



吉林延边五凤地区早侏罗世粗面安山岩岩石成因

高子越¹, 鞠楠^{1,2}, 李经纬¹, 杨群³, 王可勇³

1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100089; 2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061

摘 要: 以吉林省延边五凤地区粗面安山岩为对象, 开展岩石学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学研究, 查明其 SiO₂ 含量为 58.33%~61.36%, K₂O 含量 1.61~3.28%, 全碱含量为 6.77%~10%, 属于中钾—高钾钙碱性系列。岩浆成因锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 175.52±2.7 Ma, 与早侏罗世古太平洋板块俯冲时间一致。岩石相对富集 K、Ba、Rb 等大离子亲石元素和 Th、U 等强不相容元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, LREE/HREE 比值较高, 具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征, 表明岩浆可能源于地幔部分熔融, 其源区受到俯冲的壳源物质交代。研究认为粗面安山岩形成于大洋俯冲系统的活动大陆边缘, 属于早侏罗世古太平洋板块俯冲的岩浆响应。

关键词: 粗面安山岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 古太平洋板块; 早侏罗世; 活动大陆边缘; 吉林省

PETROGENESIS OF THE EARLY JURASSIC TRACHYANDESITE IN WUFENG AREA OF YANBIAN, JILIN PROVINCE

GAO Zi-yue¹, JU Nan^{1,2}, LI Jing-wei¹, YANG Qun³, WANG Ke-yong³

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100089, China; 2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: Study on the petrology, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and whole rock geochemistry of the trachyandesite in Wufeng area of Yanbian, Jilin Province in Northeast China, shows that the SiO₂ content is 58.33%–61.36%, K₂O content 1.61%–3.28% and total alkali content 6.77%–10%, belonging to the medium potassium-high potassium calc-alkaline series. The weighted mean age of magmatic zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U is 175.52±2.7 Ma, which is consistent with the subduction time of Early Jurassic paleo-Pacific plate. The trachyandesite is characterized by relative enrichment of LILEs(K, Ba and Rb) and strongly incompatible elements (Th and U), and depletion of HFSEs (Nb, Ta and Ti), with high LREE/HREE ratio, and enriched LREEs and depleted HREEs, indicating that the magma may originate from the partial melting of mantle and its source area is metasomatized by the subducted shell source materials. From the above, it is believed that the trachyandesite was formed in the active continental margin of oceanic subduction system and was the magmatic response to the subduction of Early Jurassic paleo-Pacific plate.

Key words: trachyandesite; lithogeochemistry; zircon U-Pb age; paleo-Pacific plate; Early Jurassic; active continental margin; Jilin Province

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-01-08. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家自然科学基金项目“碱性岩浆作用中铈钪元素富集机制研究: 以辽东地区赛马钪钪矿床为例”(42102087); 中国博士后科学基金项目“辽东地区碱性岩型钪钪矿床成因研究”(2022M712966); 科技部重大专项“青藏高原大宗矿产数据库建设”(2021QZKK0304).

作者简介: 高子越(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床地质学方面研究, 通信地址 北京市海淀区学院路 29 号, E-mail//ziyuegao.geo@qq.com

通信作者: 鞠楠(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事关键金属元素成矿机制研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号, E-mail//junan-cgs@qq.com

0 前言

吉林延边五凤地区经历过晚二叠世—中三叠世古亚洲洋闭合^[1-3]、中生代古太平洋板块俯冲^[4-5]等多期构造事件,形成了复杂的地质构造和大规模的岩浆活动,在环太平洋造山带占有重要地位^[6]。延边地区也是中国重要的火山岩型金、铜矿集区^[7-9],矿床的形成与中生代多期岩浆作用有关,包括斑岩型、火山岩型和次火山岩型等多种类型^[10]。五凤地区位于延边斑岩—浅成热液矿集区西部,并产出浅成低温热液型金矿。延边五凤金矿床赋矿围岩为中生代火山岩。《吉林省区域地质志》^[11]将延边地区出露的中生代早期火山岩(安山岩、粗面安山岩和角闪安山岩等)划分到中侏罗世屯田营组,将晚期火山岩(玄武岩、安山岩和凝灰岩等)划分到早白垩世金沟岭组。已有的年代学研究表明,金沟岭组火山岩时代最大值为130~140 Ma^[12],最小值为106.1 Ma^[13],故金沟岭组火山岩岩浆活动时间应为晚侏罗世—早白垩世。也有研究者^[13-14]认为屯营田组应归属于白垩纪岩浆活动产物。对于延边地区以及矿区容矿火山岩的岩石成因,研究者多认为该区火山岩形成与太平洋板块俯冲有关^[15]。也有学者推测五凤金矿区火山岩系形成于陆内造山带的构造环境^[9]。前人研究主要集中在白垩纪安山岩的年代学限定,然而区内粗面安山岩缺乏详细的研究和年代学限定。延边地区中生代火山岩的形成时代与地层单元归属仍存在争议,粗面安山岩的地层单元归属也未有定论。本文以五凤地区粗面安山岩为研究对象,开展岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和岩石主、微量元素地球化学分析,以查明五凤粗面安山岩成因及其与古太平洋板块俯冲的关系。

1 地质背景

延边朝鲜族自治州地处中国东北地区吉林省东部。延边地区大地构造位置处于华北克拉通北东陆缘佳木斯地块及兴凯地块的交汇处^[15](图1),经历了前中生代古亚洲洋演化^[1-3]、中生代叠加古太平洋板块俯冲作用^[4-5]。区内构造以呈近东西向展布的古生代构造为基础,在其之上叠加有中生代的呈北东—近南北向、北北西向展布的断裂^[16]。区内发育的地层主要是古生界青龙村群、五道沟群以及天宝山组、庙岭组、柯岛组和开山屯组低—中级变质的海相火山—沉积地

层,中生界大兴沟群(托盘沟组、马鹿沟组、天桥岭组)、屯田营组、金沟岭组、泉水村组、大砬子组、龙井组等。该地区经历了早燕山阶段早期(200~170 Ma)、早燕山阶段晚期(170~135 Ma)、晚燕山阶段晚期(110~80 Ma)多期岩浆活动^[17-18]。



图1 研究区大地构造位置图

(据文献[16-19]修编)

Fig. 1 Geotectonic location map of the study area

(Modified from References [16-19])

F1—塔源—营口断裂带(Tayuan-Yingkou fault zone); F2—黑河—嫩江断裂带(Heihe-Nenjiang fault zone); F3—牡丹江断裂带(Mudanjiang fault zone); F4—敦密断裂(Dun-Mi fault); F5—同江—当埠断裂带(Tongjiang-Dangbu fault zone); F6—依兰—沂蒙断裂带(Yilan-Yimeng fault zone); F7—西拉木伦河—长春—延吉断裂带(Xilamulun River-Changchun-Yanji fault zone); F8—华北板块北缘断裂带(northern margin fault zone of North China Plate)

五凤地区位于延边地区西部的延吉市境内,地处中生代天宝山—刺猬沟火山断陷带中央,区域性朝阳川—彩绣岭北西向断裂与老头沟—五凤北东向断裂的交汇部位(图2)。区内分布晚侏罗世—早白垩世金沟岭组火山岩,其主要岩石类型为角闪安山岩、安山质角砾凝灰岩、安山质凝灰岩、含斑安山岩、辉石安山岩、石英安山岩和粗面安山岩。其中,角闪安山岩为矿区最主要的岩石类型,遍布全区,约占岩石出露面积80%以上;角闪安山岩角砾凝灰岩分布于矿区西侧,出露面积仅次于安山岩。矿区内岩浆岩主要以岩脉的形式发

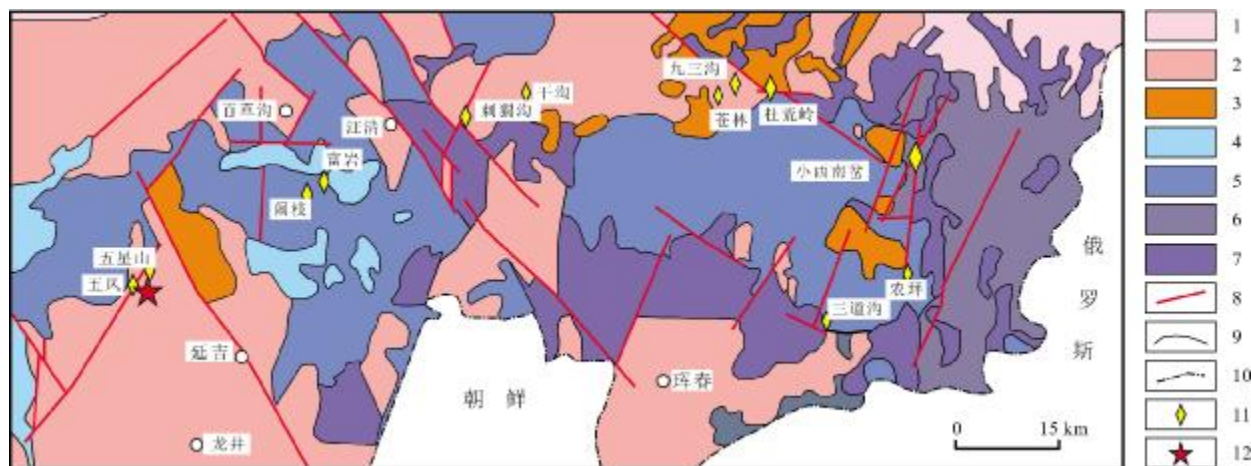


图2 研究区区域地质图

(据文献[16-19]修编)

Fig. 2 Regional geological map of the study area

(Modified from References [16-19])

1—新生代火山岩 (Cenozoic volcanic rock); 2—中生代火山-沉积岩 (Mesozoic volcanic-sedimentary rock); 3—早白垩世花岗杂岩 (Early Cretaceous granite complex); 4—中晚侏罗世花岗岩 (Middle-Late Jurassic granite); 5—晚二叠世-早侏罗世花岗闪长岩-二长花岗岩 (Late Permian-Early Jurassic granodiorite-monzogranite); 6—晚二叠世辉长岩-闪长岩 (Late Permian gabbro-diorite); 7—古生代浅变质岩 (Paleozoic epimetamorphic rock); 8—断层 (fault); 9—地质界线 (geological boundary); 10—国界线 (national boundary); 11—金铜矿床及大小 (Au/Cu deposit and size); 12—采样位置 (sampling position)

育,如细粒闪长岩、石英闪长玢岩及煌斑岩等,尤以前两者为主. 这些岩脉长一般几十米至百余米,宽几十厘米,沿北东、北西向断裂产出.

2 样品采集及岩相学特征

本研究样品采自五凤地区粗面安山岩. 粗面安山岩在研究区内仅零星出露,在大比例尺区域地质图上无集中体现,研究者一般将其划入金沟岭组^[20]. 对粗面安山岩在岩相学研究基础上,开展了锆石 U-Pb 定年和全岩地球化学分析研究. 样品主要呈灰黑色,岩石斑状结构,斑晶含量约为 30%,基质部分约为 68%,有少量不透明金属矿物(2%). 斑晶主要由斜长石和少量角闪石组成(图 3),它们在斑晶中的含量分别为 70%和 30%. 斜长石斑晶为自形一半自形结构,粒径差别较大,长轴一般为 300~2 000 μm ,最大可达 900 μm ,最小的仅为 100 μm . 长宽比值变化较大,一般为 1~3. 斜长石斑晶有的较为完整,有的具明显熔蚀现象. 角闪石斑晶为自形一半自形结构,长轴一般为 300~700 μm ,最大可达 1 500 μm ,长宽比值为 1~3. 基质部分为微晶-隐晶结构,微晶含量约为 70%,主要由斜长石和角闪石组成,含量分别为 75%和 25%. 不透明金属矿

物呈不均匀分布在岩石中,多为不规则立方体,粒径 10~20 μm ,最大可达 40 μm .

3 测试方法

锆石 U-Pb 同位素定年在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成. 首先将新鲜岩石样品洗净并粉碎至约 80 目,然后依次进行重力分选、磁选和重液分选,最后人工在双目镜下挑选锆石颗粒. 在双目镜下将无色透明、晶形完整且不含包裹体、干净且无裂纹的锆石颗粒粘贴在双面胶上并用环氧树脂浇铸固定,等树脂固化之后将锆石表面抛光直至内部结构充分暴露. 然后进行阴极发光照相,锆石靶表面完成镀膜处理之后,用加载阴极发光仪的扫描电子显微镜完成阴极发光图像的采集及 LA-ICP-MS 分析. 本次分析的激光束斑和频率分别为 44 μm 和 7 Hz. 激光剥蚀过程中采用 He 作为剥蚀物质的载气,Ar 为补偿气以调解灵敏度,ICP-MS 仪器为 Agilent 7900 型,采用国际标准锆石 91500 作外标进行同位素质量分馏校正. 对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成. 锆

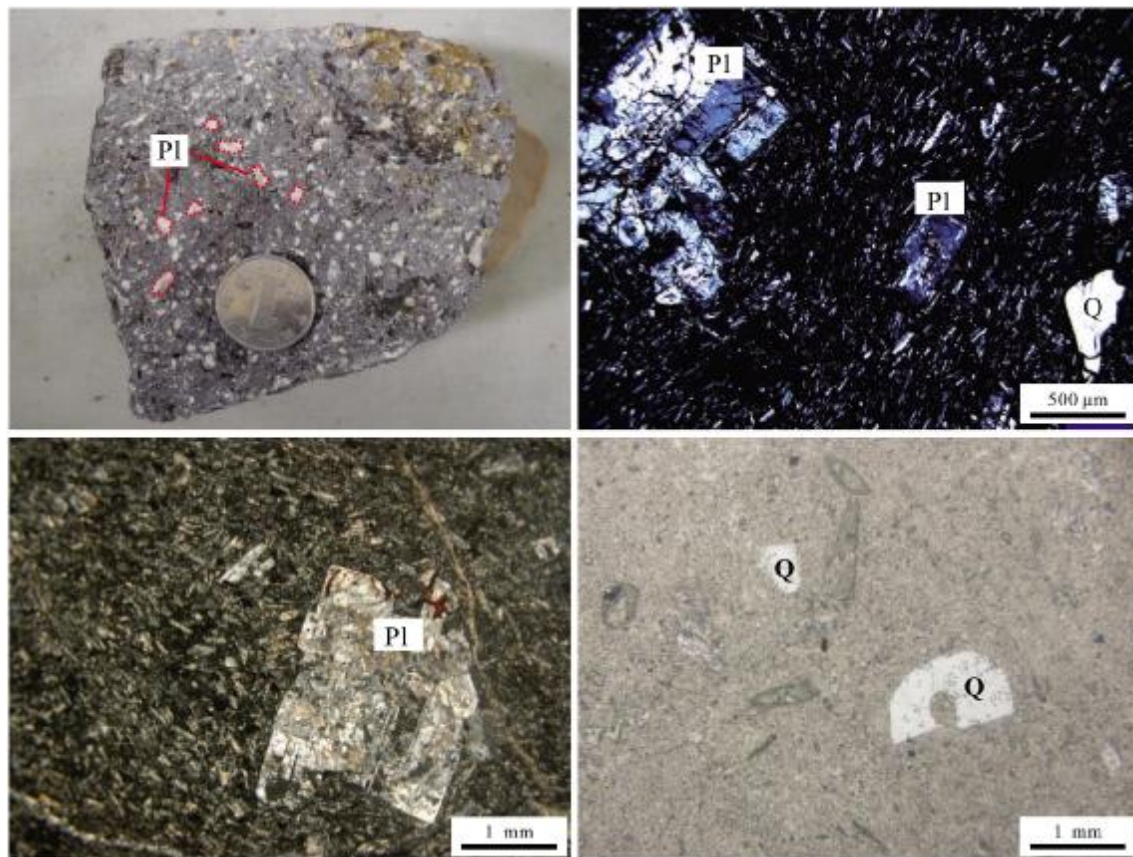


图 3 粗面安山岩岩相图

Fig. 3 Petrographic photographs of trachyandesite

Pl—斜长石(plagioclase); Q—石英(quartz)

石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot4.0 完成。

全岩主、微量元素测试在吉林大学测试科学实验中心完成。选取新鲜岩石样品,首先经显微镜下观察与鉴定,然后选择具有代表性且无蚀变的样品用于全岩地球化学分析。样品的粉碎加工均在无污染设备中进行,用蒸馏水清洗干净后,105℃恒温烘干 24 h,破碎、研磨至 200 目以上。主量元素测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF),准确度优于 10%;稀土及微量元素利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,精度优于 10%。

4 测试结果

4.1 年代学特征

粗面安山岩的锆石 U-Pb 同位素比值及定年数据见表 1。CL 图像(图 4)显示,多数锆石为自形一半自形的粒状或柱状,晶形大多完好,少数呈浑圆状,粒径在 90~210 μm,具有明显的韵律环带,为岩浆成因锆石。

对小于 1 Ga 的年轻锆石,所测锆石的 ^{207}Pb 和 ^{235}U 含量低, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的比值精度较差,因此采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。样品 WF13 所测定的 12 粒有效锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 $(169\pm 14) \sim (186\pm 4)$ Ma 之间,加权平均年龄为 175.5 ± 2.7 Ma, MSWD=1.9(图 5),指示粗面安山岩的成岩年龄为早侏罗世。

4.2 主量元素地球化学特征

粗面安山岩的主量元素含量见表 2。粗面安山岩中 SiO_2 (58.33%~61.36%, 平均 59.67%) 含量最高,其次是 Al_2O_3 (17.75%~18.90%, 平均 18.30%)、 FeO^T (4.03%~6.49%, 平均 5.33%)、 CaO (2.69%~5.05%, 平均 3.96%)、 K_2O (1.61%~3.28%, 平均 2.18%)、 Na_2O (1.40%~3.88%, 平均 2.84%)、 MgO (1.18%~2.24%, 平均 1.65%)、 TiO_2 (0.74%~1.10%, 平均 0.94%)、 P_2O_5 (0.27%~0.39%, 平均 0.35%)、 MnO (0.13%~0.19%, 平均 0.15%) 含量均较低。岩体碱含量较高, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.77\%\sim 10\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.98~3.56, 里特曼指数 σ 分布范围为 3.0~5.46。火山

表 1 五凤矿区粗面安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

测点序号	同位素比值						年龄/Ma					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ	
20140512L04	0.0494	0.0016	0.1940	0.0055	0.0285	0.0005	165	37	180	5	181	3
20140512L05	0.0500	0.0012	0.1903	0.0038	0.0276	0.0004	193	21	177	3	176	3
20140512L07	0.0506	0.0046	0.1815	0.0161	0.0261	0.0006	220	154	169	14	166	4
20140512L08	0.0506	0.0014	0.2008	0.0048	0.0288	0.0005	222	28	186	4	183	3
20140512L10	0.0500	0.0014	0.1889	0.0047	0.0274	0.0004	195	29	176	4	174	3
20140512L11	0.0503	0.0018	0.1885	0.0062	0.0272	0.0005	208	46	175	5	173	3
20140512L13	0.0493	0.0014	0.1907	0.0049	0.0281	0.0005	161	31	177	4	179	3
20140512L18	0.0503	0.0012	0.1920	0.0039	0.0277	0.0004	209	21	178	3	176	3
20140512L19	0.0501	0.0017	0.1903	0.0058	0.0276	0.0005	198	41	177	5	175	3
20140512L20	0.0510	0.0016	0.1883	0.0055	0.0268	0.0004	239	38	175	5	170	3
20140512L21	0.0495	0.0012	0.1872	0.0041	0.0274	0.0004	170	24	174	3	175	3
20140512L22	0.0499	0.0018	0.1885	0.0061	0.0274	0.0005	192	45	175	5	174	3



图 4 粗面安山岩锆石 CL 图像和测点位置图

Fig. 4 CL images of selected zircons from trachyandesite and positions of LA-ICP-MS test

岩分类的 TAS 图解(图 6a)中,岩体表现出粗安岩、粗面岩(CIPW 计算石英小于 20%)组合,火山岩投点既包含钙碱性系列,又包含碱性系列,具有钙碱性和碱性过渡系列的特征,反映为偏碱性钙碱质火山岩岩石系列. 在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 6b)上,表现出钠质的特征. 在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解(图 6c)上,表现出准铝质的特征. 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 6d)上,表现出中钾—高钾钙碱性岩石系列的特征.

4.3 稀土元素地球化学特征

粗面安山岩的稀土元素含量见表 3. 区内粗面安

山岩的稀土元素总量为 $136.15\times10^{-6}\sim175.35\times10^{-6}$,均值为 151.92×10^{-6} . 在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 7a)上,所有样品均显示右倾斜配分曲线,呈轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的特征. δEu 值在 0.12~0.52 之间,为 Eu 富集型; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 13.37~28.16 之间.

4.4 微量元素地球化学特征

五凤矿区粗面安山岩的微量元素含量见表 4. 图 7b 展示了样品微量元素相对含量分布曲线. 区内粗面安山岩的微量元素具有如下特点: 所有样品大离子亲

表 2 五凤矿区粗面安山岩主量元素含量

Table 2 Major element contents of the trachyandesite from Wufeng orefield

样品号	13WF13-1	13WF13-2	13WF13-3	13WF13-4	13WF13-5	13WF13-6	13WF13-7
SiO ₂	59.49	59.15	60.28	58.33	58.58	61.36	60.46
Al ₂ O ₃	18.67	18.06	18.90	17.75	18.14	18.23	18.39
Fe ₂ O ₃	3.57	3.14	2.93	3.77	3.69	2.20	2.64
FeO	2.41	2.83	2.21	3.11	3.03	2.05	1.96
CaO	3.46	4.74	4.19	5.05	4.76	2.69	2.82
MgO	1.29	2.15	1.38	2.24	2.08	1.18	1.22
K ₂ O	1.94	1.84	1.64	1.71	1.61	3.23	3.28
Na ₂ O	6.81	5.49	5.83	5.06	5.30	6.77	6.49
TiO ₂	0.76	1.06	0.74	1.10	1.05	0.91	0.95
P ₂ O ₅	0.35	0.35	0.27	0.37	0.35	0.39	0.39
MnO	0.13	0.17	0.13	0.17	0.19	0.14	0.14
LOI	0.80	1.05	0.93	1.12	1.14	0.77	0.87
Total	99.68	100.03	99.42	99.78	99.91	99.92	99.62
σ	4.64	3.32	3.23	2.99	3.06	5.45	5.47
ALK	8.75	7.33	7.47	6.77	6.90	10.00	9.77
Mg [#]	29.07	40.35	33.70	38.12	36.83	34.35	33.40
A/CNK	0.95	0.92	0.99	0.92	0.95	0.93	0.95

含量单位:%.

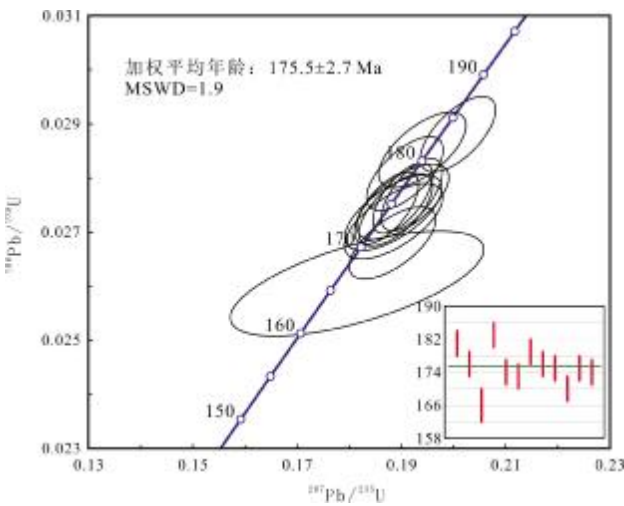


图 5 粗面安山岩锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons from trachyandesite

石元素 Rb ($51.6\times10^{-6}\sim61.7\times10^{-6}$)均低于大陆地壳丰度^[24],而 Ba ($748\times10^{-6}\sim2\,000\times10^{-6}$)、Sr ($737\times10^{-6}\sim974\times10^{-6}$)含量与大陆地壳丰度^[24]相比较 高. 放射性元素

表 3 五凤矿区粗面安山岩稀土元素含量

Table 3 Rare earth element contents of the trachyandesite from Wufeng orefield

样品号	13WF13-1	13WF13-2	13WF13-3	13WF13-4	13WF13-5	13WF13-6	13WF13-7
La	32.30	30.50	33.30	34.80	33.70	39.40	35.40
Ce	64.00	62.60	64.70	72.80	69.60	77.40	70.30
Pr	6.54	6.37	6.42	7.79	7.70	8.73	7.62
Nd	21.20	21.70	21.80	26.30	26.60	31.40	28.20
Sm	3.81	3.83	3.91	4.55	4.82	5.55	4.97
Eu	1.57	1.45	1.76	1.74	1.63	1.82	1.67
Gd	3.39	3.66	3.44	4.21	3.62	3.89	3.64
Tb	0.44	0.43	0.44	0.57	0.56	0.57	0.53
Dy	2.24	2.43	2.29	2.84	3.01	2.95	2.90
Ho	0.46	0.52	0.46	0.58	0.59	0.60	0.57
Er	1.16	1.22	1.19	1.48	1.46	1.55	1.34
Tm	0.15	0.17	0.15	0.20	0.22	0.19	0.21
Yb	0.85	1.11	0.80	1.21	1.24	1.12	1.14
Lu	0.13	0.16	0.13	0.21	0.21	0.17	0.18
ΣREE	138.25	136.15	140.79	159.28	154.95	175.35	158.67
δEu	1.31	1.17	1.42	1.12	1.15	1.14	1.15
(La/Yb) _N	25.62	18.57	28.16	19.43	18.37	23.77	20.98

含量单位:10⁻⁶.

Th ($2.28\times10^{-6}\sim4.28\times10^{-6}$)、U ($0.68\times10^{-6}\sim1.06\times10^{-6}$)含量相对于大陆地壳丰度^[24]较低. 高场强元素 Hf ($1.12\times10^{-6}\sim3.10\times10^{-6}$)、Ta ($0.61\times10^{-6}\sim1.22\times10^{-6}$)、Nb ($6.21\times10^{-6}\sim11.88\times10^{-6}$)、Zr ($64.7\times10^{-6}\sim143\times10^{-6}$)含量与大陆地壳丰度^[24]相比较 低. 在原始地幔标准化微量元素原始地幔标准化图(图 7b)上粗面安山岩富集 Rb、K、Th、U、Nb,亏损 Ba、Sr、P 和 Ti.

5 讨论

5.1 岩浆源区和岩石成因

五凤粗面安山岩(La/Yb)_N值介于 13.37~28.16 之间,表明后期岩浆分异强烈^[25]. 强不相容元素 Rb 的富集也暗示了岩浆可能发生的高度分异^[26]. P、Ti 元素的亏损可能与磷灰石和钛铁矿的分离结晶或作为源区的残留矿物有关. Eu 正异常(图 7a),对应着斜长石作为粗面安山岩的主要造岩矿物. 粗面安山岩相对富集轻稀土元素(LREE),相对亏损重稀土元素(HREE).

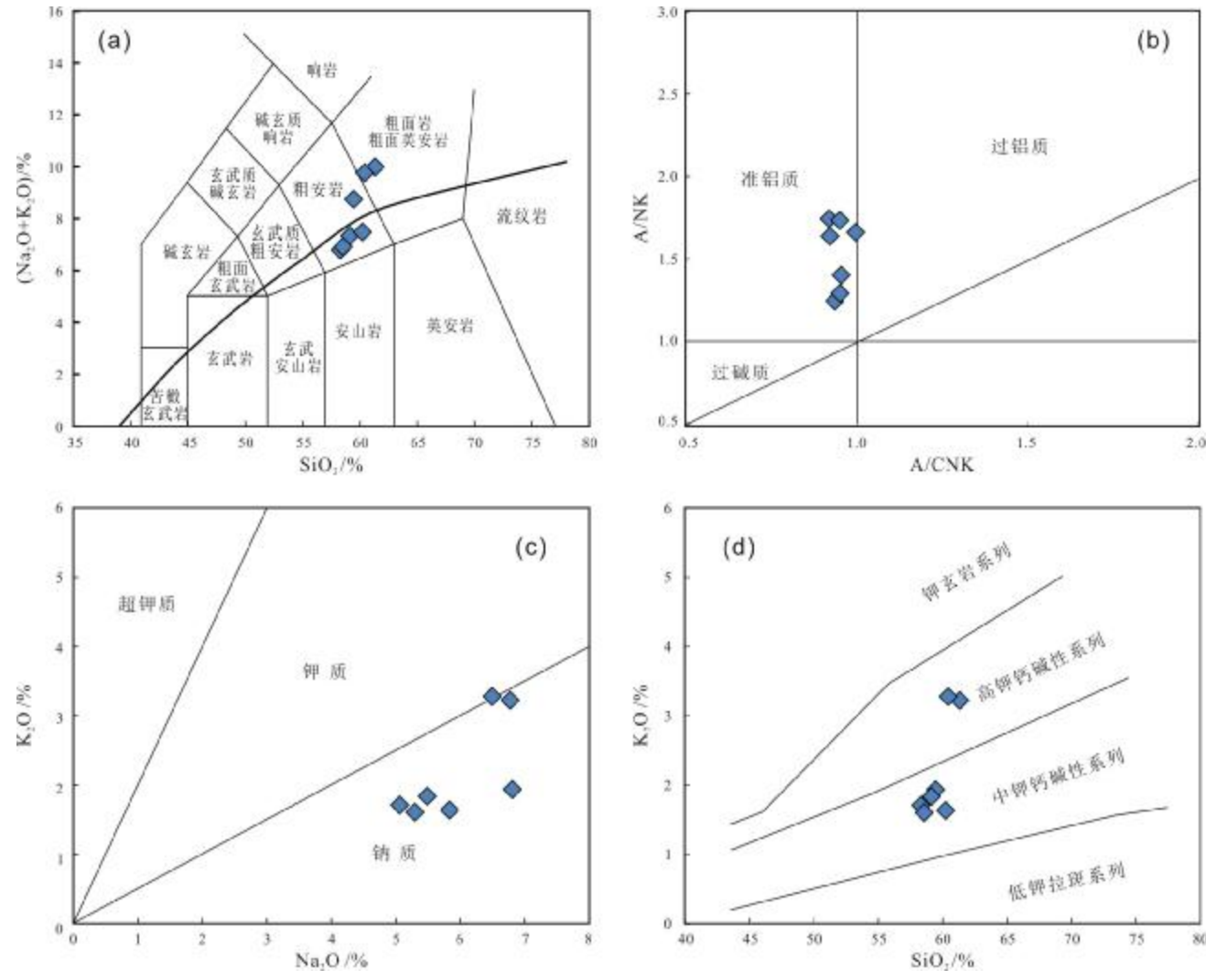


图 6 粗面安山岩地球化学图解
(据文献[21-23])

Fig. 6 The geochemical diagrams of trachyandesite
(From References [21-23])

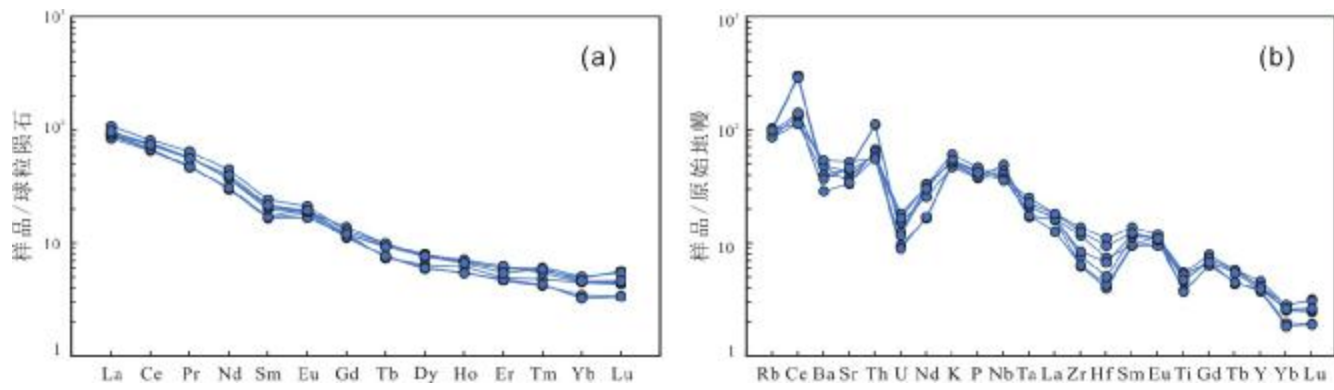


图 7 粗面安山岩稀土元素和微量元素标准化配分曲线

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of trachyandesite

表 4 五凤矿区粗面安山岩微量元素含量

Table 4 Trace element contents of the trachyandesite from Wufeng orefield

样品号	13WF13 -1	13WF13 -2	13WF13 -3	13WF13 -4	13WF13 -5	13WF13 -6	13WF13 -7
Li	6.96	9.71	10.80	13.60	12.30	6.45	5.73
Be	3.16	2.06	3.16	2.64	2.01	1.63	1.14
Sc	26.70	26.50	27.20	25.30	25.00	22.00	21.20
V	224.00	236.00	247.00	259.00	228.00	263.00	257.70
Cr	21.60	19.40	24.30	20.50	19.90	19.30	22.00
Co	29.67	27.08	33.98	31.00	33.20	26.01	29.88
Ni	27.80	29.50	28.20	36.00	29.40	25.33	34.98
Cu	20.14	13.29	10.35	21.57	22.29	16.56	16.72
Zn	95.53	117.85	95.53	141.06	115.17	78.48	72.23
Ga	20.40	20.00	23.80	22.30	22.00	19.80	19.00
Ge	0.93	0.90	1.07	1.18	1.10	0.78	0.72
As	5.54	4.75	3.89	5.66	5.05	4.03	3.62
Rb	53.30	60.10	51.60	57.80	51.80	61.70	59.70
Sr	774	786	974	861	808	737	709
Y	16.20	17.00	15.90	19.60	17.60	17.60	16.70
Zr	122.00	64.70	66.50	80.00	88.00	143.00	131.00
Nb	6.21	10.02	5.84	11.88	10.80	8.16	7.66
Mo	/	0.69	0.06	0.53	0.81	0.10	0.15
Cd	0.15	0.27	0.24	0.30	0.26	0.13	0.15
In	0.06	0.08	0.05	0.08	0.06	0.07	0.04
Sn	0.79	1.83	1.08	1.42	2.05	1.35	3.38
Sb	0.69	0.76	0.59	1.07	0.96	0.85	0.78
Cs	1.57	2.07	1.80	2.03	2.33	1.25	1.11
Ba	875.00	748	898	933	748	2000	1920
Hf	2.07	1.12	1.20	1.42	1.89	3.10	2.66
Ta	0.61	0.95	0.63	1.17	1.22	1.21	1.12
W	5.26	5.90	3.64	5.90	6.74	7.62	6.98
Tl	0.20	0.22	0.18	0.23	0.25	0.31	0.29
Pb	18.24	15.34	16.71	20.16	21.21	20.97	18.72
Th	2.28	3.18	3.81	3.81	4.28	3.19	2.93
U	0.68	0.77	0.69	0.87	1.06	0.92	0.93

含量单位:10⁻⁶.

样品亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, 富集 Rb、Ba 和 K 等大离子亲石元素 (LILE), Pb 表现出强烈富集特征(图 7b).

五凤粗面安山岩的 Rb/Sr 比值(平均 0.071)远低于大陆地壳的平均 Rb/Sr 比值(地壳均值 0.35),接近地幔值(均值 0.034), 指示母岩浆可能来自地幔. 此外,样品的 La/Nb 比值(均值 4.21)高于大陆地壳(均值 1.7),与地幔来源(La/Nb>1.7)一致^[27-28]. 粗面安山岩相对富集轻稀土元素、大离子亲石元素和强不相容元素(Th、U),相对亏损高场强元素(如 Nb、Ta、P、Ti),Ba/Nb(均值 144.71)和 Rb/Nb(均值 6.92)较高,与俯冲相关的弧岩岩浆具有相似的地球化学特征^[29-30]. 一般情况下认为在俯冲带地区,大离子亲石元素较容易随着水等流体从地壳转移到地幔当中;相反高场强元素在俯冲过程中由于溶解性极低故几乎没有流动性,从而表现出亏损^[31]. La/Nb 和 Ba/Nb 比值投点也落在弧状火山岩区域(图 8a),表明岩浆形成与板块俯冲密切相关. 其较高的(Hf/Sm)_N和(Ta/La)_N比值、Nb/Ta(均值 8.95)表明岩浆可能形成于与俯冲有关的交代地幔(图 8b). 同时,俯冲带地区火山岩 Nb、Ta 负异常和 LREE 的富集是由于大陆岩石圈地幔经历不同程度的富集所造成,并且混有古老俯冲地壳的物质成分^[32-34]. 以上地球化学特征表明岩浆可能源于地幔,其源区受到俯冲的壳源物质交代.

五凤地区粗面安山岩 Mg# 值较低(29.07~40.35),一般认为与下地壳部分熔融有关的岩浆产物的 Mg# 值小于 40^[37],但地球化学特征更支持粗面安山岩岩浆来自地幔的部分熔融. 在 Th/Nb–Zr 图解(图 9a)中样品表现出地壳混染的趋势. 粗面安山岩 K₂O/P₂O₅ 比值、K₂O/TiO₂ 比值变化较大,以及 K₂O/P₂O₅、K₂O/TiO₂ 与 SiO₂ 含量有良好的相关性(图 9b、c),表明粗面安山岩可能受到地壳混染. 同时粗面安山岩的 Ba/Rb 比值(12.45~32.41)高于大陆地壳的 Ba/Rb 比值(8~9),这与地壳混染作用机制一致^[27]. Mg# 值较低应为受到了较强的地壳混染作用的影响. 因此,五凤地区粗面安山岩应起源于地幔部分熔融,但受到地壳混染的影响.

根据元素在部分熔融和分离结晶过程中的行为差异,可以分析粗面安山岩的岩浆演化过程. Th 和 La 为强不相容元素, Nd 和 Yb 为中等不相容元素. 在部分熔融过程中,随着 Th 和 La 含量的增加, Th–Th/Nd 和

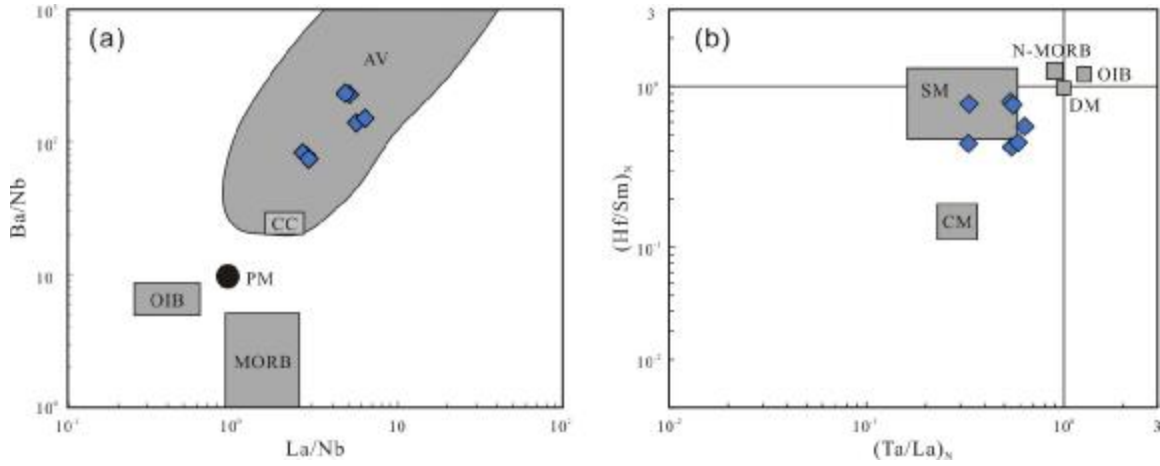


图 8 岩浆源区判别图
(据文献[35-36])

Fig. 8 Discrimination diagrams of magmatic source
(From References [35-36])

AV—岛弧火山岩(island arc volcanic); CC—大陆地壳(continental crust); OIB—洋岛玄武岩(ocean island basalt); PM—原始地幔(primitive mantle); MORB—大洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalt); N-MORB—正常大洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt); DM—亏损地幔(depleted mantle); SM—俯冲交代作用(subduction metasomatism); CM—碳酸岩交代作用(carbonatite metasomatism)

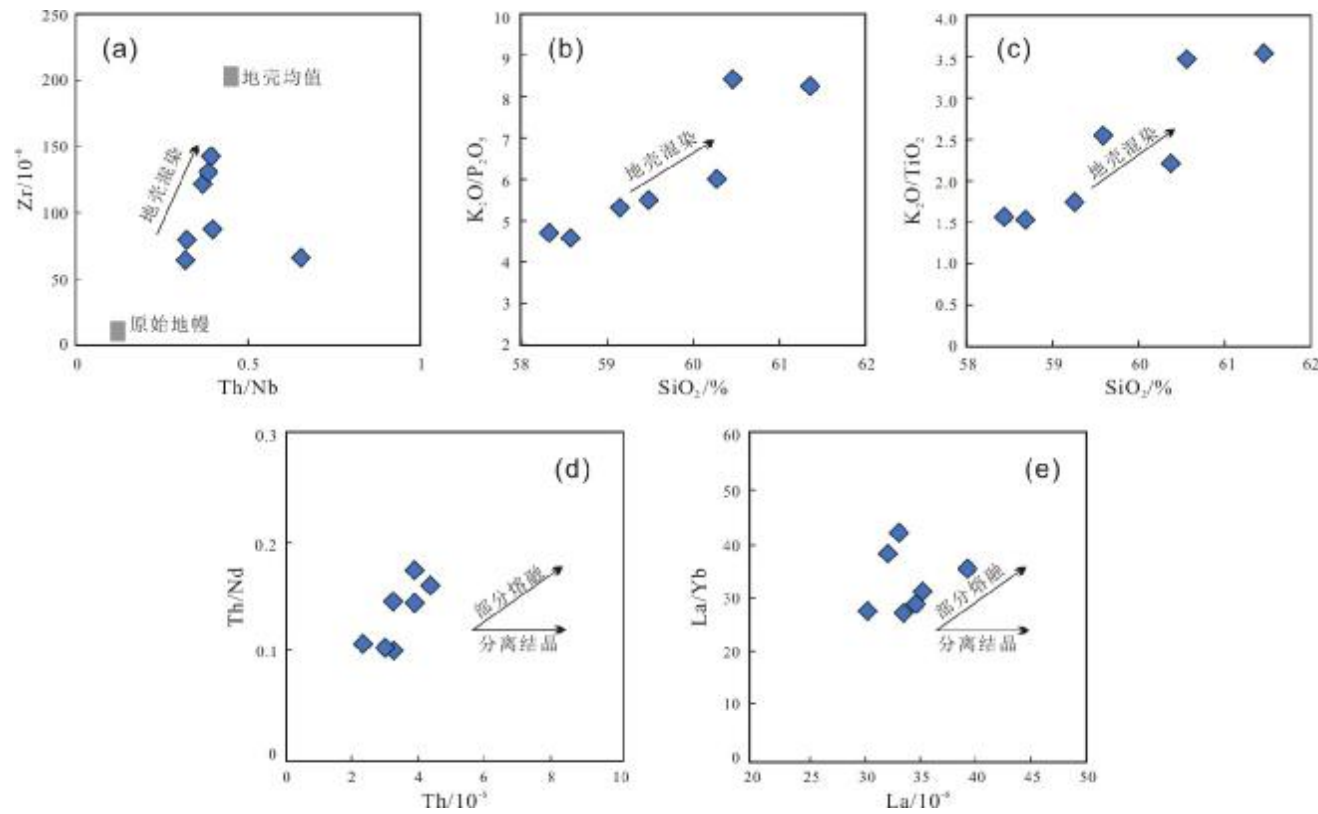


图 9 岩浆岩成因判别图解

Fig. 9 Genetic discrimination diagrams of magmatic rocks

$\text{La}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的比值也随之增加;而在分离结晶过程中随着 Th 和 La 含量的增加, $\text{Th}-\text{Th}/\text{Nd}$ 和 $\text{La}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的比值保持不变^[38-39]。粗面安山岩 Th 含量与 Th/Nd 值和 La 含量与 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值都呈现良好的正相关关系(图 9d、e),表明部分熔融在岩浆演化过程中发挥了重要作用。

5.2 构造背景

中国东北吉林延边五凤地区主要受古亚洲洋构造体制和环太平洋构造体制的控制。在晚三叠世末,中国东北部由古亚洲洋板块俯冲体制转换为环太平洋俯冲体制^[40]。有关古太平洋构造体系俯冲于欧亚大陆之下的开始时间一直存在争论,目前主要有两种观点,一种认为是晚三叠世^[41],而另一种认为是早、中侏罗世^[42-43];但就古太平洋板块最终在早、中侏罗世俯冲的认识是一致的。早侏罗世吉林延边地区进入了古太平洋构造域的俯冲作用,并发育大面积的与俯冲有关的岩浆岩。

由于高场强元素受各种地质作用的影响比较弱,因此能够真实反映源区的性质。在 $\text{Ba}/\text{Nb}-\text{La}/\text{Nb}$ 图解(图 8a)中,五凤粗面安山岩样品大部分落在火山弧区域。在 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 10a)中,五凤粗面安山岩样品投点大部分落于初始洋弧和晚期洋弧区域(LOP+IOP),部分落入大陆弧和碰撞后弧区域(CAP+)

PAP),指示大洋俯冲系统在时间上与早侏罗世古太平洋板块俯冲一致。 Zr/Y 值为 3.81~8.13,绝大部分数据符合大陆边缘安山岩 Zr/Y 值为 4~12 的地球化学特征^[44]。岩石 La/Nb 值为 2.93~5.70 (平均 4.21),总体符合活动大陆边缘 La/Nb 值高于 2 的地球化学特征。同时,在 $\text{Nb}/\text{Yb}-\text{Th}/\text{Yb}$ 图解(图 10b)中,研究区样品投点落入活动大陆边缘区域。

综上所述,笔者认为吉林省延边五凤地区粗面安山岩是岩石圈地幔重熔并混染俯冲壳源物质的结果,岩石形成过程中也经历了分离结晶作用。早侏罗世俯冲的古太平洋板块在弧下深度形成富集轻稀土、大离子亲石元素和亏损高场强元素的熔体/流体,并向上运移交代上覆岩石圈地幔形成富集地幔源区。随后,由于构造转换交代地幔发生部分熔融形成岩浆源区,岩浆在后期运移和喷发过程中发生分离结晶作用最终形成粗面安山岩。

6 结论

(1)五凤地区粗面安山岩喷发年龄为 $175.5 \pm 2.7 \text{ Ma}$,属于早侏罗世岩浆作用产物,早于晚侏罗世—早白垩世五凤矿区主要赋矿围岩金沟岭组安山岩,为五凤矿区赋矿围岩提供了新的时间限定。

(2)五凤地区粗面安山岩可能起源于地幔部分熔

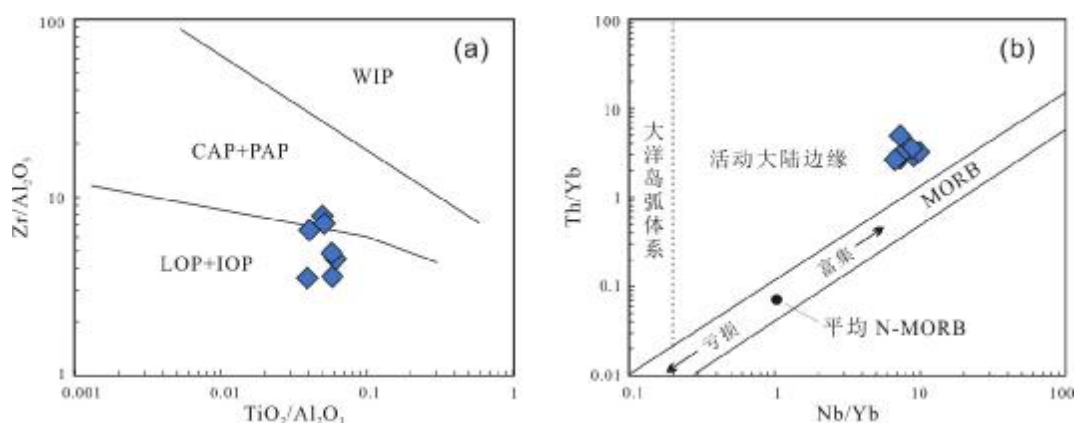


图 10 岩浆岩构造判别图解

(据文献[45-46])

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams of magmatic rocks

(From References [45-46])

WIP—板内钾质岩(within-plate potassic rock); CAP—大陆弧钾质岩(continental arc potassic rock); PAP—碰撞后弧钾质岩(post-collisional arc potassic rock); IOP—初始洋弧钾质岩(initial oceanic arc potassic rock); LOP—晚期洋弧钾质岩(late oceanic arc potassic rock); MORB—大洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalt); N-MORB—正常大洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt)

融,后经历了地壳混染,其形成与早侏罗世古太平洋板块向欧亚板块俯冲有关。

参考文献(References):

- [1]邵济安,牟保磊,何国琦,等.华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用[J].中国科学(D辑),1997,27(5): 390-394.
Shao J A, Mu B L, He G Q, et al. Geological effects in tectonic superposition of Paleo-Pacific domain and Paleo-Asian domain in northern part of North China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, 40(6): 634-640.
- [2]李锦铁.中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J].地质论评,1998,44(4): 339-347.
Li J Y. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas[J]. Geological Review, 1998, 44(4): 339-347.
- [3]唐克东,鞠楠,张大权,等.关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考[J].地质与资源,2022,31(3): 246-258, 330.
Tang K D, Ju N, Zhang D Q, et al. Implication of the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 246-258, 330.
- [4]冯亚洲,杨进辉,孙金凤,等.中生代古太平洋板块俯冲诱发华北克拉通破坏的物质记录[J].中国科学:地球科学,2020,50(5): 651-662.
Feng Y Z, Yang J H, Sun J F, et al. Material records for Mesozoic destruction of the North China Craton by subduction of the Paleo-Pacific slab[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63(5): 690-700.
- [5]赵春荆.吉黑东部构造格架及地壳演化[M].沈阳:辽宁大学出版社,1996: 136-138.
Zhao C J. Tectonic framework and crust evolution of eastern Jilin and Heilongjiang provinces [M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1996: 136-138.
- [6]芮宗瑶,张洪涛,王龙生,等.吉林延边地区斑岩型-浅成热液型金铜矿床[J].矿床地质,1995,14(2): 99-126.
Rui Z Y, Zhang H T, Wang L S, et al. Porphyry-epithermal copper-gold deposits in Yanbian area, Jilin Province[J]. Mineral Deposits, 1995, 14(2): 99-126.
- [7]Goldfarb R J, Mao J W, Qiu K F, et al. The great Yanshanian metallogenic event of eastern Asia: Consequences from one hundred million years of plate margin geodynamics[J]. Gondwana Research, 2021, 100: 223-250.
- [8]Goldfarb R, Qiu K F, Deng J, et al. Orogenic gold deposits of China [C]//Chang Z S, Goldfarb R J. Mineral Deposits of China. Society of Economic Geologists Special Publication, 2019: 263-324.
- [9]贾大成,胡瑞忠,冯本智,等.吉林延边地区中生代火山岩金铜成矿系列及区域成矿模式[J].长春科技大学学报,2001,31(3): 224-229.
Jia D C, Hu R Z, Feng B Z, et al. Gold-copper metallogenic series and metallogenic model of Mesozoic volcanic belt in Yanbian area, Jilin Province [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(3): 224-229.
- [10]Jia D C, Hu R Z, Lu Y, et al. Collision belt between the Khanka block and the North China block in the Yanbian region, Northeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(2): 211-219.
- [11]吉林省地质矿产局.吉林省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988: 202-205.
Bureau of Geology and Mineral Resources, Jilin Province. Regional geological records of Jilin Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 202-205. (in Chinese)
- [12]殷长建,彭玉鲸,靳克.中国东北东部中生代火山活动与泛太平洋板块[J].中国区域地质,2000,19(3): 303-311.
Yin C J, Peng Y J, Jin K. Mesozoic volcanism in the eastern part of Northeast China and Transpacific plate [J]. Regional Geology of China, 2000, 19(3): 303-311.
- [13]李超文,郭锋,范蔚茗,等.延吉地区晚中生代火山岩的 Ar-Ar 年代学格架及其大地构造意义[J].中国科学 D 辑: 地球科学,2007,37(3): 319-330.
Li C W, Guo F, Fan W M, et al. Ar-Ar geochronology of Late Mesozoic volcanic rocks from the Yanji area, NE China and tectonic implications[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(4): 505-518.
- [14]纪伟强.吉黑东部中生代晚期火山岩的年代学和地球化学[D].长春:吉林大学,2004.
Ji W Q. Chronology and geochemistry of late Mesozoic volcanic rocks in eastern Jilin and Heilongjiang Provinces [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [15]陈聪.延边东部晚古生代—中生代构造演化与区域成矿规律[D].长春:吉林大学,2017.
Chen C. Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution and regional metallogenic regularity of the eastern Yanbian area, NE China [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [16]门兰静,孙景贵,陈雷,等.延边地区五凤-五星山金矿床成矿流体与成矿作用研究[J].矿床地质,2016,35(2): 381-394.
Men L J, Sun J G, Chen L, et al. Ore-forming fluid and mineralization of Wufeng-Wuxingshan gold deposit, Yanbian area [J]. Mineral Deposits, 2016, 35(2): 381-394.
- [17]张艳斌.延边地区花岗岩岩浆活动的同位素地质年代学格架[D].长春:吉林大学,2002.
Zhang Y B. Isotopic geochronology framework of granitic magmatic activity in Yanbian area [D]. Changchun: Jilin University, 2002. (in Chinese)
- [18]张笑鸣.华北克拉通东北缘中生代岩浆事件——对多构造体系演化的制约[D].长春:吉林大学,2021.

- Zhang X M. Mesozoic magmatic events in the northeastern margin of the North China Craton: Constraints on the evolution of the multiple tectonic regimes[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [19]赵羽军, 孙景贵, 王清海, 等. 吉林延边地区浅成热液金(铜)矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光探针测年与成矿时代讨论[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 156–169.
- Zhao Y J, Sun J G, Wang Q H, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe dating and discussion on metallogenic epoch of epithermal Au-Cu deposit in Yanbian area of Jilin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 156–169.
- [20]刘金龙, 孙丰月, 林博磊, 等. 吉林延边闹枝金矿区粗面安山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1394–1404.
- Liu J L, Sun F Y, Lin B L, et al. Geochronology and geochemistry of trachyandesite of Naozhi gold deposit in Yanbian region, southern Jinlin Province and its geological significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1394–1404.
- [21]Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [22]Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- [23]Peccherillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63–81.
- [24]Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(7): 1217–1232.
- [25]周向斌, 李剑锋, 王可勇, 等. 吉林延边五星山-五凤金矿床碱长花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1215–1225.
- Zhou X B, Li J F, Wang K Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of alkali granite in Wuxingshan-wufeng gold deposit in Yanbian area, Jilin Province and its geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(6): 1215–1225.
- [26]赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 71–73, 122.
- Zhao Z H. Principle of trace element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1997: 71–73, 122. (in Chinese)
- [27]Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. Chemical Geology, 2000, 165(3/4): 197–213.
- [28]Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(11): 1959–1975.
- [29]Furukawa Y, Tatsumi Y. Melting of a subducting slab and production of high-Mg andesite magmas: Unusual magmatism in SW Japan at 13–15 Ma[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(15): 2271–2274.
- [30]Kamei A, Owada M, Nagao T, et al. High-Mg diorites derived from sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, southwest Japan arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions[J]. Lithos, 2004, 75(3/4): 359–371.
- [31]Mazzeo F C, D'Antonio M, Arienzo I, et al. Subduction-related enrichment of the Neapolitan volcanoes (Southern Italy) mantle source: New constraints on the characteristics of the slab-derived components[J]. Chemical Geology, 2014, 386: 165–183.
- [32]Santosh M, Teng X M, He X F, et al. Discovery of Neoproterozoic suprasubduction zone ophiolite suite from Yishui complex in the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2016, 38: 1–27.
- [33]Deng J, Wang C M, Bagas L, et al. Crustal architecture and metallogenesis in the south-eastern North China Craton [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182: 251–272.
- [34]Yang F, Santosh M, Kim S W. Mesozoic magmatism in the eastern North China Craton: insights on tectonic cycles associated with progressive craton destruction [J]. Gondwana Research, 2018, 60: 153–178.
- [35]Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. Chemical Geology, 1999, 157(1/2): 119–146.
- [36]La Flèche M R, Camiré G, Jenner G A. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Québec, Canada [J]. Chemical Geology, 1998, 148(3/4): 115–136.
- [37]Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993, 362(6416): 144–146.
- [38]Schiano P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(1): 297–312.
- [39]Turner S, Caulfield J, Turner M, et al. Recent contribution of sediments and fluids to the mantle's volatile budget [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(1): 50–54.
- [40]赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996: 1–186.
- Zhao C J, Peng Y J, Dang Z X, et al. Tectonic framework and crust evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 1996: 1–186.

- Fu J H, Li S X, Xu L M, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936–946.
- [38] 李俊, 赵红格, 汪建, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中部三叠系延长组碎屑岩沉积环境及物源示踪[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022–11–26.
- Li J, Zhao H G, Wang J, et al. Sedimentary environment and provenance tracing of clastic rocks from the Triassic Yanchang Formation in the western margin of the Ordos Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022–11–26.

(上接第 11 页/Continued from Page 11)

- [31] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 173–180.
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholiths and related granite-porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2003, 32(2): 173–180.
- [32] 罗镇宽, 李俊建, 关康, 等. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(2): 82–85, 128.
- Luo Z K, Li J J, Guan K, et al. SHRIMP zircon U-Pb age of the granite at Baizhangzi gold field in Lingyuan, Liaoning Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(2): 82–85, 128.
- [33] 马芳, 穆治国, 刘玉琳. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义[J]. *地质论评*, 2004, 50(4): 360–364.
- Ma F, Mu Z G, Liu Y L. Geochronology and geologic significance of the orbicular dioritic rocks in Luanping, Hebei Province[J]. *Geological Review*, 2004, 50(4): 360–364.
- [34] 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 华北地块北缘晚古生代–中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 625–638.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J, et al. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 625–638.
- [35] 田伟, 陈斌, 刘超群, 等. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 583–590.
- Tian W, Chen B, Liu C Q, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 583–590.
- [36] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a Late Palaeozoic active continental margin[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(2): 451–463.

(上接第 23 页/Continued from Page 23)

- [41] 彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 等. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换[J]. *地质与资源*, 2012, 21(3): 261–265.
- Peng Y J, Qi C D, Zhou X D, et al. Transition from Paleo-Asian Ocean domain to circum-Pacific Ocean domain for the Ji-Hei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(3): 261–265.
- [42] Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 392–402.
- [43] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1–30.
- [44] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23(1/2): 1–18.
- [45] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33–47.
- [46] Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-science Reviews*, 2014, 131: 49–87.