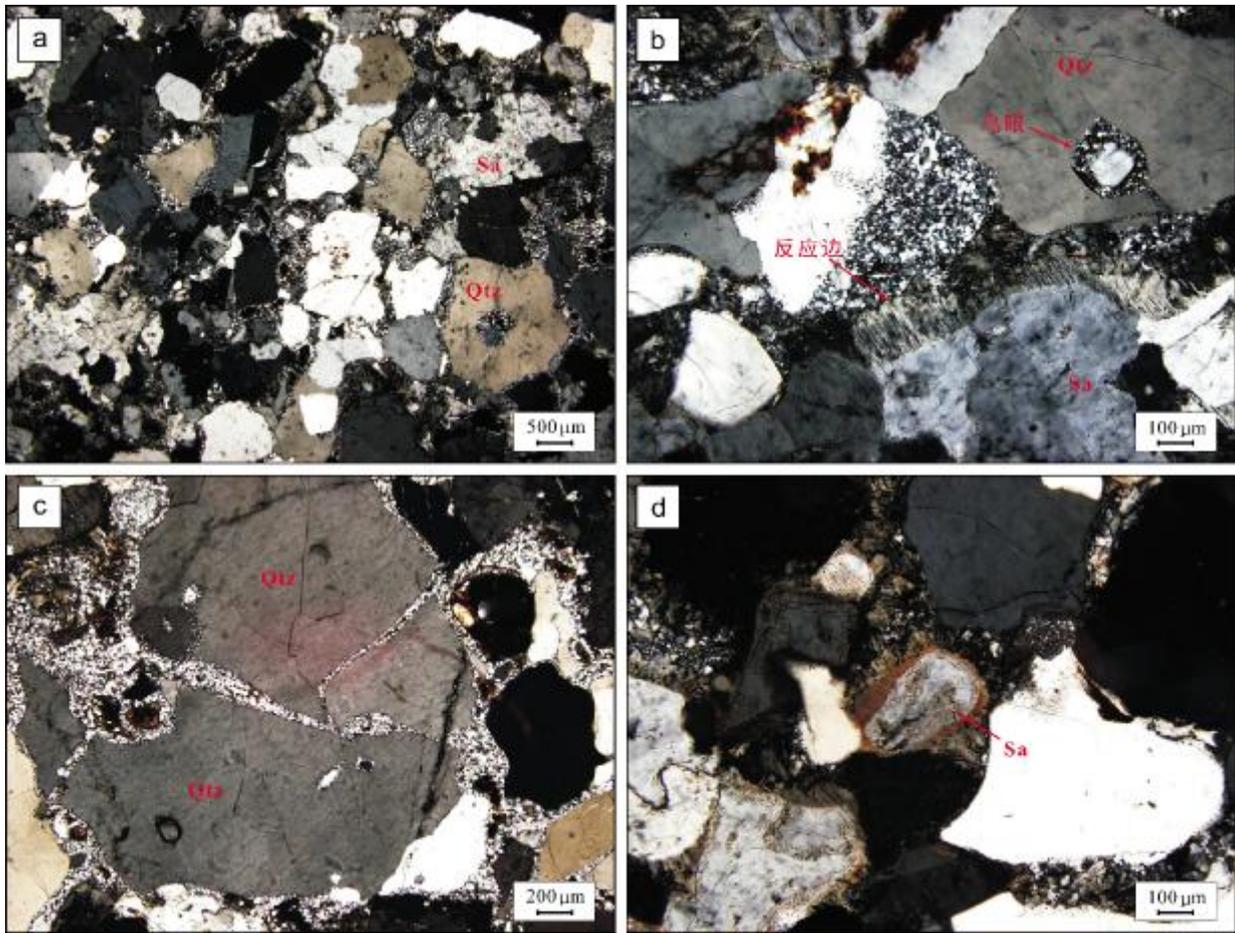


图3 多斑流纹斑岩显微结构

Fig. 3 Microscopic structures of dosemic rhyolite porphyry

a—多斑流纹斑岩斑晶与基质 (phenocryst and matrix); b—斑晶石英的鸟眼构造及透长石的梳状反应边 (bird's eye structure of quartz phenocryst and comb-like reaction rim of sanidine); c—斑晶石英的裂而不散及充填霏细状基质 (fragmentation of quartz phenocryst filled with felsitic matrix); d—透长石斑晶的环状反应边 (annular reaction rim of sanidine phenocryst); Sa—透长石 (sanidine); Qtz—石英 (quartz)

石斑晶梳状反应边的 Na_2O 含量为 4.27%~6.34% (平均 5.62%), K_2O 含量为 6.66%~9.58% (平均 8.11%); 基质中正长石的 Na_2O 含量为 4.54%~9.57%, (平均 7.57%) K_2O 含量为 1.57%~10.46% (平均 5.81%)。上述结果反映从斑晶透长石-基质正长石-梳状反应边长石, 具有 Na_2O 含量降低, 而 K_2O 含量升高的趋势。无论斑晶还是基质, 均显示为 K-Na 长石系列。

4 多斑流纹斑岩的成因探讨

岩浆岩结构构造特征是岩浆结晶物理化学条件的客观反映, 尤其是潜火山岩, 包括斑晶含量及其晶形变化特点、斑晶成分变化等。斑状结构常见于潜火山岩中, 斑晶含量与成核密度、晶体生长速度、岩浆的过冷度密切相关^[2,9]。在深部岩浆房缓慢的冷却条件下, 晶

体成核密度小, 在具有充分结晶时间保障条件下, 可形成大量自形斑晶^[9]。岩石中斑晶含量高达 70%, 说明岩浆形成后, 经历了斑晶低密度及长时间的结晶过程, 反映岩浆房有较长时间滞留于深部较稳定的物理化学状态下, 即相对稳定的地质构造背景。

岩石中长石及石英斑晶多具有熔蚀特征: 长石斑晶边缘呈港湾状; 石英斑晶边缘呈浑圆形、港湾状、波浪形, 有的内部熔蚀形成“鸟眼”形孔洞并被后期生长的石英及基质充填。这些特点说明岩浆房经历了升温过程, 造成早期结晶斑晶的熔蚀现象。岩浆房升温的出现可能主要有两种机制: 外部热(液)流注入加热作用引起的升温; 岩浆房减压作用引起的升温作用。对斑晶长石、基质中的长石、斑晶长石梳状反应边成分分析表明, 长石成分均为 K-Na 长石系列, 且有自斑晶长

表 1 透长石斑晶、梳状反应边及基质正长石电子探针数据及长石基本分子计算结果

Table 1 Electronic probe data of sanidine phenocryst, comb-like reaction rim and matrix orthoclase with calculation results of feldspar basic molecules

位置	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	K ₂ O	Total	Or(K)	Ab(Na)	An(Ca)
斑晶透长石	9.29	66.02	0.01	0.16	20.93	—	2.57	—	1.82	100.81	11.92	78.01	10.07
	7.83	67.03	0.01	0.23	18.55	0.02	0.80	0.08	6.63	101.16	3.49	61.97	34.54
	8.09	66.50	0.03	0.23	18.97	—	1.00	—	5.68	100.49	4.48	65.32	30.20
	8.54	66.23	0.01	0.90	20.09	0.12	1.85	—	2.38	100.14	9.20	76.71	14.09
	7.57	67.71	—	0.24	18.87	—	0.97	0.06	5.83	101.26	4.49	63.40	32.11
斑晶透长石梳状边缘	4.27	67.32	0.01	0.26	17.39	0.00	0.07	0.10	9.58	99.01	0.36	40.25	59.39
	5.85	67.47	0.02	0.32	17.35	0.02	0.32	—	7.59	98.95	1.61	53.10	45.28
	6.34	67.67	—	0.29	17.67	—	0.35	0.01	7.89	100.21	1.63	54.07	44.30
	6.13	69.47	0.04	0.22	17.02	—	0.32	0.05	6.66	99.90	1.66	57.34	41.00
	5.49	66.35	0.05	0.36	17.48	—	0.19	0.06	8.80	98.79	0.90	48.23	50.87
基质中正长石	9.57	66.94	0.03	0.24	19.54	—	1.42	—	3.15	100.89	6.33	76.98	16.69
	7.72	67.14	—	0.25	18.06	0.00	0.44	0.01	6.13	99.75	2.02	64.33	33.65
	6.87	66.70	—	0.20	17.99	—	0.39	—	7.75	99.89	1.75	56.38	41.87
	9.14	66.42	0.01	0.14	20.69	—	2.53	—	1.57	100.50	12.10	78.97	8.93
	4.54	67.35	0.03	0.24	17.46	0.01	0.36	—	10.46	100.44	1.69	39.06	59.24

测试单位:东北矿产资源监督检测中心.

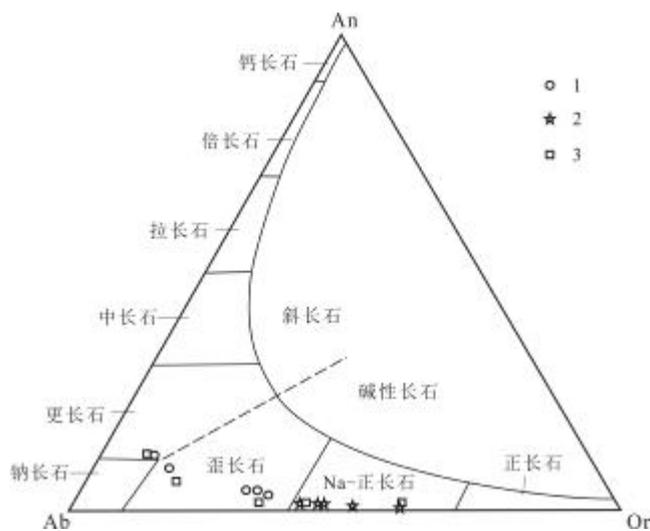


图 4 长石在 Or-Ab-An 体系中的成分和命名 (据文献[8])

Fig. 4 Compositions and nomenclatures of feldspar in Or-Ab-An system (After Reference [8])

1—透长石斑晶 (sanidine phenocryst); 2—斑晶梳状反应边 (comb-like reaction rim of phenocryst); 3—基质 (matrix)

石、基质长石至斑晶长石梳状反应边, Na₂O 含量降低, 而 K₂O 含量升高的特征, 反映了岩浆正常演化的特点, 这可以排除外部热(液)流注入的可能; 因此, 岩浆房温度升高应该与岩浆房减压作用引起的升温过程有关. 这种减压作用, 应该是岩浆(房)经历了较快速的上升运移过程.

研究样品中斑晶含量高达 70%. 流变学实验结果表明, 当岩浆中晶体含量达到约 50% 时, 岩浆体基本处于“冻结”状态, 不再具有整体迁移的能力^[10-12], 岩浆(房)要继续运移, 需要重新激活. 现有研究表明, 岩浆激活机制主要有两种观点: 1) 升温活化机制^[13-17]; 2) 流体活化机制^[18-20]. 研究区样品可能经历了减压过程, 伴随岩浆房减压, 岩浆在升温的同时, 岩浆体系中大量流体及气液释放从而激活了“冻结”状态岩浆房. 大量气孔的存在应是这一过程的反映.

伴随岩浆快速上升减压升温, 早期在深部相对低温条件下结晶的石英及长石, 遭受熔蚀^[21]. 石英斑晶出现“裂而不离, 离而不散”的“碎斑”结构特征, 也说明

岩浆经历了静压力迅速降低的过程. 由于静压力的迅速降低, 晶体体积迅速膨大而“炸裂”, 并沿裂隙充填“残余熔浆”. 由于压力快速降低, 熔浆中大量气体释放, 从而形成气孔构造及斑晶透长石边缘垂直生长着呈“梳状反应边”的正长石.

岩石具有高斑晶含量(70%)、斑晶熔蚀、“碎斑”结构、气孔构造、垂直透长石的“梳状反应边”的特征. 长石成分的变化为斑晶透长石—基质正长石—梳状反应边正长石, 具有 Na_2O 含量降低而 K_2O 含量升高的趋势, 反映了岩浆经历早期在深部较长时间的滞留后, 后期上升运移有逐步加快的特点. 同时, 反映研究区构造背景, 从早期相对稳定到后期快速伸展的过程.

本研究样品为侵位于早白垩世龙江期中性火山岩之中的流纹斑岩, 它是早白垩世光华期火山活动的潜火山岩; 临近研究样品的光华期流纹斑岩年龄为 131 Ma (锆石 U-Pb, LA-ICP-MS). 样品的岩石结构特点反映其形成于快速减压的构造背景, 这种减压过程应是区域伸展作用的表现, 说明在 130 Ma 时研究区进入了快速伸展时期, 这与大兴安岭地区发育该时期双峰式岩浆活动、松辽盆地开始大幅度断陷活动^[4, 22-26]相契合.

5 结论

多斑流纹斑岩斑晶含量高达 70%, 发育气孔构造、熔蚀结构、碎斑结构, 为兼具熔岩及碎斑熔岩结构特征的潜火山岩; 其结构特征反映岩浆经历了早期较长时间的深部滞留、后期快速绝热—减压上升的过程, 快速上升时期应为区域性伸展构造背景开始的反映.

本文资料主要来源于内蒙古 1:5 万李家园子幅等三幅区域地质调查项目, 项目组成员为研究提供了有力帮助, 匿名审稿专家为本文最终定稿提出有益的意见及建议, 在此一并致谢!

参考文献(References):

[1]常丽华, 曹林, 高福红. 火成岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
Chang L H, Cao L, Gao F H. Igneous rock identification manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)

[2]徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 124-127, 295-305, 51-53.

Xu X S, Qiu J S. Igneous petrology[M]. Beijing: Science Press, 2010: 124-127, 295-305, 51-53.

[3]邵济安, 张履桥, 牟保磊. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 339-346.
Shao J A, Zhang L Q, Mu B L. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 339-346.

[4]刘阁, 吕新彪, 陈超, 等. 大兴安岭嫩江地区中生代双峰式火山岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(3): 458-470.
Liu G, Lü X B, Chen C, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic bimodal volcanic rocks from Nenjiang area in Da Hinggan Mountains and their tectonic implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(3): 458-470.

[5]郝彬, 宋江, 李朝柱, 等. 赤峰地区晚中生代火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1261-1274.
Hao B, Song J, Li C Z, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the late Mesozoic volcanic rocks in Chifeng area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(6): 1261-1274.

[6]王阳, 徐仲元, 刘正宏, 等. 大兴安岭温布其地区白音高老组火山岩的形成机制[J]. 世界地质, 2017, 36(3): 714-725.
Wang Y, Xu Z Y, Liu Z H, et al. Formation mechanism of Baiyingaolao volcanic rocks in Wenbuqi area of Da Hinggan Mountains[J]. Global Geology, 2017, 36(3): 714-725.

[7]李伟, 江斌, 刘森, 等. 内蒙古赤峰山湾子金矿流体包裹体和年代学研究[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 394-405.
Li W, Jiang B, Liu M, et al. A study of the fluid inclusions and chronology of the Shanwanzi gold deposit in Chifeng, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2020, 47(2): 394-405.

[8]付俊彧, 朱群, 杨雅军, 等. 中华人民共和国地质图(东北)(1:1 500 000)及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2019.
Fu J Y, Zhu Q, Yang Y J, et al. Geological map of the People's Republic of China (Northeast) (1:1 500 000) and specification[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019. (in Chinese)

[9]Swanson S E. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures[J]. American Mineralogist, 1977, 62(9/10): 966-978.

[10]Caricchi L, Burlini L, Ulmer P, et al. Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 264(3/4): 402-419.

[11]Petford N, Koenders M A. Shear-induced pressure changes and seepage phenomena in a deforming porous layer: I [J]. Geophysical Journal International, 2003, 155(3): 857-869.

[12]刘璐璐, 苏尚国, 侯建光, 等. 河北武安坦岭多斑斜长斑岩的成因: 冻结岩浆房活化机制[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 204-220.
Liu L L, Su S G, Hou J G, et al. Genesis of Tanling plagioporphyry

- in Wuan, Hebei: The remobilizing mechanism of frozen magma chambers[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 204–220.
- [13] Couch S, Sparks R S J, Carroll M R. Mineral disequilibrium in lavas explained by convective self-mixing in open magma chambers [J]. *Nature*, 2001, 411(6841): 1037–1039.
- [14] Bachmann O, Bergantz G W. Gas percolation in upper-crustal silicic crystal mushes as a mechanism for upward heat advection and rejuvenation of near-solidus magma bodies[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 149(1/2): 85–102.
- [15] Mashima H. The basalt-high magnesium andesite association formed by multi-stage partial melting of a heterogeneous source mantle: Evidence from Hirado-Seto, Northwest Kyushu, Southwest Japan [J]. *Lithos*, 2009, 112(3/4): 351–366.
- [16] Burgisser A, Bergantz G W. A rapid mechanism to remobilize and homogenize highly crystalline magma bodies [J]. *Nature*, 2011, 471(7337): 212–215.
- [17] Huber C, Bachmann O, Dufek J. Thermo-mechanical reactivation of locked crystal mushes: Melting-induced internal fracturing and assimilation processes in magmas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 443–454.
- [18] 罗照华, 卢欣祥, 许俊玉, 等. 成矿侵入体的岩石学标志 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2247–2254.
Luo Z H, Lu X X, Xu J Y, et al. Petrographic indicators of the ore-bearing intrusions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2247–2254.
- [19] Parmigiani A, Huber C, Bachmann O. Mush microphysics and the reactivation of crystal-rich magma reservoirs [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(8): 6308–6322.
- [20] 程黎鹿. 峨眉山大火成岩省的岩浆运移、滞留、演化过程的岩石学和数值模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 1–161.
Cheng L L. Petrologic and numerical modeling study of magma transfer, storage and evolution in Emeishan large igneous province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014: 1–161.
- [21] Johannes W, Holtz F. *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- [22] 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(2): 172–178.
Ge W C, Lin Q, Sun D Y, et al. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(2): 172–178.
- [23] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, 2000, 16(2): 169–173.
Wang Y, Qian Q, Liu L, et al. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(2): 169–173.
- [24] 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 161–168.
Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. Petrogenesis of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 161–168.
- [25] 葛文春, 李献华, 林强, 等. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义 [J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 176–183.
Ge W C, Li X H, Lin Q, et al. Geochemistry of early cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxing'anling and its tectonic implications [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 176–183.
- [26] 林强, 葛文春, 曹林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2003, 32(3): 208–222.
Lin Q, Ge W C, Cao L, et al. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic rocks [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3): 208–222.