

大兴安岭北段十五里桥地区早白垩世火山岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义

王久懿^{1,2,3}, 顾萌⁴, 周传芳^{1,2,3*}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;

2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;

3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086;

4. 黑龙江省农垦科学院, 哈尔滨 150038)

摘要:大兴安岭北段广泛发育早白垩世火山岩,其构造环境一直以来备受争议。文章对大兴安岭北段十五里桥一带光华组流纹岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学开展研究,约束其岩石成因和构造背景。该地区光华组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 129.3 ± 1.4 Ma(早白垩世晚期),属过铝质、亚碱性系列火山岩。岩石轻重稀土分馏显著,具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征,并具有明显铈的负异常;Rb/Sr、Nb/Ta、Th/U 和 Nb/Th 比值指示岩石具有壳源特征;碱度率(AR)、锆石饱和温度、高 Zr、10000Ga/Al 和亏损 Ba、Sr、Ti 显示具有 A 型花岗岩特征;光华组火山岩富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K,亏损高场强元素(HFSE)Ta、Nb、Ti、P,以及在 Rb-(Nb+Y)和 Rb-(Ta+Yb)判别图分布特征,均显示岩石具有岛弧火山岩地球化学特征。综合分析认为,该地区火山岩是地壳部分熔融产物,形成于伊泽奈岐板块向东亚大陆后退式俯冲后的伸展环境。

关键词:锆石 U-Pb 年龄;地球化学;构造背景;光华组;大兴安岭

中图分类号:P597

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0065-14

0 引言

大兴安岭是中国东部滨太平洋构造-岩浆-成矿带的重要组成部分,特殊的构造背景和成矿条件导致中生代火山活动形成了大量矿产资源,使得大兴安岭成为环太平洋构造域备受关注的热点地区^[1]。前人对该地区火山岩开展了大量的地层学、年代学、岩石地球化学和大地构造背景等方面研究,形成了较为统一的认识:大兴安岭中生代以来经历了古太平洋和蒙古-鄂霍茨克洋两种构造体系作用的叠加和改造^[2],构造-岩浆活动主要发生在 174~110 Ma,即中侏罗世至早白垩世时期,形成大量陆相火山-沉积岩和侵入岩,分布在大兴安岭主脊及两侧^[1,3]。形成

于早白垩世的光华组流纹质火山岩主要分布于大兴安岭北段东坡,主脊零星出露,前人对此开展了一定程度研究,并积累了丰富的锆石 U-Pb 年代学数据^[4]。目前主要分歧在于对构造背景的认识,即:光华组形成于古太平洋板块向西俯冲的伸展环境^[5],还是蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展环境^[4]。本文以大兴安岭北部十五里桥地区光华组为研究对象,准确分析其上下地层关系,并开展锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,分析岩石成因,进而分析早白垩世大兴安岭的构造背景。

1 地质背景

大兴安岭在元古宙-古生代时期处于西伯

利亚克拉通南缘增生与华北克拉通北缘陆缘增生对接的多岛弧盆系演化阶段^[6],形成了以地块之间拼合碰撞为主体的造山体系。中生代以来,受古亚洲洋构造域影响,并叠加了蒙古-鄂霍茨克洋和滨太平洋构造域的作用,该地区发生了大量构造-岩浆活动并伴有盆地沉积作用^[7]。中生代时期的火山岩主要呈 NE 和 NNE 向分布,从基性到酸性火山岩均有不同程度产出,火山岩地层主要有塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组、梅勒图组、龙江组、光华组、甘河组等。火山活动伴随 3 期盆地沉积作用,包

括:早-中侏罗世断陷盆地中的红旗组和万宝组煤系地层,以及新民组和七林河组含煤火山沉积岩系^[3];晚侏罗世漠河前陆盆地的漠河组、二十二站组、绣峰组河湖相岩系^[8];早白垩世具磨拉石建造的木瑞组和九峰山组含煤断陷盆地沉积。大兴安岭中生代构造活动强烈,形成了大量 NNE 向、NE 向区域性断裂构造,其中 NE 向断裂主要分布在大兴安岭西北部,NNE 向断裂主要在东南部展布,这些构造多沿火山喷发带和火山盆地边界分布,是蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系控制作用的产物^[9]。中生代大兴安岭

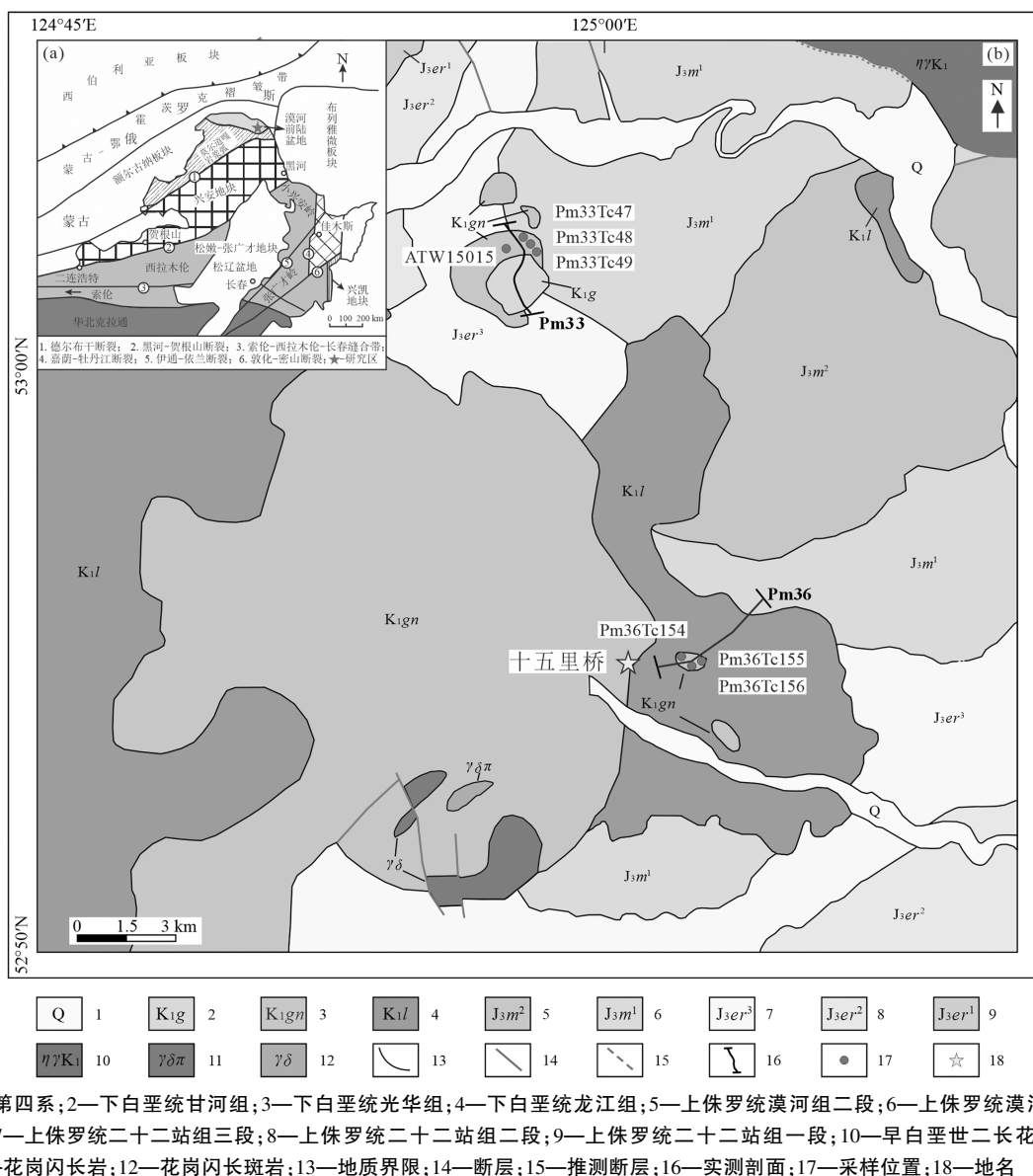


图1 东北及邻区大地构造图(a)及研究区地质简图(b)

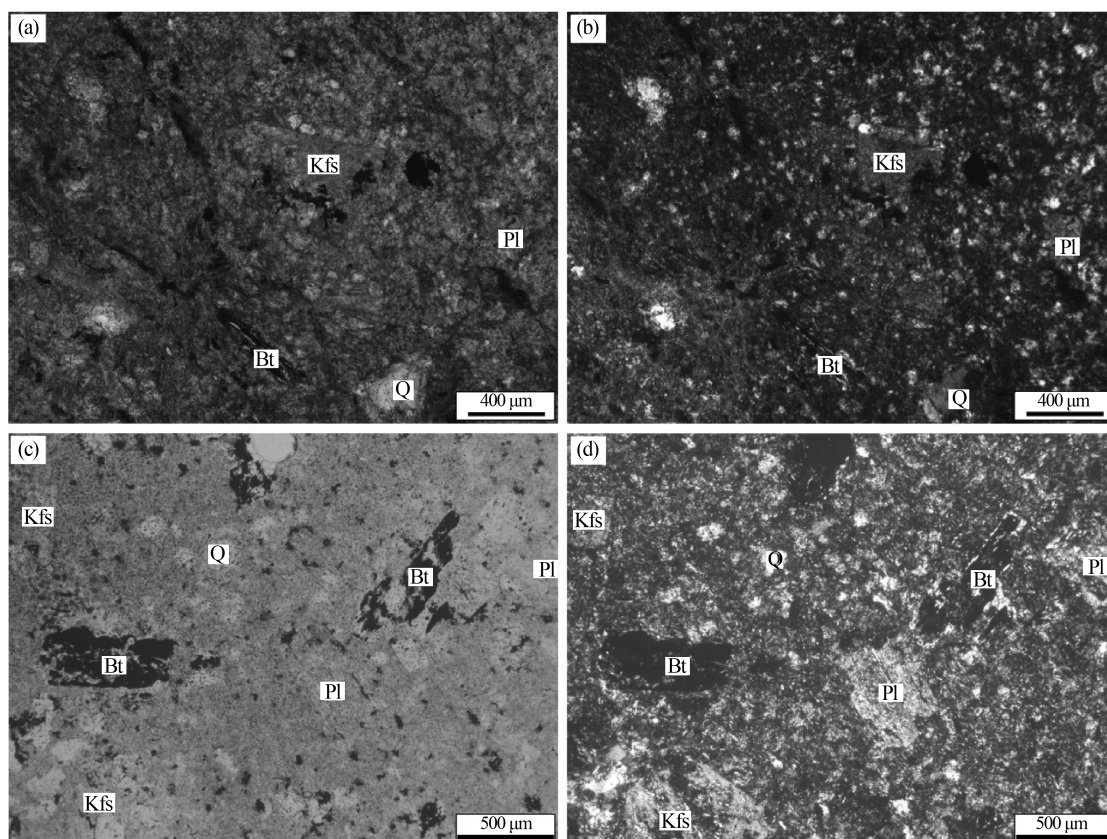
(审图号:GS(2024)0650号)

侵入活动也十分强烈,侵入岩多与火山岩共生、同源,且具有相同的构造背景^[1]。

研究区十五里桥位于塔河县依西肯乡一带,大地构造上隶属于大兴安岭北部、额尔古纳地块内漠河前陆盆地的东北部;东侧与布列雅微板块相接,南接莫尔道嘎岩浆弧,北邻蒙古-鄂霍茨克褶皱带(图 1a)。区内出露 3 套早白垩世火山岩地层和 2 套晚侏罗统碎屑沉积岩地层(图 1b):早白垩世火山岩地层有甘河组(K_1g)、光华组(K_1gn)和龙江组(K_1l);晚侏罗世碎屑沉积岩地层有漠河组(J_3m)和二十二站组(J_3er)。区内构造发育不显著,仅少量 NE 向和 NNW 次级断裂分布在北部和南部。在研究区南部和东北部见少量岩浆侵入体,岩性主要为早白垩世二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩。

本次研究的光华组位于研究区西南部十五里桥地区,为一套酸性火山岩夹沉积岩组合,喷发不整合覆盖于龙江组之上,被甘河组喷发不整

合覆盖。控制剖面为上侏罗统漠河组一段、下白垩统光华组、甘河组实测剖面 (PM33, PM36)。岩性以灰色、灰白色流纹岩、流纹质凝灰岩为主,含沉积夹层,并伴有不同程度的碳酸盐化、绢云母化、绿帘石化。光华组流纹岩岩相学特征如下(图 2):岩石多呈浅灰色、灰黄色、浅乳黄灰色,具斑状结构,流纹构造。斑晶成分主要为斜长石、钾长石、黑云母、石英。斜长石呈自形-半自形板状,粒径 0.2~2.0mm,含量 5%~15%;钾长石呈自形-半自形板状,粒径 0.3~1.5mm,含量 5%~10%;石英呈次圆状,少数港湾状,粒径 0.2~2mm,含量 5%~10%;黑云母呈半自形片状,粒径 0.2~1.0mm,含量 3%~5%。基质为隐晶的长英质组成,副矿物为磁铁矿、褐铁矿等。本文研究的光华组流纹岩样品产自 1:5 万十五里桥幅 (PM33:塔河县下鱼亮子南,PM36:塔河县十五里桥北 544.3 高地),其中锆石 U-Pb 年龄样品 1 件,岩石地球化学样品 6 件,采样位置见图 1。



Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母

图 2 光华组流纹岩显微照片

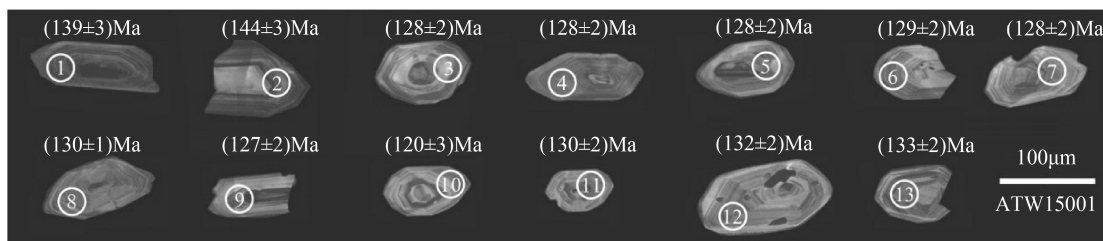


图 3 光华组流纹岩锆石阴极发光 (CL) 图像及年龄

2 分析测试方法

锆石挑选和制靶工作在河北省区域地质矿产调查研究所进行, 锆石阴极发光照相和微区原位 U-Pb 定年工作在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成。依据锆石形态和自形程度选择晶形较为完好的锆石开展制靶、阴极发光照相和定年工作。外部锆石年龄标准为 TEMORA, 计算 Pb、U 和 Th 含量的外标采用 NIST612 玻璃标样。普通 Pb 校正通过 ComPb-Corr^{#3.17} 完成, 谐和图绘制和年龄计算通过 Isoplot 程序完成, 数据处理采用 ICP MS Data Cal 程序。

地球化学样品在河北省区域地质矿产调查研究所进行主量元素和微量元素分析测试。采用玻璃熔片 XRF 法开展主量元素分析, 分析仪器为 AxiosX 射线荧光光谱仪测定, 分析偏差优

于 2%; 微量元素分析采用 Thermo Fisher Scientific 公司的 XSeries II 型等离子体质谱仪 (ICP-MS), 分析误差优于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

碎屑锆石 U-Pb 同位素数据见表 1。样品 ATW15015 中锆石均呈半自形-自形的柱状、长柱状结构, 长度变化 50~130µm, 宽度变化 30~70µm, 长宽比介于 1:1~4:1, CL 影像下锆石均具有典型的震荡环带 (图 3)。所有锆石 Th/U 均 > 0.1 (0.37~0.66, 表 1), 具备岩浆锆石典型特征。计算加权年龄时剔除 3 个年龄偏移较大的点 (1, 2, 10), 10 个数据点的分析结果位于 U-Pb 谐和线上及其附近 (图 4), 加权平均年龄为 129.3±1.4 Ma (MSWD = 1.3, n = 10), 为光华组流纹岩成岩年龄。

表 1 大兴安岭光华组流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

测点号	Th/U 比值	含量/10 ⁻⁶					同位素比值					年龄/Ma				
		Pb	U	Th	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ		
ATW15015-01	0.39	26	1 182	466	0.021 8	0.000 4	0.148 5	0.005 2	0.049 5	0.001 7	139	3	141	5		
ATW15015-02	0.66	15	598	396	0.022 5	0.000 5	0.151 4	0.010 0	0.048 8	0.003 1	144	3	143	9		
ATW15015-03	0.48	4	209	101	0.020 1	0.000 3	0.150 5	0.007 3	0.054 4	0.002 8	128	2	142	7		
ATW15015-04	0.38	8	391	148	0.020 0	0.000 3	0.140 8	0.007 7	0.051 1	0.002 9	128	2	134	7		
ATW15015-05	0.46	10	472	217	0.020 0	0.000 2	0.164 4	0.007 3	0.059 7	0.002 8	128	2	155	7		
ATW15015-06	0.59	8	386	227	0.020 3	0.000 3	0.134 5	0.007 3	0.048 1	0.002 6	129	2	128	7		
ATW15015-07	0.53	9	408	217	0.020 0	0.000 3	0.143 0	0.007 7	0.051 8	0.002 7	128	2	136	7		
ATW15015-08	0.38	8	378	143	0.020 4	0.000 2	0.150 7	0.006 6	0.053 7	0.002 4	130	1	143	6		
ATW15015-09	0.59	8	377	221	0.019 9	0.000 3	0.141 5	0.006 5	0.051 6	0.002 3	127	2	134	6		
ATW15015-10	0.47	5	237	113	0.018 8	0.000 5	0.157 0	0.015 8	0.060 6	0.006 8	120	3	148	15		
ATW15015-11	0.43	10	461	197	0.020 4	0.000 2	0.152 8	0.006 5	0.054 2	0.002 4	130	2	144	6		
ATW15015-12	0.37	9	443	165	0.020 7	0.000 3	0.148 2	0.005 2	0.051 9	0.002 0	132	2	140	5		
ATW15015-13	0.39	9	422	163	0.020 8	0.000 3	0.166 7	0.008 6	0.058 0	0.003 2	133	2	157	8		

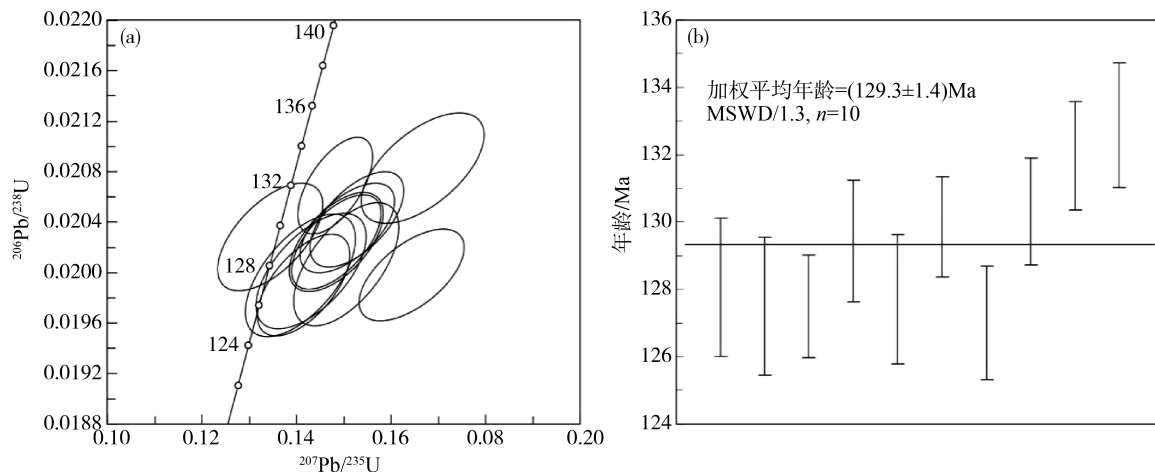


图 4 光华组流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄图(a)和加权平均年龄(b)

3.2 岩石地球化学

3.2.1 主量元素

6 件光华组流纹岩样品主量元素分析结果见表 2。结果显示： SiO_2 含量为 70.15% ~ 77.68%，高铝 (Al_2O_3 含量 12.11% ~ 14.44%)，高全碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.19\% \sim 7.95\%$ ，且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.72 \sim 2.37$)、高钾 ($\text{K}_2\text{O} = 3.48\% \sim 5.14\%$)，贫镁 ($\text{MgO} = 0.12\% \sim 1.17\%$)，

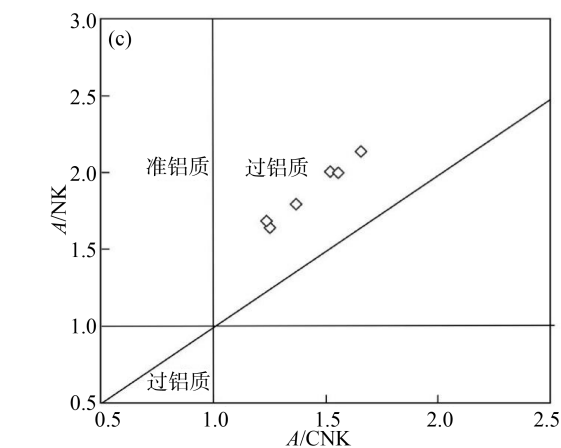
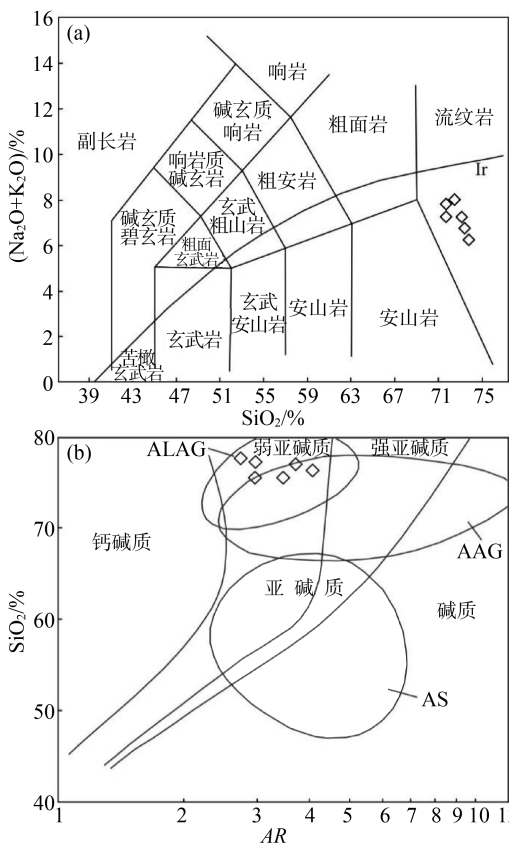


图 5 光华组流纹岩 TAS 图解(a)、 SiO_2 -AR 图解(b)和 A/NK - A/CNK 图解(c) Ir-Irvine 分界线(上方为碱性,下方为亚碱性)



低钙 (0.11% ~ 1.71%) 和 TiO_2 (0.05% ~ 0.54%)。铝饱和指数 A/CNK 介于 1.24 ~ 1.66 之间,平均 1.43,属过铝质岩石。样品点在 TAS 图解上(图 5a)全部落在亚碱性流纹岩区域,在 SiO_2 -AR 图解上(图 5b)全部落在弱亚碱性区域,在 A/NK - A/CNK 图解(图 5c)中全部落入过铝质区域。在 Harker 图解(图 6)上,光华组流纹岩的 SiO_2 与大多数主量元素有较好的相关性,与 TFeO 呈正相关,与 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 呈负相关,与 CaO 和 MgO 无明显相关性。

3.2.2 微量元素

6 件光华组流纹岩微量元素和稀土元素测试结果见表 2。稀土元素结果显示:样品稀土总

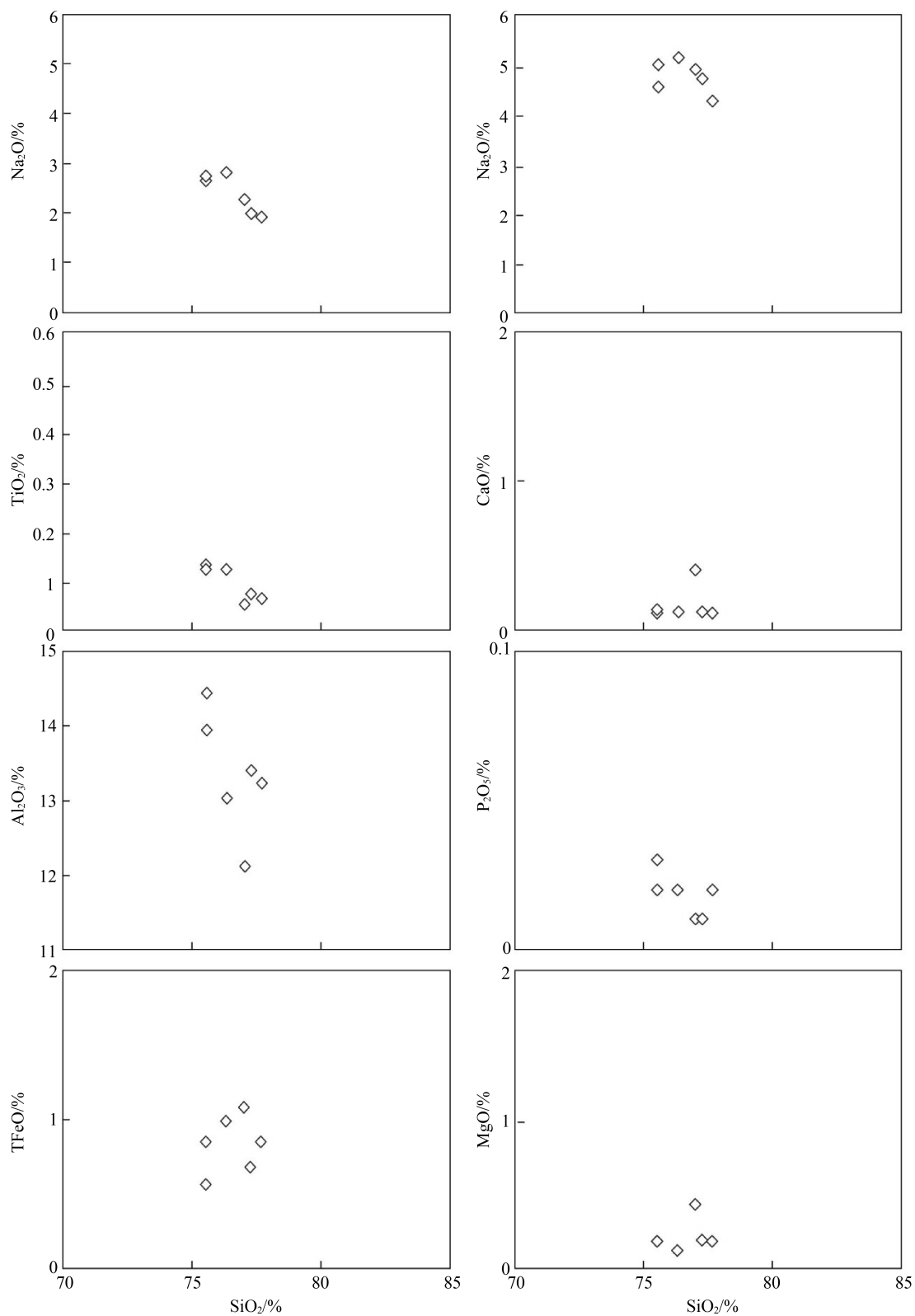


图 6 光华组流纹岩 Harker 图解

量较低, $\Sigma \text{REE} = (84.9 \sim 207.48) \times 10^{-6}$ (平均 151.42×10^{-6}), 重稀土总量为 $\Sigma \text{HREE} = (6.46 \sim 15.62) \times 10^{-6}$, 轻稀土总量为 $\Sigma \text{LREE} = (76.73 \sim 191.86) \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 9.40 \sim 17.25$ (平均 13.20)。稀土元素球粒陨石标准化图解(图 7a)显示, 样品的变化趋势一致, 表现为轻稀土富集(右倾)的特征和典型海鸥型稀土配分样式。轻重稀土元素分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11.68 \sim 29.53$ (平均 19.08), 指示光华组流纹岩形成过程发生较强轻重稀土元素分馏。轻稀土元素分馏系数 $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.86 \sim 5.49$ (平均 5.05) 和重稀土元素分馏系数 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.72 \sim 3.57$ (平均 2.43) 指示在轻重稀土元素内部也存在一定程度的分馏。 $\delta \text{Eu} = 0.14 \sim 0.38$ (平均 0.24), 具有明显铕的负异常。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图(图 7(b))显示富集高场强元素

(HFSE) Th、U 和大离子亲石元素(LILE) Rb、K, 亏损高场强元素(HFSE) Ta、Nb、Ti、P 和大离子亲石元素(LILE) Ba、Sr。

4 讨论

4.1 岩石成因

具有碱性(alkaline)、缺水(anhydrous)、非造山(anorogenic)三“A”特征的 A 型花岗岩被提出已有 40 余年^[10], 其形成于板内伸展环境或造山后地壳伸展减薄环境已被广泛验证^[11], 后被细分为与上地幔热柱、裂谷有关的 A₁ 型(非造山环境; AA 亚型)和与大陆边缘地壳伸展或陆内剪切作用有关的 A₂ 型(后造山拉张环境; PA 亚型)。A₂ 型花岗岩又分为铝质花岗岩(ALAG)和碱性花岗岩(AAG), 前者为弱过铝质、亚碱质岩石, 后者为准铝质、碱质-亚碱质岩石。

表 2 大兴安岭光华组流纹岩岩石地球化学分析结果

样品号	Pm36Tc155a	Pm36Tc155b	Pm36Tc153	Pm33Tc49	Pm33Tc48	Pm33Tc47
	流纹岩					
SiO ₂	75.55	76.34	75.54	77.02	77.68	77.28
Al ₂ O ₃	14.44	13.02	13.93	12.11	13.22	13.39
TiO ₂	0.13	0.12	0.12	0.05	0.06	0.07
Fe ₂ O ₃	0.49	1.01	0.74	1.11	0.84	0.22
FeO	0.12	0.08	0.18	0.08	0.09	0.48
CaO	0.11	0.12	0.13	0.40	0.11	0.12
MgO	0.18	0.12	0.18	0.43	0.18	0.19
K ₂ O	4.55	5.14	5.00	4.92	4.28	4.71
Na ₂ O	2.65	2.81	2.75	2.27	1.91	1.99
MnO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
LOI	1.71	1.17	1.34	1.54	1.52	1.48
TOTAL	99.96	99.95	99.94	99.95	99.94	99.94
A/CNK	1.52	1.25	1.37	1.24	1.66	1.56
A/NK	2.01	1.64	1.80	1.68	2.14	2.00
AR	2.96	4.06	3.46	3.70	2.73	2.97
F	366.22	279.73	683.25	231.91	269.22	516.32
Cl	68.4	79.7	26.2	50.7	42.5	21.3

续表

样品号	Pm36Tc155a	Pm36Tc155b	Pm36Tc153	Pm33Tc49	Pm33Tc48	Pm33Tc47
	流纹岩					
Rb	131.29	147.90	159.60	179.89	114.31	124.11
Sr	48.58	57.93	53.82	48.11	89.70	60.48
Zr	190.06	198.11	217.89	89.41	122.20	117.16
Nb	17.68	17.98	16.54	14.34	12.84	12.56
Ba	218.88	204.41	209.70	201.29	251.72	235.38
Hf	6.92	7.16	7.25	3.64	4.27	4.21
Ta	1.22	1.25	1.23	1.23	1.14	1.17
Th	21.37	23.14	19.31	18.35	17.06	16.95
U	6.52	7.02	3.90	2.83	6.32	3.37
Ga	16.92	16.46	18.35	16.15	15.29	14.87
Y	22.37	22.50	19.74	11.99	7.16	7.14
La	47.51	44.94	44.96	19.19	26.47	25.97
Ce	89.71	80.09	85.78	33.17	55.88	51.36
Pr	11.19	10.45	9.69	4.64	6.00	5.92
Nd	37.25	34.22	34.08	16.27	19.64	19.29
Sm	5.90	5.61	5.57	3.21	3.11	3.11
Eu	0.30	0.25	0.25	0.24	0.37	0.35
Gd	5.23	4.87	5.13	2.67	2.78	2.72
Tb	0.72	0.69	0.68	0.40	0.33	0.34
Dy	3.79	3.71	3.62	2.07	1.49	1.53
Ho	0.70	0.71	0.66	0.37	0.25	0.26
Er	2.16	2.19	1.98	1.10	0.75	0.75
Tm	0.35	0.35	0.30	0.17	0.11	0.11
Yb	2.32	2.34	1.92	1.18	0.64	0.67
Lu	0.35	0.37	0.32	0.20	0.10	0.11
δEu	0.16	0.14	0.14	0.25	0.38	0.36
δCe	0.92	0.87	0.96	0.83	1.04	0.98
ΣREE	207.48	190.80	194.92	84.90	117.93	112.47
ΣLREE	191.86	175.56	180.33	76.73	111.47	106.00
ΣHREE	15.62	15.24	14.60	8.16	6.46	6.47
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	14.68	13.79	16.79	11.68	29.53	27.99
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	5.20	5.17	5.21	3.86	5.49	5.39
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.86	1.72	2.20	1.87	3.57	3.37

注:主量元素单位为%;微量元素单位为 10^{-6}

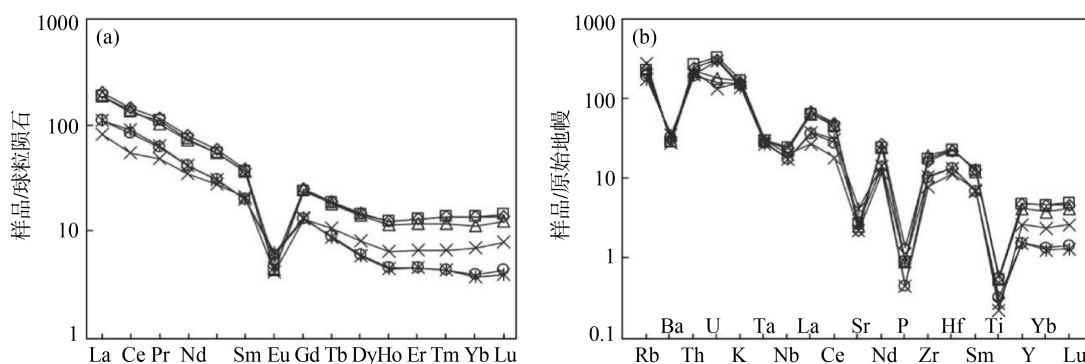


图 7 光华组流纹岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

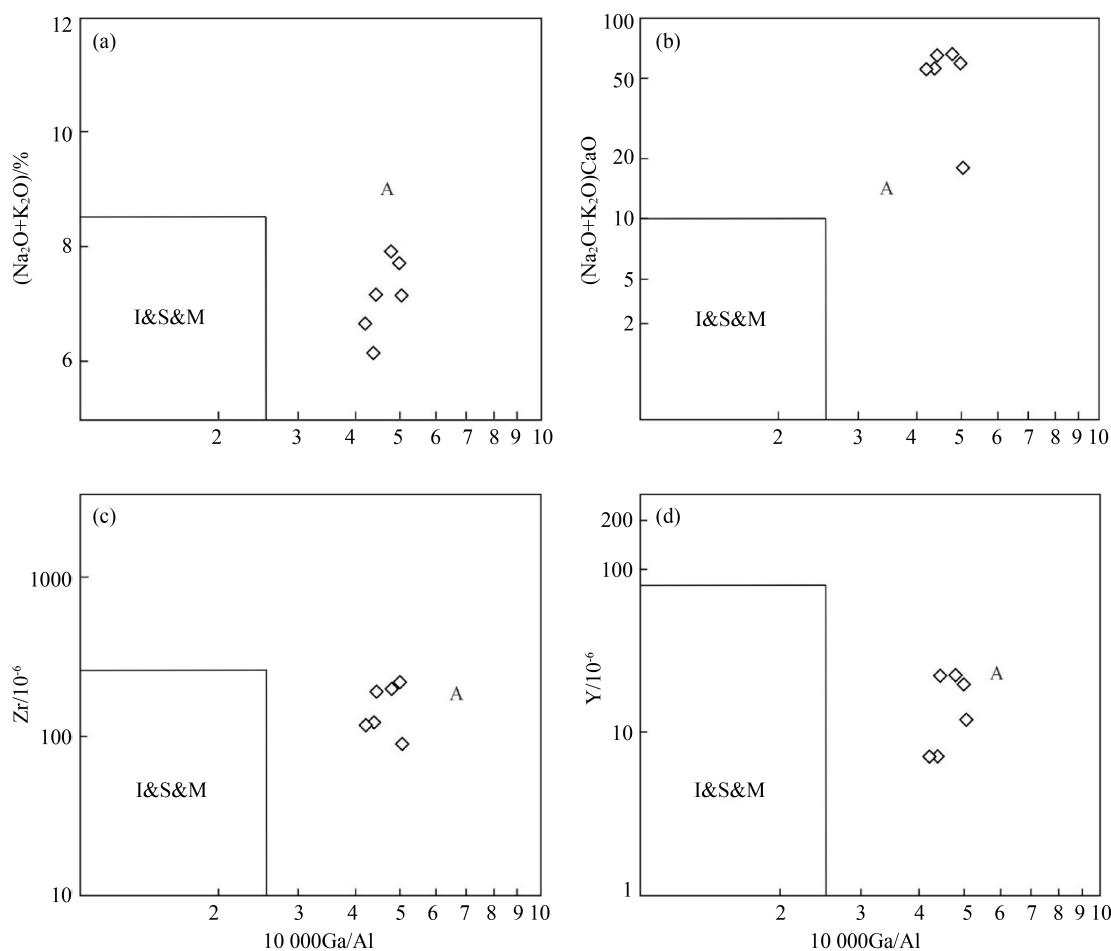
研究区光华组流纹岩如下属性表现出 A 型花岗岩特征:①流纹岩的矿物组合以石英、长石为主,含少量黑云母,无碱性暗色矿物,岩石具高硅、富碱、低钙、贫镁特征,且 $A/CNK > 1$, 总体符合 Whalen 等^[12]关于碱性和偏碱性花岗岩的划界限;②岩石稀土元素配分曲线呈轻稀土略富集、重稀土较为平坦的缓向右倾、铕负异常的典型“海鸥型”(图 7),与吉黑张广才岭地区典型 A 型花岗岩稀土特征相似^[13];③样品 F 含量 ($231.91 \sim 683.25 \times 10^{-6}$ 平均 391.11×10^{-6}), Cl 含量 ($21.30 \sim 79.70 \times 10^{-6}$ 平均 48.13×10^{-6}), $F/Cl = 3.51 \sim 26.08$, 以及哈克图解上 $SiO_2 - Al_2O_3$ 和 $SiO_2 - Na_2O$ (图 6) 均呈负相关;④样品在 $10\ 000Ga/Al - (Na_2O + K_2O)$ 、 $10\ 000Ga/Al - (Na_2O + K_2O)/CaO$ 、 $10\ 000Ga/Al - Zr$ 、 $10\ 000Ga/Al - Y$ 图解(图 8)上均落入 A 型花岗岩区。

基于以下证据进一步分析得出光华组流纹岩属 A 型花岗岩 A_2 亚型:①样品 $10^4Ga/Al > 2.6$, 范围为 $4.20 \sim 5.04$ (平均 4.63), 属 A_2 型花岗岩范围^[14];②轻稀土部分分馏明显 ($(La/Sm)_N = 3.86 \sim 5.49$, 平均 5.05), 具有 A_2 亚型铝质花岗岩 (ALAG) 特征^[14];③碱度率 (AR) 为 $2.73 \sim 4.06$ (平均 3.31), 具有 A_2 亚型 ALAG 特征^[15], 在图 5b 中样品点全落在弱亚碱质区域和典型铝质花岗岩 (ALAG) 中;④因锆石是最早结晶的副矿物, 并常被铁镁矿物和长英质矿物包裹, 故用锆石饱和温度^[15] 近似代表 A 型岩套岩浆近液相温度^[16], 计算得出光华组流纹岩锆石饱和温度 $759 \sim 845^\circ C$, 具有 A_2 亚型 ALAG 岩石

温度范围。

目前关于碱性长英质岩石的成因认识主要有:①幔源岩浆和深熔壳源岩浆的混合交代;②碱性岩浆的分离结晶;③富 F、Cl 麻粒岩高温部分熔融;④挥发组分作用下的下地壳岩石部分熔融。早白垩世时期大兴安岭造山带侵入岩和火山岩主要为闪长质和花岗质^[1], 在研究区和相邻地区同样没有同时代铁镁质岩石的地质记录, 且十五里桥地区光华组流纹岩富 Si 及贫 Ca、Mg, 仅有壳幔混合作用不可能形成富硅的 A_2 型花岗岩, 故排除是幔源岩浆分离结晶和与深熔壳源岩浆混合交代作用的可能。此外, 岩石高 Si、贫 Ca、贫 Mg 和强烈 Eu 的负异常与麻粒岩高温部分熔融的成因作用不符^[4]。

十五里桥地区各光华组流纹岩样品具有相似的主微量及稀土元素地球化学特征, 这暗示它们具有相同的岩浆源。样品中 SiO_2/Al_2O_3 ($5.23 \sim 6.36$)、 K_2O/Na_2O ($1.72 \sim 2.37$)、 K/Rb ($0.02 \sim 0.03$) 比值变化较小, 暗示成岩后受后期流体和热事件的影响较小^[17]。岩石 SiO_2 含量高且变化范围小, 具有低 FeO、低 MgO 以及明显 Ba、P、Sr、Eu、及 Ti 负异常特征, 指示长英质成分源岩在低压下发生部分熔融, 其中斜长石、磷灰石及 Ti、Fe 氧化物在源岩中残留^[4]。如下证据表明光华组流纹岩源于地壳 (主要为下地壳):①上文已证明十五里桥地区光华组流纹岩为 A_2 亚型的铝质 A 型花岗岩 (ALAG), 铝质 A 型花岗岩岩浆来自长英质地壳部分熔融, 而非幔源镁铁质岩浆分异^[16];②岩石富 K_2O 和 Al_2O_3 的特征表明



I-I 型花岗岩; S-S 型花岗岩; M-M 型花岗岩; A-A 型花岗岩

图 8 光华组流纹岩 10000 * Ga/Al 与 Na₂O+K₂O(a)、(Na₂O+K₂O)/CaO(b)、Zr(c) 和 Y(d) 图解

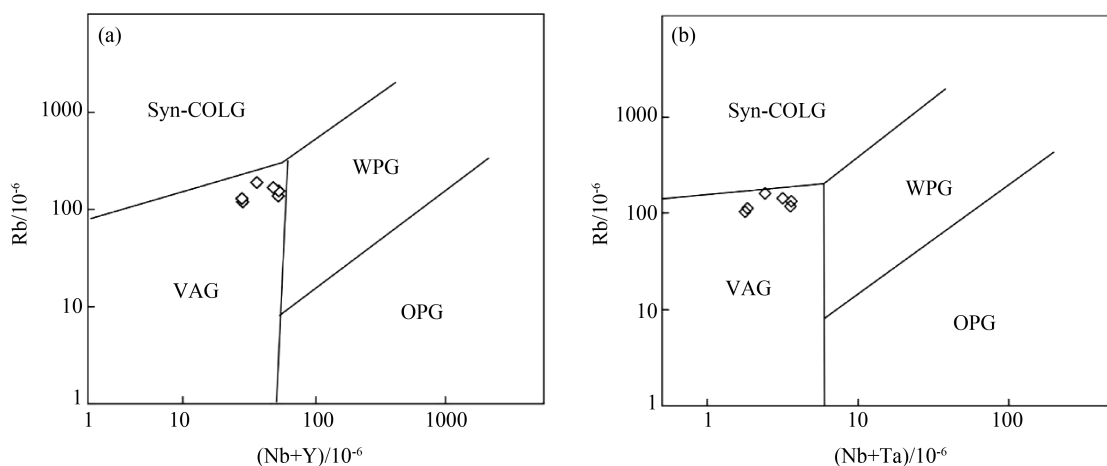
岩石成因与地壳有关,其最可能的岩浆源区物质为中-下地壳富 K₂O、贫水的玄武质岩石^[18]; ③样品 Rb/Sr = 1.27 ~ 3.74 (平均 2.55) 与壳源岩浆范围 (>0.5) 一致^[19], 且 Th/U = 2.70 ~ 6.48 (平均 4.29)、La/Ta = 15.60 ~ 38.94 (平均 28.74), 与地壳平均 Th/U 值 (4.3)、La/Ta 值 (29) 接近^[20], 主体更接近下地壳比值; ④Nb/Ta 可作为指示壳-幔体系地球化学作用的指标^[21], 球粒陨石和原始地幔的 Nb/Ta 为 17.5 ± 2.0, 大陆地壳平均为 12.4。光华组 Nb/Ta 范围 10.74 ~ 14.49 (平均 12.66), 说明陆壳参与融合或混染, 且源区物质受地壳组分影响较大, 这可能是源区位于下部地壳内, 在熔融过程中钙角闪石作为难熔相, 使熔体 Nb/Ta 下降和熔体铝过饱和度增高。综合以上考虑, 本文认为十五里桥地区光华

组流纹岩是下地壳部分熔融产物, 具壳源岩浆高硅、富碱、贫钙镁的特征, 并在上升过程中经历了分离结晶作用。

4.2 构造环境

蒙古-鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板块俯冲深刻影响着中生代大兴安岭火山岩的形成和分布, 但主导早白垩世光华组火山岩形成的是古太平洋板块俯冲^[5], 还是蒙古-鄂霍茨克洋闭合^[4]一直存在不同争议。从岩石成因类型、形成时代、空间分布 3 个角度探讨光华组流纹岩构造背景。

已证实十五里桥光华组流纹岩为 A 型花岗岩, 属 A₂ 亚型铝质花岗岩 (ALAG)。A₂ 亚型花岗岩形成于后造山伸展阶段、产于大陆边缘地壳



ORG—大洋中脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩

图9 光华组流纹岩 Rb-(Nb+Y) (a) 和 Rb-(Ta+Yb) (b) 构造判别图解

伸展环境或与陆内剪切作用有关的拉张环境已得到广泛共识^[14]。此外,样品点在 Rb-(Nb+Y) 判别图(图 9a) 和 Rb-(Yb+Ta) 判别图(图 9b) 中全部落入火山弧范围内。以上证据表明研究区光华组火山岩形成于活动大陆边缘有关的岛弧环境。锆石 U-Pb 定年结果 $129.3 \pm 1.4\text{Ma}$ 既符合蒙古-鄂霍茨克洋中晚侏罗世至早白垩世剪刀式自西向东闭合的时间范围^[22], 也支持伊泽奈岐板块在早白垩期间(145~100Ma)由南到北作用于中国大陆东缘的观点,故应从火山岩空间分布上进一步思考。在整个侏罗纪时期,大兴安岭产出的侏罗纪火山岩均呈 NE 向展布,构造线与蒙古-鄂霍茨克构造带方向一致,期间伴有反映伸展构造背景的 A 型花岗岩、断陷盆地(如红旗组、万宝组和新民组)产生,反应大兴安岭侏罗纪火山岩主要产于蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的弧后伸展背景^[3]。但在早白垩世发育的大量火山岩呈 NNE 向展布,此构造线与古太平洋构造带近平行,并具有板块俯冲特征钙碱性火山岩和少量钾玄岩,暗示此时期可能存在古太平洋板块西向俯冲^[23]。早白垩世早期(145~130Ma)火山岩 NNE 向空间展布不同于中晚侏罗世火山岩的 NE 向展布,指示在晚侏罗世—早白垩世早期发生两个构造域转换^[1]。法拉隆板块、伊泽奈岐板块和库拉板块是古太平洋板块重要组成部分^[24],大量研究成果表明:伊泽奈岐板

块从 145Ma 开始,向北或北西向斜向俯冲于东亚大陆之下^[25]。大兴安岭 134~126Ma 的火山岩出露最多,指示该时期大兴安岭遭受构造运动和火山活动最强^[1],此时期伊泽奈岐板块也是运动最快、斜向俯冲作用最强(30 cm/a 高速北北西向运动)^[26]。自早白垩世早期至晚期,大兴安岭火山岩总体上显示由西向东迁移的时空分布特征,响应了伊泽奈岐板块在此时期后退式西向俯冲作用,二者具有很好的同步性^[1]。

综上所述认为,大兴安岭北部十五里桥地区光华组流纹岩形成于古太平洋板块中伊泽奈岐板块西向后退式俯冲后的伸展环境。

5 结论

通过对大兴安岭北段十五里桥地区光华组火山岩的年代学和岩石地球化学研究,可以得到以下结论:

- (1) 十五里桥地区光华组流纹岩成岩年龄为 $129.3 \pm 1.4\text{Ma}$, 指示其形成于早白垩世晚期。
- (2) 十五里桥地区光华组流纹岩属 A_2 亚型中的 ALAG 型,是下地壳岩石部分熔融的产物。
- (3) 十五里桥地区光华组火山岩形成于伊泽奈岐板块西向后退式俯冲后的伸展环境。

参考文献(References):

- [1] 杨晓平,江斌,杨雅军. 大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3237

- 3251.
- [2] 崔玉斌, 王凯, 何付兵, 等. 大兴安岭北段奇力滨地区玛尼吐组火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3301-3316.
- [3] 杨雅军, 杨晓平, 江斌, 等. 大兴安岭中生代火山岩地层时空分布与蒙古—鄂霍茨克洋、古太平洋板块俯冲作用响应[J]. 地学前缘, 2022, 29(02): 115-131.
- [4] 张超, 吴新伟, 张渝金, 等. 大兴安岭北段龙江盆地光华组碱流岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(09): 1531-1541.
- [5] 姜云鹏. 内蒙古呼伦贝尔北部中生代火山岩地层的划分及其成因机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [6] 张克信, 何卫红, 徐亚东, 等, 肖庆辉, 潘桂棠. 中国洋板块地层分布及构造演化[J]. 地学前缘, 2016, 23(06): 24-30.
- [7] 王志强, 李娟, 王丽娟, 等. 兴安地块南段哈达地区中晚侏罗世侵入岩成因及对蒙古—鄂霍茨克洋演化的制约[J]. 华东地质, 2023, 44(04): 386-401.
- [8] 和政军, 李锦轶, 莫中国, 等. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(12): 1219-1226.
- [9] 杨晓平, 杨雅军, 庞雪娇. 大兴安岭区域地质调查片区总结与服务产品开发成果报告(大兴安岭地区区域地质志) [R]. 沈阳: 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 2019.
- [10] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granite[J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1979, 11: 468.
- [11] 张旗, 冉皞, 李承东. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(04): 621-626.
- [12] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407-419.
- [13] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地学前缘, 2005, 12(02): 263-275.
- [14] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类, 判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 2003, 9(04): 573-591.
- [15] Wright J B. A Simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite genesis [J]. Geological Magazine, 1969, 106: 370-384.
- [16] King P, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 371-391.
- [17] Wang C L, Huang H, Tong X X, et al. Changing provenance of late Neoproterozoic metasedimentary rocks in the Anshan-Benxi area, north China craton: Implications for the tectonic setting of the world-class Dataigou banded iron formation [J]. Gondwana Research, 2016, 40: 107-123.
- [18] 韩振哲, 赵海玲, 王盘喜, 等. 黑龙江伊春地区晚三叠世—早侏罗世铝质 A 型正长—碱长花岗岩地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(02): 97-108.
- [19] Tischendorf G, Paelchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden[J]. Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften, 1985, 13(05): 615-627.
- [20] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry[M]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003: 1-64.
- [21] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 347-359.
- [22] Guo Z X, Yang Y T, Ziyabrev S, et al. Tectonostratigraphic evolution of the Mohe-upper Amur basin reflects the final closure of the Mongol-Okhotsk ocean in the latest Jurassic-earliest Cretaceous[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 145: 494-511.
- [23] Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of Ne Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251(1-2): 179-198.
- [24] Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. Island Arc, 2012, 6(01): 121-142.
- [25] Muller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. Ocean basin

evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44(01): 107-138.

- [26] 杨海斌, 田小波, 白志明, 等. 浅谈中国大陆东缘中生代地质演化与泛太平洋板块活动的关系 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(03): 781-797.

作者简介:

第一作者:王久懿,1993年生,男,黑龙江伊春人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,工程师,主要研究方向为区域地质矿产调查。Email: jywangcugb@163.com;

通讯作者:周传芳,1985年生,男,黑龙江兰西人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,正高级工程师,主要研究方向为区域地质矿产调查。Email: 546011015@qq.com

U–Pb Chronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Shiwuliqiao Area, Northern Greater Khingan Mountains

WANG Jiuyi^{1,2,3}, GU Meng⁴, ZHOU Chuanfang^{1,2,3*}

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China;

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources

Harbin 150086, China;

4. Heilongjiang Farms & Reclamation Academy of Sciences, Harbin 150038, China)

Abstract: The tectonic environment of the early Cretaceous volcanic rocks widely developed in the northern Greater Khingan Mountains. The zircon U–Pb chronology and petrogeochemistry of Guanghua rhyolite in the Shiwuliqiao area of the northern Greater Khingan Mountains are researched to constrain its petrogenesis and tectonic setting. The LA–ICP–MS zircon U–Pb weighted average age of Guanghua Formation rhyolite is 129.3 ± 1.4 Ma (late early Cretaceous), belonging to peraluminous, subalkaline series volcanic rocks. The fractionation of light and heavy rare earth elements in the rocks is significant, with the characteristics of light rare earth elements enrichment, heavy rare earth elements deficit, and an obvious negative europium anomaly; The ratios of Rb/Sr, Nb/Ta, Th/U and Nb/Th indicate that the rocks derived from crustal; Alkalinity ratio (*AR*), zircon saturation temperature, high Zr content and 10 000Ga/Al ratio, with depleted Ba, Sr, Ti indicates that the rocks have A–type granite characteristics; The volcanic rocks of Guanghua Formation are rich in LILE (such as Rb and K), depleted in HFSE (such as Ta, Nb, Ti and P), and the distribution characteristics in Rb–(Nb+Y) and Rb–(Ta+Yb) discrimination maps show that the rocks have the geochemical characteristics of island arc volcanic rocks. Comprehensive analysis shows that the volcanic rocks in this area are the product of partial melting of the crust, formed in the extensional environment after the backward subduction of the Izenaki Plate to the East Asian continent.

Key words: zircon U–Pb dating; geochemistry; tectonic setting; Guanghua Formation; Greater Khingan Mountains