

doi: 10.12097/gbc.2021.12.042

辽东地区赛马碱性杂岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其对构造背景的制约

杨凤超, 宋运红*, 胥嘉, 顾玉超, 杨宏智

YANG Fengchao, SONG Yunhong*, XU Jia, GU Yuchao, YANG Hongzhi

中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China

摘要: 通过 LA-ICP-MS 测得辽宁赛马地区浅肉红色霞霓正长岩中的锆石 U-Pb 年龄为 225.8 ± 1.9 Ma, 赛马碱性杂岩的侵位时代为晚三叠世。地球化学分析表明, 霞霓正长岩 SiO_2 含量为 55.87%~60.88%, Na_2O 为 0.41%~5.32%, Al_2O_3 为 17.81%~19.53%, K_2O 为 9.46%~11.91%, MgO 为 0.46%~1.36%, 里特曼指数为 7.54~17.01; 稀土元素总量较高, 高于 300×10^{-6} , 强烈富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值大于 10, 个别达到 100 以上; 亏损 Nb、Ta、P 等高场强元素, 富集 Rb、Th 等大离子亲石元素, 总体表现出富碱性岩石特征。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -13.37~-9.30, 对应的两阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 2102~1855 Ma。通过岩石成因分析和构造环境判别, 赛马碱性杂岩可能形成于由俯冲挤压向陆内伸展、拉张转换的动力背景下的下地壳 (或上地幔) 部分熔融。赛马碱性杂岩侵位时代 (225.8 ± 1.9 Ma) 可能代表了华北克拉通北缘岩石圈开始伸展减薄的时间, 也是郑庐断裂形成的时间。

关键词: LA-ICP-MS U-Pb 年龄; Hf 同位素组成; 晚三叠世; 赛马碱性杂岩; 辽东地区

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)01-0076-10

Yang F C, Song Y H, Xu J, Gu Y C, Yang H Z. Zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and their constraints on tectonic setting of the Saima alkaling complex in the eastern Liaoning Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 76-85

Abstract: The light-red aegirine nepheline syenite in Liaoning Saima area has a LA-ICP-MS U-Pb age of 225.8 ± 1.9 Ma, and the emplacement age of the Saima alkaline complex is the Late Triassic. Aegirine nepheline syenite shows SiO_2 of 55.87%~60.88%, Na_2O of 0.41%~5.32%, Al_2O_3 of 17.81%~19.53%, K_2O of 9.46%~11.91%, MgO of 0.46%~1.36%, σ_{43} of 7.54~17.01. The total amount of rare earth elements is higher than 300×10^{-6} , and it is strongly enriched with light rare earth elements. Depletion of high field strength elements such as Nb, Ta, P, and enrichment of large ion lithophilic elements such as Rb, Th, shows the characteristics of alkaline rich rocks. The zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is -13.37~-9.30, the corresponding two-stage Hf model age T_{DM2} is 2102~1855 Ma. The Saima alkaline complex may be formed by the partial melting of the lower crust (or upper mantle) under the dynamic background of subduction-squeezing to inland extension and extension conversion. The age of emplacement (225.8 ± 1.9 Ma) may represent the time when the lithosphere began to stretch and thin on the northern margin of the North China Craton, and also the time when the Tanlu fault was formed.

Key words: LA-ICP-MS U-Pb age; Hf isotope composition; Late Triassic; Saima alkaline complex; eastern Liaoning Province

碱性岩是地壳中分布较少、产出环境独特的一种岩石类型(任康绪, 2003)。碱性岩形成于岩石圈

拉张环境, 主要源于上地幔(阎国翰等, 2002; 郭斌等, 2020)。碱性岩具有地幔来源物质的稀有、微量

收稿日期: 2021-12-31; 修订日期: 2022-12-09

资助项目: 中国地质调查局项目《东北地区铜金稀有金属战略性矿产资源调查》(编号: DD20230028)和《辽宁甜水幅(K51E019015)、草河口幅(K51E019016)深部矿产地质调查》(编号: DD20190156-1)

作者简介: 杨凤超 (1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事矿产地质调查及研究工作。E-mail: yangfc123@163.com

* 通信作者: 宋运红 (1983-), 女, 硕士, 正高级工程师, 从事土地质量地球化学调查及研究工作。E-mail: yunhong408@163.com

元素组成(赵振华, 1994), 因此对碱性岩的研究是探索地球深部特征的重要途径(阎国翰等, 2002)。辽东赛马地区发育碱性杂岩, 在草绿色霓霞正长岩中及部分暗褐色霓霞正长岩中产有铌, 表明赛马碱性杂岩与铌矿化关系密切, 该类矿床除岩浆结晶作用外, 还存在热液阶段铌钽成矿现象(Huang et al., 2002; Wang et al., 2004; Zhu et al., 2015, 2018; Xie et al., 2016, 2018; 罗晨皓等, 2019), 而碱性花岗岩型铌钽矿床是中国最主要的碱性岩型铌钽矿床(李建康等, 2019)。关于赛马碱性杂岩的年龄, 前人进行了大量测年研究, 测得的 K-Ar 年龄介于 110~236 Ma 之间, 去掉霞石等非标准矿物的 K-Ar 年龄后, 黑云母的 K-Ar 年龄平均为 230 Ma; 20 世纪 70 年代, 锆石 U-Pb 年龄介于 170~240 Ma 之间, Rb-Sr 等时线年龄为 219 Ma(景立珍等, 1995)。霓霞正长岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 222 Ma 左右(钟军等, 2020)。相关学者还对凤城赛马铌矿床成矿岩体的地球化学特征(鞠楠等, 2019)及稀土矿化机制(邬斌等, 2020)进行了研究, 但是没有对赛马碱性杂岩的年龄、岩石地球化学特征及 Hf 同位素进行综合对比研究, 也缺乏岩石成因及特点的探讨。本次对辽东地区赛马碱性杂岩的岩石学、年代学和岩石地球化学的系统研究, 可以为中生代岩石圈的研究和郯庐断裂构造演化提供证据, 同时为碱性岩浆的成岩成矿作用研究提供一定依据。

1 地质特征

赛马碱性杂岩分布于辽宁丹东市赛马地区, 呈岩株状产出, 东西长 30~35 km, 南北宽 10~15 km(图 1), 面积逾 100 km²。赛马碱性杂岩处于华北陆块北部, 岩石类型复杂, 主要为霓霞正长岩、云霞正长岩、白霞正长岩、霓辉正长岩等。岩石颜色呈肉红色, 中粗粒—中粒结构, 局部见大的长石斑晶, 块状构造。侵入辽河群、青白口系及奥陶系, 被侏罗系整合覆盖。辽河群岩性主要为二云片岩, 夹变粒岩、变质砂岩, 局部夹大理岩, 分布在研究区西部和东南角; 青白口系以灰白色中粒长石石英砂岩、硅质胶结石英砂岩、灰紫色钙质泥岩及砂质页岩为主; 奥陶系主要为灰色微薄层白云质灰岩及灰色巨厚层含燧石结核白云质灰岩, 零星分布在研究区北部; 侏罗系大面积分布于研究区中部, 为一套火山-沉积建造, 主要为灰色凝灰质砂岩、灰紫色含砾凝灰岩、灰绿色页岩夹粉砂质泥岩、灰紫色长石石英砂岩等(图 1)。

2 样品特征及分析方法

2.1 岩相学特点

TW03 和 TW04 两个样品取自赛马碱性杂岩的主岩体上, 其位置分别为北纬 40°57'56"、东经 124°16'15"和北纬 40°58'50"、东经 124°18'36"。TW03-YQ1~TW03-YQ5 为与样品 TW03 同一位置的 5 个不同样品, TW04-YQ1~TW04-YQ5 为与样品 TW04 同一位置的 5 个不同样品。样品为新鲜的浅肉红色中细粒霓霞正长岩, 中细粒结构, 块状构造, 主要由正长石和特征矿物霞石、霓石组成(图 2-a)。

岩相学特征如下: 主要由板柱状正长石、柱粒状霞石和长柱状、柱粒状碱性暗色矿物霓石矿物构成。其中正长石呈板柱状, 自形程度较差, 负低突起, 干涉色灰白, 轻微次生变化、糙面, 无双晶, 粒度≤1.2 mm×3.8 mm, 偶见大颗粒, 达 5.2 mm×9.0 mm, 含量大于 50%; 霞石呈柱粒状, 钙霞石化强烈、糙面显著, 但平行消光可显示, 粒度≤1.2 mm×1.6 mm, 含量约 10%; 霓石呈鲜艳绿色, 具角闪石式多色性, 长柱状或柱粒状, 常见菱形切面, 平行消光或对称消光, 粒度≤0.5 mm×3.6 mm, 含量大于 35%(图 2-b、c)。

2.2 锆石 U-Pb 同位素测试

定年样品采自辽宁赛马地区新鲜浅肉红色霓霞正长岩(TW04), 挑选代表性的锆石制靶。锆石的 U、Th 和 Pb 同位素组成分析在武汉上谱分析科技有限责任公司进行。在 LA-ICP-MS U-Pb 分析前, 进行了透射光、背散射电子图像(BSE)及阴极发光(CL)分析。仪器为安捷伦电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900), 相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统(GeoLas HD)。用标准玻璃样品 NIST610 校正待测锆石 U 元素含量, 标准锆石样品 91500 和 GJ-1 分别用于校正待测锆石同位素分馏和监控仪器状态。激光能量 80 mJ, 频率 5 Hz, 激光束斑直径 32 μm。具体分析条件及流程详见 Liu et al.(2008)。

2.3 主量、微量元素测试

主量、微量元素测试样品为新鲜的浅肉红色霓霞正长岩。测试工作在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成。主量元素测试仪器为飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪, 分析精度优于 5%。微量元素测试仪器为 HR-ICPMS(Element 1)电感耦合等离子体质谱测试, 分析精度: 含量大于 10×10⁻⁶, 精度优于 5%; 含量小于 10×10⁻⁶, 精度优于 10%(杨凤

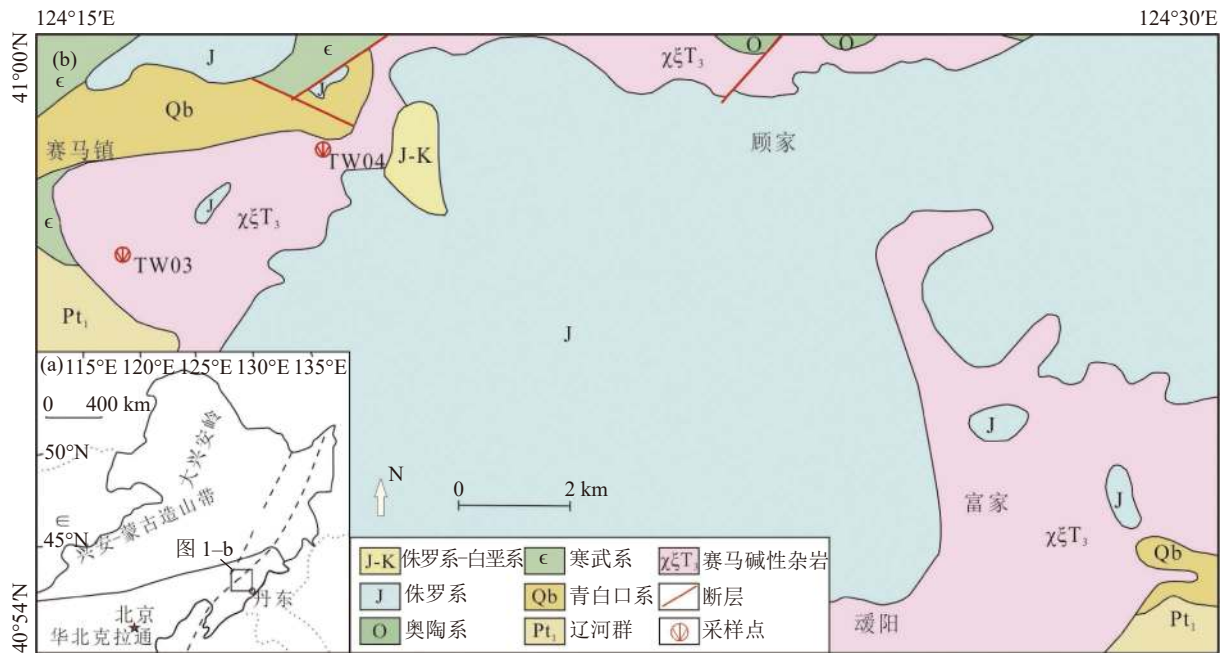


图1 中国东北构造地质简图(a)和辽东赛马地区碱性杂岩地质简图(b)

Fig. 1 Simplified geological map of eastern China, showing major tectonic units(a) and geological map of alkaline complex sampled from Saima area in the eastern Liaoning Province (b)

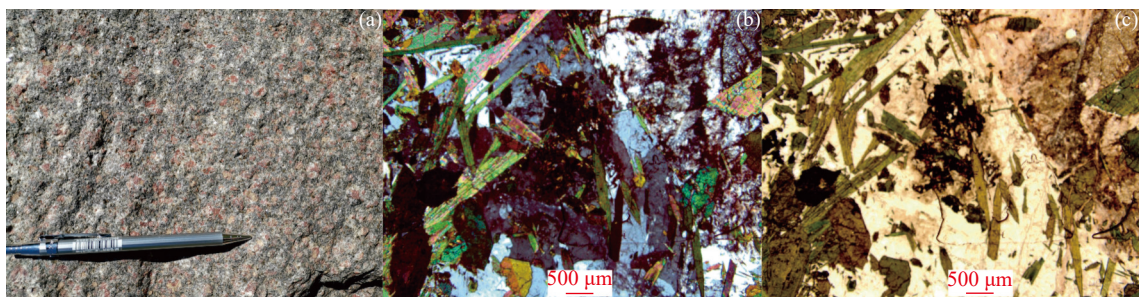


图2 辽东赛马地区浅肉红色霞霓正长岩野外照片(a)和显微镜照片(b、c)

Fig. 2 The original (a) and microscope (b,c) images of flesh red aegirine nepheline syenite from Saima area in the eastern Liaoning Province

a—岩石标本照片; b—显微镜下正交偏光照片(25×); c—显微镜下单偏光照片(25×)

超等, 2016)。

2.4 锆石 Hf 同位素测试

锆石 Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成, 使用仪器为多接收质谱仪 MC-ICP-MS(Neptune Plus)。束斑 44 μm, 能量强度 8 mJ/cm², 频率 8 Hz, 载气(氦): 600 mL/mi。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素

辽东赛马地区浅肉红色霞霓正长岩(TW04)的锆

石呈自形晶, 长 90~180 μm, 长短轴比为 1.1 : 1.0~2.1 : 1.0。阴极发光(CL)图像显示, 锆石多发育振荡环带(图3)。锆石微量元素测试数据显示, U 含量为 21.4×10⁻⁶~737.4×10⁻⁶, Th 为 37×10⁻⁶~4858×10⁻⁶, 锆石 Th/U 值均大于 0.1。锆石发育的振荡环带和 U、Th 含量指示岩浆锆石特征(Belousova et al., 2002)。30 个 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果(表1)中, 02、07、12、14、23、27 点的谐和度均小于 90%, 剔除, 没有参与²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值计算, 余下 24 个点得到的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为

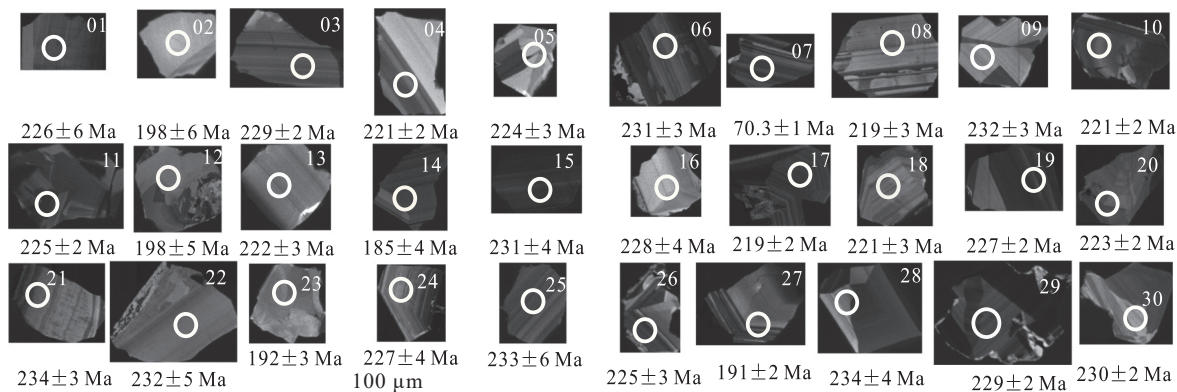


图 3 辽东赛马地区霞霓正长岩(TW04)锆石阴极发光(CL)图像及年龄

Fig. 3 Zircon CL images and ages(TW04) of aegirine nepheline syenite from Saima area in the eastern Liaoning Province

表 1 辽东赛马地区霞霓正长岩 (TW04) 锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 1 The U-Th-Pb isotope compositions of zircons from aegirine nepheline syenite (TW04) from Saima area in the eastern Liaoning Province

点编号	含量/ 10^{-6}			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1σ /%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ /%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ /%	误差 相关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		谐和度	
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th									年龄/Ma	年龄/Ma				
01	0.21	21	1679	18.38	78.39	0.06	0.0068	0.04	0.0009	0.27	0.0229	0.3083	226	6	241	18	93%
02	0.22	33	218	3.65	6.61	0.08	0.0142	0.03	0.0010	0.29	0.0352	0.2616	198	6	258	28	73%
03	0.44	280	262	13.62	0.94	0.05	0.0014	0.04	0.0004	0.25	0.0072	0.3767	229	2	225	6	98%
04	0.00	150	396	10.02	2.64	0.06	0.0022	0.04	0.0004	0.27	0.0104	0.2730	221	2	240	8	92%
05	0.15	87	78	4.14	0.90	0.05	0.0029	0.04	0.0005	0.25	0.0136	0.2504	224	3	223	11	99%
06	0.00	247	194	11.66	0.78	0.05	0.0019	0.04	0.0004	0.25	0.0092	0.3273	231	3	229	7	98%
07	4.20	266	3051	36.25	11.45	0.28	0.0080	0.01	0.0002	0.43	0.0136	0.5663	70.3	1	364	10	-36%
08	0.00	116	73	5.06	0.62	0.06	0.0029	0.03	0.0004	0.27	0.0135	0.2440	219	3	240	11	90%
09	0.69	108	61	4.85	0.56	0.05	0.0027	0.04	0.0005	0.26	0.0123	0.2958	232	3	235	10	98%
10	0.03	737	217	29.94	0.29	0.05	0.0012	0.03	0.0003	0.25	0.0055	0.3791	221	2	224	4	98%
11	0.26	243	1829	27.46	7.53	0.05	0.0019	0.04	0.0003	0.26	0.0100	0.2575	225	2	235	8	95%
12	0.07	28	903	11.56	32.00	0.06	0.0059	0.03	0.0008	0.25	0.0189	0.3280	198	5	223	15	87%
13	0.08	92	347	7.54	3.79	0.05	0.0030	0.04	0.0005	0.25	0.0139	0.2852	222	3	230	11	96%
14	0.15	164	759	13.56	4.64	0.07	0.0033	0.03	0.0006	0.26	0.0098	0.5694	185	4	235	8	76%
15	0.00	44	4858	53.05	111.50	0.05	0.0035	0.04	0.0007	0.25	0.0179	0.2788	231	4	231	14	99%
16	0.18	62	37	2.79	0.60	0.05	0.0035	0.04	0.0006	0.25	0.0138	0.3036	228	4	223	11	97%
17	1.00	199	156	8.95	0.78	0.06	0.0023	0.03	0.0004	0.26	0.0106	0.2607	219	2	236	9	92%
18	0.00	134	41	5.31	0.31	0.05	0.0025	0.03	0.0004	0.24	0.0120	0.2493	221	3	221	10	99%
19	0.01	315	57	12.42	0.18	0.05	0.0015	0.04	0.0003	0.26	0.0073	0.3494	227	2	238	6	95%
20	1.34	192	40	7.55	0.21	0.05	0.0020	0.04	0.0004	0.25	0.0095	0.2934	223	2	230	8	96%
21	0.00	219	335	12.49	1.53	0.05	0.0021	0.04	0.0004	0.26	0.0099	0.2998	234	3	233	8	99%
22	0.65	29	686	9.20	23.50	0.05	0.0046	0.04	0.0007	0.25	0.0182	0.2802	232	5	225	15	97%
23	0.23	103	658	11.15	6.36	0.09	0.0059	0.03	0.0005	0.36	0.0188	0.3467	192	3	314	14	51%
24	0.63	40	258	4.45	6.49	0.05	0.0042	0.04	0.0006	0.23	0.0179	0.2356	227	4	214	15	94%
25	0.35	21	2915	31.11	135.98	0.06	0.0059	0.04	0.0010	0.27	0.0197	0.3842	233	6	246	16	94%
26	0.00	170	1372	20.78	8.09	0.05	0.0019	0.04	0.0004	0.24	0.0090	0.3030	225	3	214	7	95%
27	1.27	126	602	12.03	4.79	0.10	0.0038	0.03	0.0003	0.41	0.0147	0.3132	191	2	346	11	42%
28	0.61	64	279	5.53	4.40	0.05	0.0036	0.04	0.0006	0.26	0.0169	0.2743	234	4	238	14	97%
29	1.08	592	65	22.78	0.11	0.05	0.0011	0.04	0.0003	0.25	0.0059	0.3256	229	2	223	5	97%
30	0.28	169	98	7.50	0.58	0.05	0.0022	0.04	0.0004	0.25	0.0110	0.2436	230	2	226	9	98%

225.8±1.9 Ma(图4),代表了霞霓正长岩的结晶年龄。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

辽东赛马碱性杂岩地球化学研究结果(表2)表明,浅肉红色霞霓正长岩具有较低的SiO₂(55.87%~60.88%)、Na₂O(0.41%~5.32%),同时具有较高的Al₂O₃(17.81%~19.53%)、K₂O(9.46%~11.91%)、MgO(0.46%~1.36%)。里特曼指数σ₄₃为7.54~17.01。

3.2.2 微量和稀土元素

浅肉红色霞霓正长岩的稀土元素总量ΣREE为428×10⁻⁶~706×10⁻⁶,平均569×10⁻⁶,其中(La/Yb)_N值为50.9~140, LREE/HREE值为32.75~41.74,平均37.64, δEu值为0.85~1.18,平均1.01(表2)。

稀土元素总量较高,高于300×10⁻⁶,轻、重稀土元素之间的分馏强烈,强烈富集轻稀土元素,(La/Yb)_N值大于10,个别达到100以上,具Eu正异常或无异常,以及陡右倾斜平滑型稀土元素分布模式(图5-a)。以上岩石物质组分的特征表现出富碱性岩石特征(赵振华,1994;周玲棣等,1994)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图5-b)上,Nb、Ta、P等高场强元素明显亏损,而Rb、Th等大离子亲石元素富集。Ta和Nb的氟络合物在富碱溶液中会导致铌、钽的分离富集(Kaeter et al., 2018)。Nb亏损可能与岩石局部富集成矿有关。Nb/Ta值为15.9~25.8,平均为21.8。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

Hf同位素测试时的测点位置与U-Pb同位素测

试的位置相同。共测得23个Hf同位素数据(表3)。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值分布于0.282280~0.282387之间,ε_{Hf}(t)值为-13.37~-9.30,单阶段Hf模式年龄T_{DM1}为1224~1413 Ma,两阶段Hf模式年龄T_{DM2}为1855~2102 Ma。

4 讨论

4.1 成岩时代

区域上,辽东半岛中生代花岗质岩浆作用划分为3期:早白垩世(131~117Ma)、侏罗纪(180~156Ma)和晚三叠世(233~212Ma)(吴福元等,2005)。辽宁青城子地区双顶沟岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为224.2±1.2 Ma,辽东弟兄山岩体SHRIMP U-Pb年龄为205.2±2.1 Ma(宋运红等,2015),可以看出辽东地区存在三叠纪岩浆活动。赛马碱性岩Rb-Sr等时代年龄为219 Ma(景立珍等,1995)。本次测得赛马碱性杂岩体中浅肉红色霞霓正长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为225.8±1.9 Ma,此年龄可代表赛马碱性杂岩体的侵位时代,即晚三叠世。

4.2 源区性质和岩石成因

岩石中含霞石和霓石,主量元素特征表现为SiO₂较低,铝和碱较高的特点,里特曼指数σ₄₃>4,浅肉红色正长岩表现出典型的碱性岩特征(李石,1992;邱家骧,1993;周玲棣等,1994;赵振华,1994)。稀土元素总量高于300×10⁻⁶,强烈富集轻稀土元素,(La/Yb)_N值大于10,个别达到100以上,陡右倾斜平滑型稀土元素分布模式表现出富碱性岩石特征(赵振华,1994;周玲棣等,1994)。Nb/Ta值为

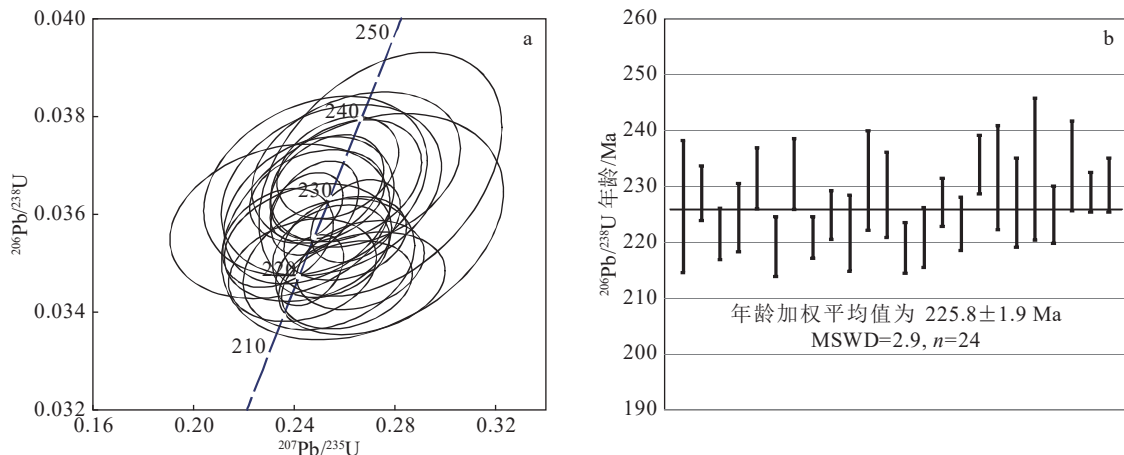


图4 辽东赛马地区霞霓正长岩(TW04)锆石U-Pb谐和年龄图(a)和年龄加权平均值图(b)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and weighted mean age graph (b) of aegirine nepheline syenite from Saima area in the eastern Liaoning Province

表 2 辽东赛马地区碱性杂岩主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Major, trace and rare earth elements data for the alkaline complex from Saima area in the eastern Liaoning Province

样品号	TW03-YQ1	TW03-YQ2	TW03-YQ3	TW03-YQ4	TW03-YQ5	TW04-YQ1	TW04-YQ2	TW04-YQ3	TW04-YQ4	TW04-YQ5
SiO ₂	57.27	56.95	56.49	55.87	56.01	60.85	60.60	60.42	60.88	59.81
TiO ₂	0.81	0.66	0.84	0.97	0.69	0.86	0.91	0.86	0.89	0.94
Al ₂ O ₃	19.18	18.75	18.84	18.53	19.53	18.38	18.26	17.93	18.66	17.81
Fe ₂ O ₃	1.85	1.92	2.09	2.40	1.73	4.94	5.03	5.09	4.62	6.22
MnO	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09
MgO	0.64	0.86	0.59	0.58	0.75	0.62	1.36	0.84	0.46	0.47
CaO	0.76	0.78	0.85	0.94	0.90	0.04	0.25	0.04	0.04	0.09
Na ₂ O	4.40	4.87	5.32	5.16	4.97	0.46	0.54	0.47	0.45	0.41
K ₂ O	10.03	9.46	9.68	10.09	9.50	11.76	11.11	11.91	11.69	11.78
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04
FeO	2.29	2.35	2.31	2.46	2.15	0.42	0.47	0.54	0.58	0.49
烧失量	2.08	2.67	2.42	2.28	2.58	1.24	1.34	1.13	1.37	1.52
A/CNK	0.99	0.95	0.91	0.88	0.97	1.35	1.37	1.31	1.39	1.31
σ43	13.89	13.83	15.73	17.01	14.91	8.18	7.54	8.55	8.04	8.57
总计	99.49	99.45	99.59	99.47	98.98	99.68	100	99.34	99.75	99.67
Cr	8.94	7.92	8.56	7.98	9.34	10.9	8.53	8.63	9.39	9.28
Ni	1.95	1.79	2.21	0.96	4.14	2.41	3.56	2.52	2.73	2.95
Rb	515	297	358	360	549	317	324	323	334	323
Sr	3000	3400	3300	3600	3200	1000	794	989	889	765
Zr	819	489	644	573	1200	658	850	672	683	838
Nb	54.7	27.5	39.0	35.5	58.4	42.1	50.3	42.0	51.8	41.3
Ba	2800	2600	2500	2900	2700	1400	1400	1400	1400	1500
Hf	17.5	24.2	29.1	27.0	20.2	15.8	19.4	20.1	20.9	24.4
Ta	2.13	1.53	1.64	2.23	2.40	1.85	1.95	2.31	2.45	1.85
Th	18.6	19.4	25.4	24.3	23.9	23.2	26.2	23.7	28.0	34.0
U	4.92	3.54	4.68	3.77	6.37	5.51	7.06	6.00	4.68	7.59
Li	50.8	54.6	48.9	50.7	48.6	55.0	63.6	41.5	35.1	45.2
Be	10.3	9.64	10.4	10.8	11.6	5.48	5.47	6.23	6.36	6.72
Co	6.12	6.70	6.20	6.43	5.39	7.23	7.79	5.97	5.33	8.72
V	53.0	56.6	57.1	56.5	53.5	69.9	79.0	70.7	77.3	81.1
Ga	28.4	29.4	29.2	30.9	27.5	29.3	29.9	28.8	27.0	29.2
Sc	3.19	3.01	3.16	3.06	3.59	3.37	3.39	3.30	3.54	3.40
Pb	69.9	86.6	84.0	111	77.5	103	106	119	121	124
Y	14.3	11.8	13.7	15.0	14.9	8.84	11.4	8.43	10.1	9.62
La	224	126	152	153	137	86.0	145	85.2	125	70.8
Ce	347	280	354	359	318	261	337	259	388	327
Pr	25.2	20.2	26.2	27.2	24.4	14.6	24.5	15.4	21.4	13.2
Nd	78.0	61.6	81.9	87.7	80.2	47.1	76.2	49.3	66.6	43.5
Sm	11.1	8.85	11.5	12.8	11.3	6.99	10.9	7.78	10.1	7.22
Eu	3.53	3.00	3.46	3.75	3.35	2.07	2.72	2.20	2.50	2.21
Gd	8.49	6.78	8.86	9.40	8.79	5.72	8.35	5.98	7.99	6.20
Tb	0.99	0.78	1.01	1.12	1.03	0.63	0.89	0.65	0.85	0.65
Dy	3.74	2.92	3.76	4.09	3.86	2.25	3.01	2.32	2.97	2.32
Ho	0.56	0.46	0.57	0.61	0.60	0.35	0.44	0.35	0.44	0.36
Er	1.61	1.25	1.57	1.69	1.66	0.97	1.27	0.99	1.20	1.04
Tm	0.21	0.18	0.20	0.23	0.22	0.13	0.17	0.13	0.16	0.16
Yb	1.15	1.02	1.13	1.24	1.20	0.79	1.00	0.75	0.94	1.00
Lu	0.17	0.16	0.17	0.19	0.17	0.12	0.16	0.12	0.14	0.17
ΣREE	706	513	647	661	592	428	611	430	628	476
LREE	689	499	629	643	574	418	596	419	613	464
HREE	16.91	13.54	17.27	18.57	17.53	10.97	15.28	11.29	14.69	11.90
LREE/HREE	40.73	36.86	36.44	34.62	32.75	38.08	39.02	37.13	41.74	39.01
(La/Yb) _N	140	88.5	96.9	88.3	81.9	78.1	104	81.2	95.6	50.9
δEu	1.11	1.18	1.05	1.05	1.03	1.00	0.87	0.98	0.85	1.01

注: σ43为里特曼指数, σ43=[w(Na₂O+K₂O)]²/[w(SiO₂)]-43

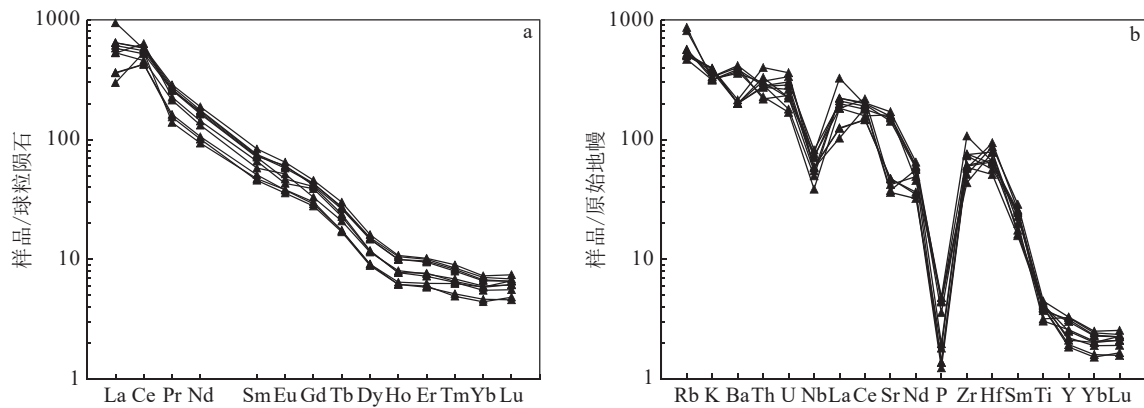


图5 辽东赛马地区碱性杂岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)(标准值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Rare earth element distribution curves (a) and trace element spider diagrams (b) for alkaline complex sampled from Saima area in the eastern Liaoning Province

表3 辽东赛马地区霞霓正长岩(TW04)锆石 Hf 同位素含量

Table 3 Hf isotope data of aegirine nepheline syenite (TW04) from Saima area in the eastern Liaoning Province

测点编号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	226	0.053437	0.001291	0.282290	0.000013	0.282267	-17.86	-13.09	1402	2088	-0.96
03	229	0.000917	0.000021	0.282333	0.000012	0.282310	-16.34	-11.32	1297	1979	-1.00
04	221	0.001844	0.000041	0.282333	0.000013	0.282310	-16.34	-11.50	1298	1984	-1.00
05	224	0.001043	0.000023	0.282302	0.000012	0.282279	-17.43	-12.52	1340	2051	-1.00
08	219	0.001057	0.000018	0.282333	0.000019	0.282310	-16.34	-11.54	1297	1985	-1.00
09	232	0.000687	0.000016	0.282293	0.000015	0.282270	-17.75	-12.67	1352	2066	-1.00
10	221	0.003449	0.000068	0.282322	0.000016	0.282299	-16.73	-11.89	1314	2009	-1.00
11	225	0.001295	0.000030	0.282306	0.000019	0.282283	-17.29	-12.36	1335	2042	-1.00
13	222	0.000242	0.000004	0.282286	0.000013	0.282263	-18.00	-13.13	1361	2088	-1.00
15	231	0.042501	0.000941	0.282331	0.000012	0.282308	-16.41	-11.48	1332	1990	-0.97
16	228	0.000353	0.000008	0.282301	0.000012	0.282278	-17.47	-12.47	1341	2051	-1.00
17	219	0.000479	0.000010	0.282323	0.000013	0.282300	-16.69	-11.89	1311	2007	-1.00
18	221	0.000507	0.000011	0.282280	0.000017	0.282257	-18.21	-13.37	1369	2102	-1.00
19	227	0.001331	0.000032	0.282315	0.000018	0.282292	-16.97	-12.00	1322	2020	-1.00
20	223	0.000626	0.000016	0.282284	0.000015	0.282261	-18.07	-13.18	1364	2092	-1.00
21	234	0.029693	0.000765	0.282310	0.000015	0.282287	-17.15	-12.14	1355	2034	-0.98
22	232	0.035978	0.000832	0.282320	0.000012	0.282297	-16.80	-11.84	1343	2013	-0.97
24	227	0.000551	0.000012	0.282286	0.000010	0.282263	-18.00	-13.02	1361	2085	-1.00
25	233	0.144341	0.003151	0.282332	0.000015	0.282309	-16.37	-11.75	1413	2008	-0.91
26	225	0.001419	0.000023	0.282330	0.000013	0.282307	-16.44	-11.51	1302	1988	-1.00
28	234	0.001903	0.000044	0.282387	0.000014	0.282364	-14.43	-9.30	1224	1855	-1.00
29	229	0.003627	0.000085	0.282304	0.000016	0.282281	-17.36	-12.35	1339	2044	-1.00
30	230	0.000404	0.000010	0.282288	0.000012	0.282265	-17.93	-12.89	1358	2078	-1.00

注: $T_{\text{DM1}} = \ln\left[\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品}} - ^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品}} - ^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}} + 1\right] / \lambda$, $T_{\text{DM2}} = \ln\left\{\left[\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品}} - ^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{样品}} - ^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}} + 1\right] \times (e^{\lambda t} - 1)\right\} / \lambda$

15.9~25.8, 平均为 21.8, 位于碱性岩中 Nb/Ta 值范围 (25~10) (Linnen et al., 2014)。因此, 赛马碱性杂岩为典型的富碱性岩。

赛马碱性杂岩亏损 Nb、Ta、P 等高场强元素, 富

集 Rb、Th 等大离子亲石元素。Nb/Ta 值为 15.92~21.79, 高于原始地幔的 Nb/Ta 值 17.5 ± 2.0 (Green et al., 1995), 说明碱性杂岩源区受地壳组分的影响较小, Nb、Ta 相对亏损, 可能有少量地壳物质混合

(Rollison et al., 1993)。P 偏低可能与磷灰石的结晶分异有关(高永宝等, 2014; 孙雷等, 2021; 于喜洵等, 2022)。

赛马碱性杂岩体锆石 Hf 同位素组成方面, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -13.37~9.30, 位于地壳范围(图 6-a), 说明岩体形成时有壳源物质参与。两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})代表了锆石寄主岩石源区物质脱离亏损地幔进入地壳的时间, 大体反映了地壳生长时间(李梦玲等, 2022; 常翔等, 2023), 样品对应的二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})为 2102~1855 Ma(图 6-b), 表明锆石寄主岩石源于古老下地壳深熔。以上证据指示, 赛马碱性杂岩体来自古老元古代地壳物质的熔融。

综上, 赛马碱性杂岩物源区主要为加厚的下地

壳(或上地幔), 在由俯冲挤压向陆内伸展、拉张转换的动力背景下, 下地壳(或上地幔)部分熔融产生富碱岩浆顺大断裂上升, 与硅铝层混染较小时形成碱性岩。

4.3 地质意义

研究区大地构造背景属于华北克拉通东部, 辽宁赛马碱性岩反映了板内大断裂-郯庐大断裂的地质背景。富碱侵入岩赋存于裂谷、地堑、地幔上拱带, 与拉张的条件更密切, 多形成于拉张环境下, 富碱侵入岩的出现则意味着造山旋回的结束和转入非造山状态(涂光炽, 1989)。在微量元素构造环境图解(图 7)中, 赛马碱性杂岩投在同碰撞与火山弧区交界处, 表现出由挤压到拉张的构造环境。碱性岩浆活动的时

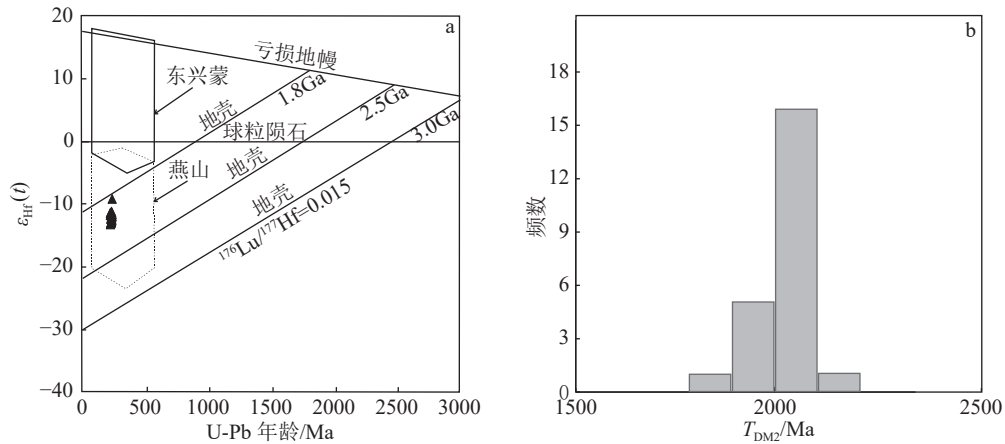


图 6 辽东赛马地区霞霓正长岩锆石 Lu-Hf 同位素特征 (底图据 Yang et al., 2006)

Fig. 6 Zircon Lu-Hf isotope characteristics diagram of aegirine nepheline syenite from Saima area in the eastern Liaoning Province

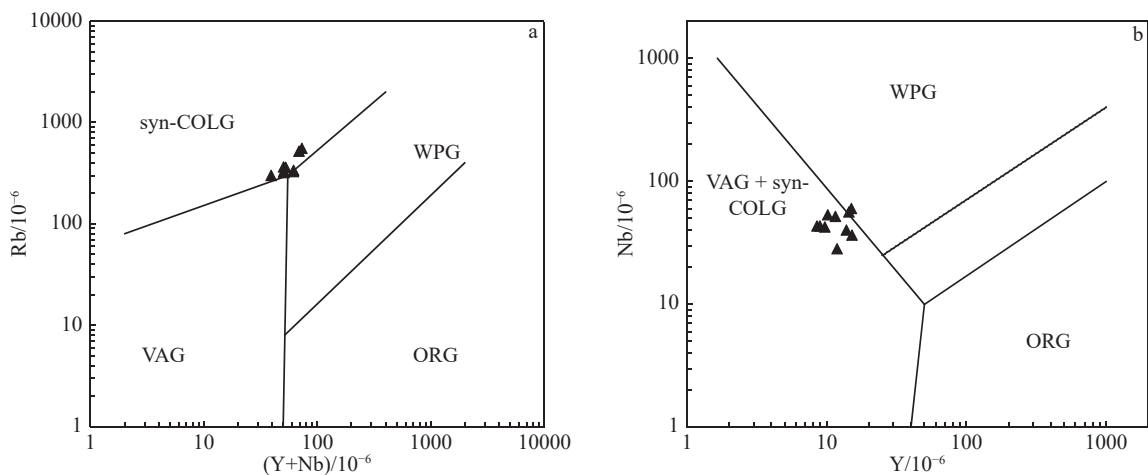


图 7 辽东赛马地区碱性杂岩构造环境图解(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 7 Structure environment diagram of alkaline complex from Saima area in the eastern Liaoning Province

WPG—板内环境; ORG—洋中脊环境; VAG—火山弧环境; syn-COLG—同碰撞环境

代可能为岩石圈发生减薄作用的起始时间, 辽宁赛马碱性杂岩的侵位时代为 225.8 ± 1.9 Ma, 可能代表了华北克拉通北缘岩石圈开始伸展减薄的时间, 同时, 也是郯庐断裂形成的时间。

5 结论

(1) 用 LA-ICP-MS 测得辽宁赛马地区浅肉红色霞霓正长岩中的锆石 U-Pb 年龄为 225.8 ± 1.9 Ma, 赛马碱性杂岩侵位时代为晚三叠世。

(2) 赛马碱性杂岩中含霞石和霓石, 表现为 SiO_2 含量较低, 铝和碱较高的特点, 里特曼指数 σ_{43} 大于 4。稀土元素总量高于 300×10^{-6} , 强烈富集轻稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值大于 10, 个别达到 100, 表现出富碱性岩石特征。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-13.37 \sim -9.30$, 对应的两阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 2102~1855 Ma。

(3) 结合岩体地球化学特征和区域演化背景, 赛马碱性杂岩可能形成于由俯冲挤压向陆内伸展、拉张转换的动力学背景下的下地壳(或上地幔)部分熔融。侵位时代(225.8 ± 1.9 Ma)可能代表了华北克拉通北缘岩石圈开始伸展减薄的时间, 同时, 也是郯庐断裂形成的时间。

致谢: 锆石 U-Pb 和 Hf 同位素实验测试和数据分析过程中得到武汉上谱分析科技有限责任公司陈红芳老师的帮助, 审稿专家对本文提出宝贵的修改意见与建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622.
- 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.
- Huang X L, Wang R C, Chen X M, et al. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China[J]. *Can. Miner.*, 40: 1047–1068.
- Kaeter D, Barros R, Menuge J F, et al. 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 240: 98–130.
- Linnen R L. 2014. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits[C]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 13: 543–568.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34–43.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Rollison H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, pre-Sentation, interpretation[M]. London, Longman Group UK: 1–20.
- Sun S S, McDonough, 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.
- Wang R C, Hu H, Zhang A C, et al. 2004. Pollucite and the cesium-dominant analogue of polythionite as expressions of extreme Cs enrichment in the Yichun topaz-lepidolite granite, southern China[J]. *Can. Miner.*, 42: 883–896.
- Xie L, Wang R C, Che X D, et al. 2016. Tracking magmatic and hydrothermal Nb-Ta-W-Sn fractionation using mineral textures and composition: A case study from the late Cretaceous Jiepailing ore district in the Nanling Range in South China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 78: 300–321.
- Xie L, Wang Z, Wang R, et al. 2018. Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing District, South China)[J]. *Ore Geol. Rev.*, 95: 695–712.
- Yang J, Wu F, Shao J, et al. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3/4): 336–352.
- Zhu Z Y, Wang R C, Che X D, et al. 2015. Magmatic-hydrothermal rare-element mineralization in the Songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb-Ta-Zr minerals[J]. *Ore Geol. Rev.*, 65: 749–760.
- Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, et al. 2018. The Early Cretaceous Huangshan rare metal granite complex, northeast Jiangxi Province, southeast China: A new style of Nb-rich rare metal granite[J]. *Am. Mineral*, 65: 1–11.
- 常翔, 孙景贵, 陈旭, 等. 2023. 吉林省南部集安大石湖-大台子铜矿化区中生代中酸性杂岩岩石成因与地球动力学背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 53(3): 920–945.
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 30(6): 1647–1665.
- 景立珍, 郭裕嘉, 丁彩霞. 1995. 辽宁赛马碱性岩的年代学及碱性岩浆的形成[J]. *辽宁地质*, 4: 257–271.
- 鞠楠, 张森, 毕中伟, 等. 2019. 辽宁凤城赛马钨矿床成矿岩体地球化学特征及其地质意义[J]. *世界地质*, 38(1): 130–153.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 等. 2019. 中国钨钼矿成矿规律[J]. *科学通报*, 64: 1545–1566.
- 李梦玲, 孙珍军, 于赫楠, 等. 2022. 秦皇岛茹各庄火山碎屑岩地球化学、锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 52(5): 1688–1706.
- 李石. 1992. 论碱性岩的定义和碱性花岗岩的分标[J]. *湖北地质*, 6(1): 70–78.
- 罗晨皓, 周晔, 沈阳. 2019. 云南姚安 Au-Pb-Ag 矿床含矿富碱岩浆岩地球化学特征及岩石成因[J]. *地球科学*, 44(6): 2063–2083.
- 邱家骧. 1993. 秦巴碱性岩[M]. 北京: 地质出版社: 139–141.

- 任康绪. 2003. 碱性岩研究进展述评[J]. 化工矿产地质, 25(3): 151-163.
- 宋运红, 郝立波, 杨凤超, 等. 2015. 辽东三叠纪弟兄山岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与资源, 24(5): 444-452.
- 孙雷, 曾振, 崔维龙, 等. 2021. 黑龙江省东部晚三叠世—中侏罗世硅质岩地球化学特征及形成环境[J]. 地质与资源, 30(6): 637-645.
- 涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩[J]. 矿产与地质, 13: 1-4.
- 邬斌, 王汝成, 郭国林, 等. 2020. 辽宁赛马碱性岩体层硅铈钛矿化学成分变化及其对碱性岩浆演化的指示意义[J]. 地球科学, 45(2): 467-478.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. 高校地质学报, 11(3): 305-317.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和 Nd、Pb、Sr 同位素特征及其意义[J]. 地质论评, 48(增刊): 69-76.
- 杨凤超, 孙景贵, 宋运红, 等. 2016. 辽东连山关地区新太古代花岗杂岩 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义[J]. 地球科学, 41(12): 2008-2018.
- 于喜洵, 李新鹏, 陈旭峰, 等. 2022. 大兴安岭潮满林场地区新元古代花岗质片麻岩——锆石 U-Pb 测年、地球化学特征及构造环境探讨[J]. 地质与资源, 31(2): 123-130.
- 赵振华. 1994. 富碱侵入岩—窥探地幔成分的窗口[C]//欧阳自远. 中国矿物岩石地球化学研究进展. 兰州: 兰州大学出版社: 113-114.
- 钟军, 范洪海, 陈金勇, 等. 2020. 辽宁赛马霓霞正长岩黑云母地球化学特征、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 45(1): 131-144.
- 周玲棣, 赵振华. 1994. 我国富碱侵入岩的岩石学和岩石化学特征[J]. 中国科学(B辑), 20(10): 1093-1101.