

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.721>



张广才岭地块早一中二叠世镁铁质侵入岩体的年代学、地球化学及岩石成因

冯光英¹, 刘 桑², 牛晓露¹, 杨经绥¹

1. 地幔研究中心, 国土资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西西安 710069

摘要: 双凤山基性侵入岩体位于松嫩—张广才岭地块南缘, 其岩石组成主要为橄榄辉长岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年显示该岩体形成于 279 ± 4 Ma。岩石矿物组成主要为橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、高 An 值 (80.1~87.9) 斜长石以及以反应边形式存在的角闪石, 矿物学特征指示其母岩浆为经历过充分流体交代的富水岩浆。全岩主微量元素组成揭示其源区物质组成为石榴子石二辉橄榄岩, 部分熔融程度约 20%, 岩浆演化过程中经历了斜长石堆晶作用以及斜方辉石的结晶分异作用。全岩 Sr-Nd 同位素及锆石 Hf 同位素研究显示其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7052 \sim 0.7061$, 并具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (0.9~1.3) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (0~10.2), 表明其来源于亏损的地幔源区, 并且岩浆上升过程中没有经历明显的地壳混染。微量元素和同位素特征综合反映岩浆源区经历了古亚洲洋俯冲沉积物熔体和流体交代作用的改造, 但起主导作用的是流体。其地球化学特征总体显示 MORB 以及弧型玄武岩过渡的特征, 暗示其形成于弧后伸展环境。研究区基性侵入岩地幔源区的不均一性主要受到古亚洲洋多期次俯冲作用析出熔/流体对上覆地幔楔不同程度的改造。

关键词: 早—中二叠世; 松嫩—张广才岭地块; 镁铁质侵入岩; 岩石成因; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)04-1293-14

收稿日期: 2017-12-20

Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Early-Middle Permian Mafic Intrusion in Zhangguangcai Range, China

Feng Guangying¹, Liu Shen², Niu Xiaolu¹, Yang Jingsui¹

1. Center for Advanced Research on Mantle (CARMA), Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The Shuangfengshan mafic intrusion crops out in the southern margin of the Songnen-Zhangguangcai range. It is predominantly made of olivine gabbro, which yielded a crystallization age of 279 ± 4 Ma (Early-Middle Permian). These rocks consist mainly of olivine, pyroxene, high-An (80.1–87.9) plagioclase and hornblende as reaction rim. The features of these minerals indicate a high- H_2O or water-saturated parental magma which experienced fluid metasomatism in the mantle source. Major and trace elements studies suggest that the mafic magma was derived from partial melting ($\sim 20\%$) of depleted garnet-lherzolite mantle source. Variable degrees of plagioclase accumulation and orthopyroxene crystal fractionation occurred in the process of magma evolution. They are also characterized by relatively low Sr isotopic ratio (0.7052–0.7061), positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (0.9–1.3) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (0–10.2) values, confirming that the Shuangfengshan mafic magma was derived from depleted mantle

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41773029, 41672063, 41373028, 41573022, 41720104009, 41373029); 地质调查项目 (No. DD20160023-01); 国土资源部公益性行业专项项目 (No. 201511022)。

作者简介: 冯光英 (1983–), 女, 副研究员, 博士, 从事岩浆岩及地幔橄榄岩岩石学与地球化学研究。ORCID: 0000-0002-2399-375X。

E-mail: fengguangying198@163.com

引用格式: 冯光英, 刘桑, 牛晓露, 等, 2018. 张广才岭地块早—中二叠世镁铁质侵入岩体的年代学、地球化学及岩石成因. 地球科学, 43(4): 1293–1306.

source and apparent crustal contamination was not found during magma upwelling. Combining trace elemental and isotopic results suggest that the parental magmas were likely derived from mantle wedge metasomatized by sedimentary melt and fluid from the subducted Paleo-Asian slab. Moreover, these rocks display transitional properties of MORB and arc basalt, conforming that the studied olivine gabbros were probably formed in back-arc extensional environment. And the mantle heterogeneity beneath the studied area was probably reduced by the multi-stage Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean.

Key words: Early-Middle Permian; Songnen-Zhangguangcai range; mafic intrusion; petrogenesis; geochemistry.

板块俯冲是地壳物质进入地幔的主要动力学机制,同时也是造成地幔不均一性的主要地质过程(Hofmann, 1997; 赵振华等,2004; O'Neill and Jenner, 2012; 赵子福等,2015).俯冲板片脱水形成的熔/流体交代地幔楔形成的岩浆岩,特别是镁铁质侵入岩,携带了大量地幔信息,其地球化学特征同地幔源区组成、熔融条件(温度、压力以及含水性)、岩浆演化

过程(如部分熔融作用、熔体迁移及堆晶作用以及不同程度的同化混染和分离结晶作用)有关(Duncan, 1987).因此,探讨其岩石成因对于反演地幔源区性质、构造环境演化、壳幔相互作用等地球动力学过程具有重要意义(Polat *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2013).

兴蒙造山带属于中亚造山带的东段(图 1a),是由多个微陆块拼合而成的构造堆叠区(图 1b),古生

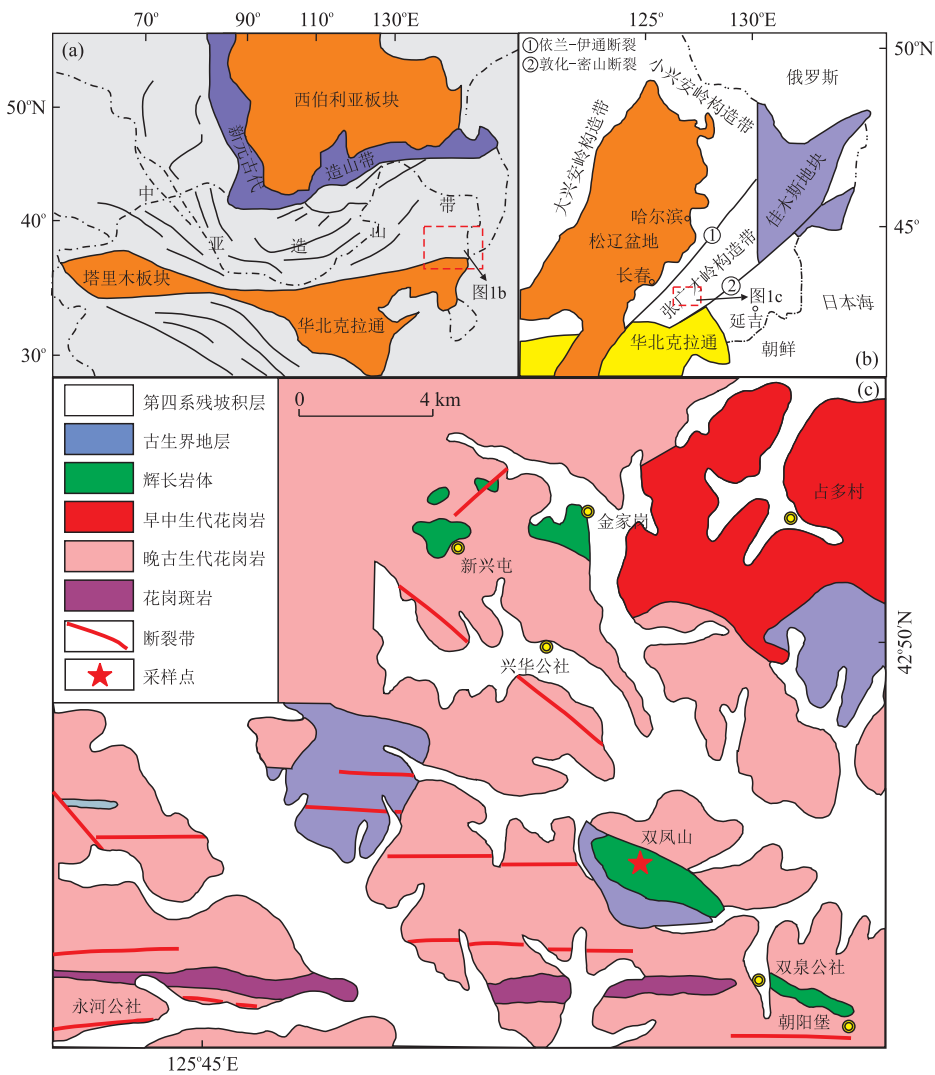


图 1 中亚造山带(a)及东北地区(b)构造简图;双凤山镁铁质侵入岩区域地质简图(c)

Fig.1 Simplified tectonic maps of the Central Asian orogenic belt (a) and Northeast China (b) and simplified geological map of the studied area (c)

图 b 底图据 Guo *et al.* (2016); 图 c 据吉林省地质局(1978)编区域地质调查报告辽源市幅

代期间主要受古亚洲洋演化的影响.现有研究表明,古亚洲洋经历了多期次俯冲作用(Windley *et al.*, 2007; 郭锋等, 2009),造成多个微陆块之间的拼合,其中演化历史较为复杂也最具争议的是松嫩—张广才岭地块与佳木斯地块之间的裂解和拼合(Zhou *et al.*, 2009; 许文良等, 2012; Ge *et al.*, 2016).早二叠世佳木斯地块东缘发育一套玄武岩—玄武安山岩—安山岩—英安岩组合(孟恩等, 2008; Meng *et al.*, 2011),而松嫩—张广才岭地块之上发育一套玄武岩—流纹岩组合,具有典型的双峰式火山岩组合特征,同时期花岗岩不发育.前人对这些火山岩的空间展布以及地球化学特征进行了详细研究,并对研究区的构造演化背景进行了制约(许文良等, 2012),但对同时期镁铁质侵入岩的精细年代学研究、地幔源区矿物组成、地幔交代方式、俯冲板片的不同端元组分(洋壳、沉积物、熔体和流体等)对岩浆源区的可能贡献等问题未做深入探讨,这必将在一定程度上制约对该地区早二叠世岩浆岩成因、构造背景以及地幔源区性质及演化等科学问题的讨论和全面认识.

在松嫩—张广才岭构造带南端,吉林省海龙镇北部与磐石市的交接地带,沿北西向分布一个基性岩带,由大小十多个岩体组成,其中双凤山岩体规模

最大.本文对该岩体进行了详细的矿物化学、年代学、元素地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素研究,讨论了其岩浆演化过程、地幔源区性质以及壳幔相互作用,在前人研究基础上为兴蒙造山带的构造演化及地幔源区演化提供了新的科学依据.

1 区域地质背景和岩相学特征

兴蒙造山带位于中亚造山带东段,夹持于北部的西伯利亚板块和南部的华北板块之间,是一个古生代到中生代期间由多个微陆块拼合而形成的构造堆叠区(Sengör *et al.*, 1993; 赵硕等, 2016),这些微陆块包括西北部的额尔古纳地块和兴安地块,中部的松嫩—张广才岭地块以及东部的佳木斯地块和兴凯地块.松嫩—张广才岭地块包括北部的小兴安岭构造带、中部的松辽盆地以及东部的张广才岭构造带(Liu *et al.*, 2010),其东西两侧分别以嘉荫—牡丹江断裂和黑河—嫩江断裂为界,与佳木斯地块和兴安地块相连(叶茂等, 1994; 吴福元等, 1995).张广才岭构造带为佳木斯地块与松嫩地块的俯冲—碰撞造山带,其基底较为复杂,除前寒武纪基底外,还保留了早古生代、石炭—二叠纪的地层记录(邵济安等, 2013).

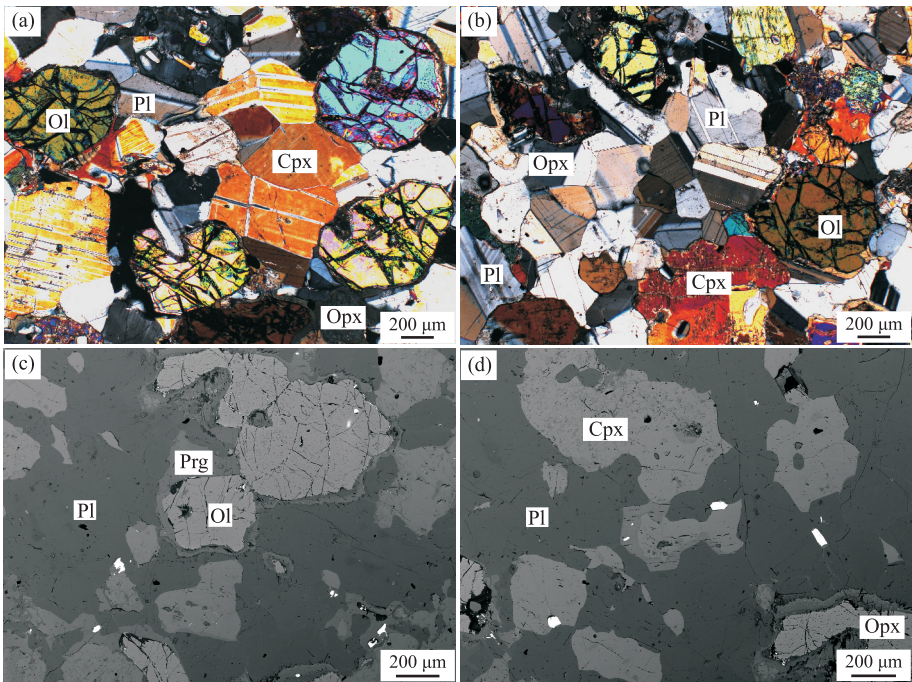


图 2 双凤山橄榄辉长岩显微照片(a,b)及电子探针背散射电子图像(c,d)

Fig.2 Photomicrographs (a,b) and back-scattered electron images (c,d) of the Shuangfengshan olivine gabbros
Ol.橄榄石; Pl.斜长石; Cpx.单斜辉石; Opx.斜方辉石; Prg.韭闪石

双凤山岩体位于松嫩—张广才岭构造带西南端,岩体面积约 3 km²,研究区侵入岩发育,主要为晚古生代花岗岩(孟杰等,2017),并有少量早古生代花岗斑岩以及侏罗纪钾长花岗岩。地层零星分布,双凤山橄榄辉长岩岩体中有较多的下石炭统鹿圈屯组含石墨变粒岩、角岩及变质砂岩捕虏体,边部多、内部少,大者直径可达 100 m。岩体内部晚期构造比较发育,主要为东西向断裂,均被脉岩充填,另外有北西向及近南北向断层(图 1c)。

双凤山基性侵入岩体具有一定的分异现象,根据钻孔资料,其岩相大致包括辉长岩、苏长岩和橄榄辉长岩。地表所见橄榄辉长岩为深灰绿色—灰黑色,中细至粗粒辉长结构,块状构造。主要矿物组成为斜长石(>50%),具有明显的聚片双晶和卡纳联合双晶;其次为单斜辉石(20%~25%),主要为他形,充填在橄榄石和斜长石颗粒之间。斜方辉石和橄榄石含量较低,斜方辉石含量约 5%,橄榄石含量约 5%~10%。橄榄石呈粒状、轻微蚀变呈网状结构(图 2)。此外,角闪石仅作为橄榄石和单斜辉石的反应边出现,体积分数小于 3%(图 2c, 2d)。上述结构特征表明,双凤山橄榄辉长岩为典型的堆晶辉长岩体,其矿物结晶顺序为橄榄石—斜长石—辉石—角闪石。

2 分析方法

电子探针分析在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室进行,仪器型号为 JXA-8100,分析过程按照国家电子探针定量分析标准(GB/T 15617-2002)。仪器工作条件:加速电压 15 kV,探针束流 20 nA,束斑直径 5 μm,峰值计数时间设定为 20 s,背景计数时间设定为 10 s。

主微量元素分析在国家地质实验测试中心完成,其中主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定(型号:PE300D),并采用等离子光谱和化学法测定进行互检。微量元素和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定(型号:PW4400),同时分析 2 个国家标样(GSR3 和 GSR5)和 3 个平行样以保证分析结果的准确度。

锆石分选在河北省地矿局廊坊区调队实验室完成,采用常规粉碎、浮选和电磁选方法进行分选。锆石阴极发光(CL)照相在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学微区阴极发光实验室(SEM-CL-EDS)完成。锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所 LA-MC-ICPMS 实验室完成。定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最

新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm。激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气,激光剥蚀束斑直径为 24~44 μm,通常采用 32 μm,激光能量密度为 10 J/cm²,频率为 8 Hz。锆石中的 U 和 Pb 在 8 000 °C 以上的高温等离子体中发生离子化,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素,从而进行锆石微区 U-Pb 同位素原位同时测定。每个分析点的气体背景采集时间为 4 s,信号采集时间为 23 s。数据分析采用国际上通用的锆石标样 91500 作为参考物质进行仪器的最佳化,数据分析采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2008)和 LudwigKR 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2003);年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏。锆石 Hf 同位素分析采用 Neptune Plus 多接收等离子质谱和 Compex pro.193 nm 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 44 μm 或 32 μm,测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ-1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2009)。分析过程中锆石标准 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282 015±8(2σ, n=10),与文献报道值(Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等,2009)在误差范围内完全一致。

Sr-Nd 同位素分析在南京大学现代分析中心由英国制造的 VG354 多接收质谱仪上完成,实验测定采用美国 NBS987Sr 同位素标准:以 ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.119 4 为标准化值,测得 ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0.710 224 ± 8(n=10),对美国 LaJolla Nd 同位素标准样中 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的测定值为 0.511 860(2σ, n=8);标准化值采用 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 校正(Wang *et al.*, 2007)。详细的 Rb-Sr、Sm-Nd 化学制备,质谱测定方法以及各类标准样品测定结果见 Wang *et al.*(2007b)。

3 分析结果

3.1 矿物组成分析结果

双凤山橄榄辉长岩中代表性橄榄石电子探针分析结果见附表 1。橄榄石端元组分 Fo 为 74~76。与全岩 Mg[#](76~77)相比略低,这种解耦可能同岩浆房上升至地壳深度时橄榄石的堆晶作用有关(Guo *et al.*, 2015)。斜长石矿物成分较为简单,

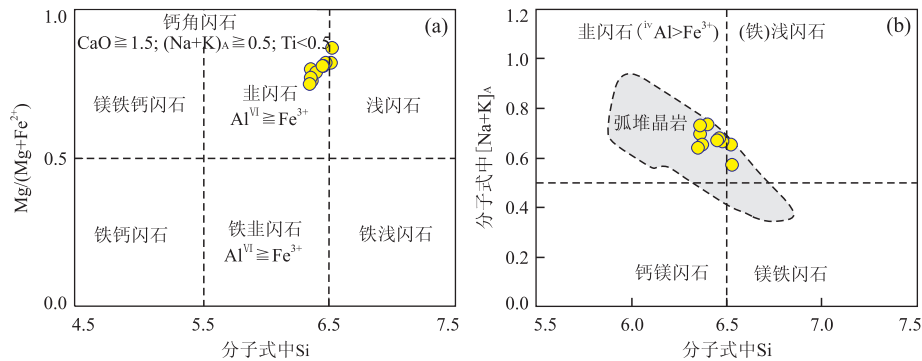


图 3 双凤山橄榄辉长岩角闪石分类

Fig.3 Classification of hornblende of the Shuangfengshan olivine gabbros

图 a 底图据文献 Leake *et al.*(1997);图 b 底图据 Beard and Barker(1989)

SiO₂ 含量变化于 47.5%~49.6% 之间, CaO 含量较高, 为 15.9%~17.8%, 其 An 端元组分含量较高 (80.1~87.9)(附表 1), 全部属于培长石。

单斜辉石的 MgO 含量为 14.68%~15.14%, Mg[#] = 77~80, Al₂O₃ = 2.30%~3.20%, En 含量为 42.94~44.23, Fs 和 Wo 含量分别变化于 10.53~12.70 和 43.87~46.31(附表 1), 属于透辉石, 或者普通辉石。斜方辉石 MgO 含量为 25.59%~28.56%, Mg[#] = 75~79, Al₂O₃ = 1.42%~2.09%, 其 En 端元含量变化为 72.95~77.05(附表 1), 主要为斜顽辉石。

角闪石主要以交代橄榄石和单斜辉石的反应边方式产出, SiO₂ 含量变化于 43.32%~45.51%, CaO 含量为 11.70%~12.83%, Na₂O 和 K₂O 含量分别为 1.80%~2.39% 和 0.01%~1.02%(附表 1)。采用 Leake *et al.*(1997) 角闪石的分类方案和标准分子式 AB₂C₅T₈O₂₂(OH)₂, 根据 B 位的 Ca 含量和 Na 含量, 判断双凤山橄榄辉长岩中角闪石全部为钙质角闪石, 再根据 Mg/(Mg+Fe²⁺) 比值和 T 位的 Si 含量对钙质角闪石进一步分类, 全部属于韭闪石(图 3)。

3.2 锆石 U-Pb 年代学分析结果及锆石 Lu-Hf 同位素组成

从 >40 kg 橄榄辉长岩中挑选出约 200 粒锆石, 锆石颗粒较小(50~100 μm), 阴极发光下具有清晰的震荡环带, 且所有测试锆石的 Th/U 比值均大于 0.1(0.40~2.10)(附表 2), 为典型的岩浆锆石。15 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 279±4 Ma(图 4), 代表该岩体的结晶年龄, 表明双凤山橄榄辉长岩为早—中二叠世岩浆活动的产物, 该年龄与 Guo *et al.*(2016) 报道的延吉地区前山辉长岩的年龄(273±2 Ma)较为一致。

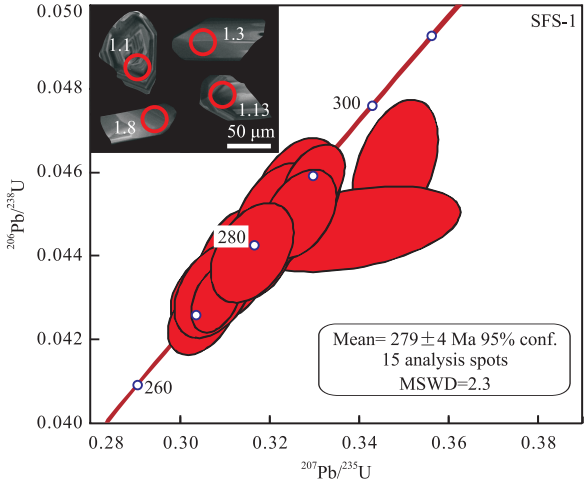


图 4 双凤山橄榄辉长岩代表性锆石阴极发光图及 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄

Fig.4 Representative cathodoluminescence (CL) images and the LA-ICP-MS U-Pb age for the zircon grains from the Shuangfengshan olivine gabbros

双凤山橄榄辉长岩锆石 Lu-Hf 同位素组成见附表 3。所有的锆石都具有较低的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值(除点 9 以外都低于 0.002), 暗示锆石在形成之后具有较少的放射成因 Hf 同位素积累(杨进辉等, 2006), 因此, 所测定的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本上可代表其形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007)。锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值范围为 0.282 607~0.282 896, ε_{Hf}(t) 为正值 (0~10.2), 平均值为 4.7, Hf 同位素模式年龄 T_{DM1} = 514~926 Ma, 平均值为 731 Ma。

3.3 主微量元素组成

双凤山橄榄辉长岩主微量元素组成见附表 4。所有样品都具有较低的 SiO₂ 含量(45.46%~46.45%), 在 TAS 图解中落入苦橄玄武岩区(图 5a), 同时具有较低的 K₂O 含量(0.06%~0.07%), 属于低钾拉斑系

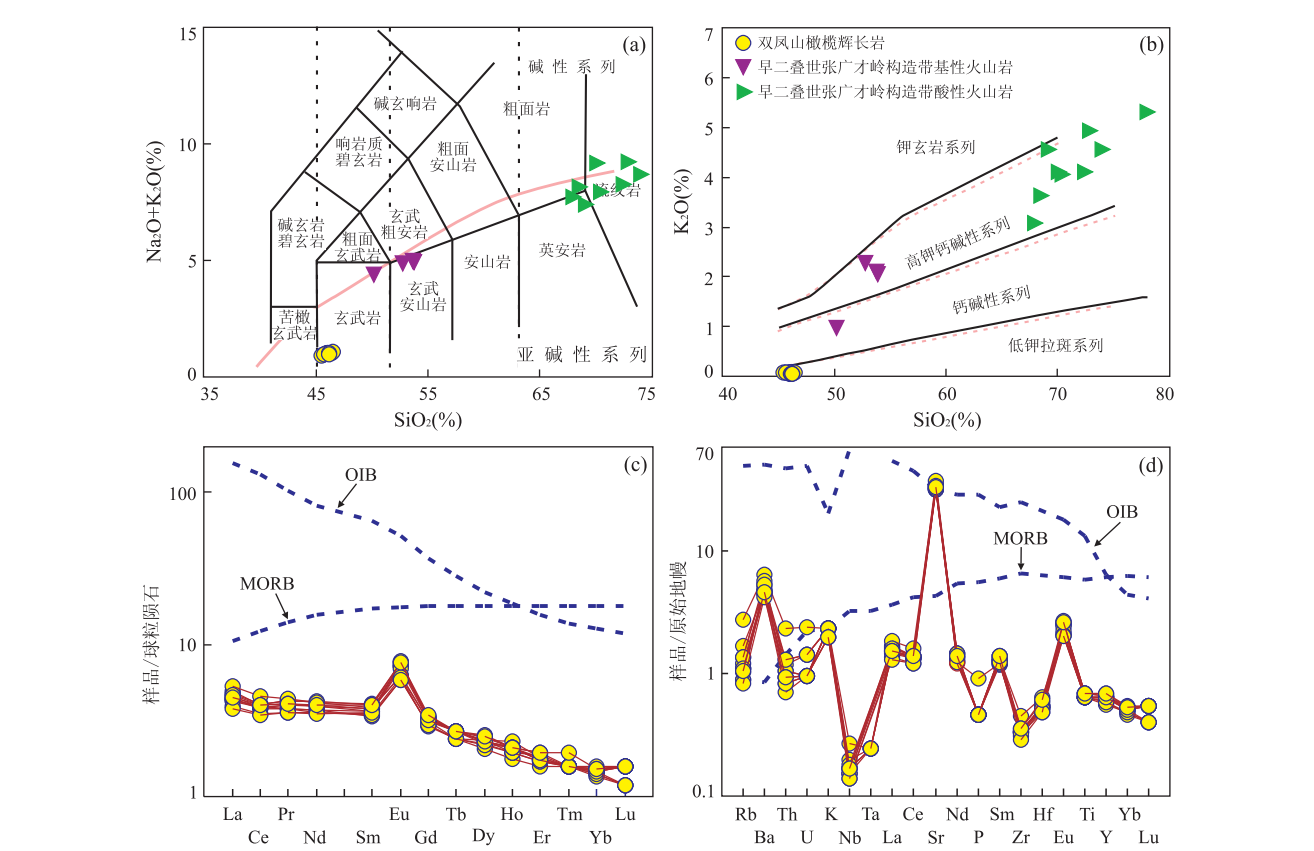


图 5 双凤山橄榄辉长岩 TAS 图解(a)、SiO₂-K₂O 图解(b)、稀土元素配分模式图(c)及微量元素原始地幔标准化图解(d)
Fig.5 TAS (a), SiO₂ vs. K₂O (b), chondrite-normalized REE patterns (c) and primitive mantle-normalized spider diagrams (d) of the Shuangfengshan olivine gabbros

张广才岭构造带早二叠世基性火山岩和酸性火山岩主量元素数据引自 Meng *et al.* (2011);图 d 据 Sun and McDonough (1989)

列(图 5b), $\text{Na}_2\text{O} = 0.88\% \sim 1.03\%$, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, MgO 含量较高($8.80\% \sim 11.98\%$), $\text{Mg}^\# = 75 \sim 76$.此外, Al_2O_3 含量介于 $18.31\% \sim 20.81\%$, 而 $\text{CaO} = 13.60\% \sim 15.21\%$.

双凤山橄榄辉长岩具有较为一致的稀土元素和其他微量元素组成,在稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 5c),表现出明显的 Eu 正异常, $\text{Eu} = 1.78 \sim 2.28$,轻稀土略富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.58 \sim 3.48$.微量元素蛛网图中(图 5d),富集大离子亲石元素(Ba、Sr、K),而亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti).在主微量元素与 MgO 含量协变关系图解中, MgO 与 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、Cr 呈负相关关系,而与 Fe_2O_3 呈正相关.

3.4 Sr-Nd 同位素组成

双凤山橄榄辉长岩代表性样品 Sr-Nd 同位素组成见附表 4,它们都具有较低的 Sr 同位素初始比值, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7052 \sim 0.7061$,以及正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($0.9 \sim 1.3$).相对于兴蒙造山带同期基性侵入岩,其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 较高,而 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低.

4 讨论

4.1 结晶分异与地壳混染

双凤山橄榄辉长岩具有较低的 SiO_2 含量($45.46\% \sim 46.45\%$),属于幔源岩浆岩,同时其 $\text{Mg}^\#$ ($76 \sim 77$) 较高,与原始岩浆($\text{Mg}^\# = 65 \sim 75$) 相近(邓晋福, 1987),表明橄榄辉长岩的岩浆演化程度较低.在元素协变图中(图略), MgO 同 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、Cr 具有明显的负相关,而同 Fe_2O_3 具有明显的正相关性,反映岩浆在演化过程中主要经历了斜方辉石的结晶分异.另外,双凤山橄榄辉长岩具有明显的 Eu 正异常和 Sr 正异常,表明岩浆演化过程中可能经历了斜长石的堆晶作用.通常情况下, Al_2O_3 、 Na_2O 和 $\text{Eu}/^*\text{Eu}$ 之间的相关性可以用来判别是否存在斜长石堆晶作用(Mitchell *et al.*, 1995; Zhong *et al.*, 2009).在图 6 中, Al_2O_3 与 Na_2O 以及 $\text{Eu}/^*\text{Eu}$ 之间都具有明显的正相关性,暗示斜长石堆晶作用在岩石形成过程中发挥了重要作用.但是,硅酸盐矿物堆晶及结晶分异作用对不相容元素

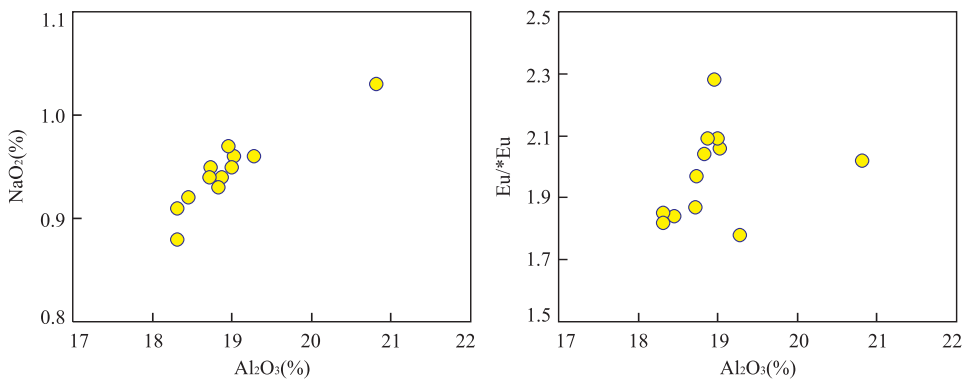


图 6 双凤山橄榄辉长岩 Al_2O_3 - Na_2O 以及 Al_2O_3 - Eu^*/Eu 图解

Fig.6 Al_2O_3 vs. Na_2O (a) and Al_2O_3 vs. Eu^*/Eu (b) diagrams of the Shuangfengshan olivine gabbros

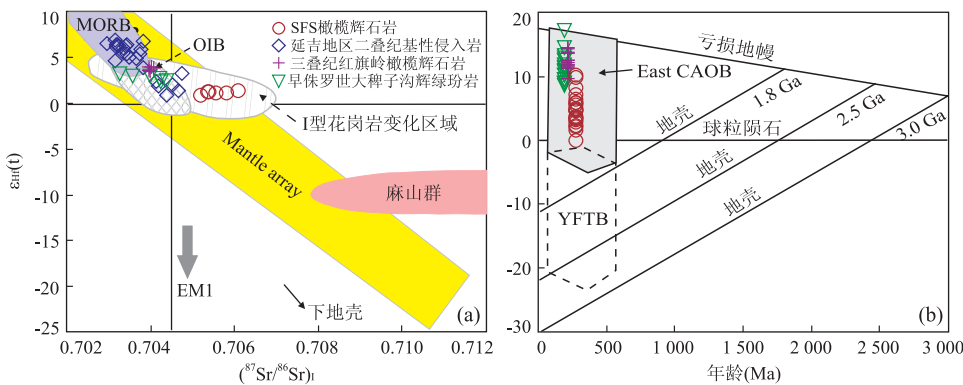


图 7 双凤山橄榄辉长岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成

Fig.7 Sr-Nd isotopic compositions of the Shuangfengshan olivine gabbros

延吉地区二叠纪基性侵入岩数据引自 Guo *et al.* (2016); 三叠纪红旗岭橄榄辉石岩数据引自冯光英等(2011); 早侏罗世大稗子沟辉绿玢岩数据来自作者未发表数据; East CAO, 中亚造山带东段; YFTB, 燕山褶皱系

的比值影响较小(Zhang *et al.*, 2009),因此,在地壳混染不明显 的情况下,通过不相容元素比值对地幔源区性质进行约束仍然可行.

同 MORB 相比,双凤山早二叠世橄榄辉长岩富集大离子亲石元素和 LREE,而亏损高场强元素,同时与张广才岭构造带其他二叠纪基性—超基性岩相比,研究区橄榄辉长岩具有相对富集的 Sr-Nd 同位素组成(图 7a),暗示岩浆源区经历了富集的过程或者岩浆在上升过程中受到地壳物质的混染.大陆地壳在成分上相对亏损 MgO,对于受到地壳混染的镁铁质岩浆,其 MgO 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 之间应具有负相关关系,而 MgO 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值之间应表现出正相关性,但是研究区橄榄辉长岩并不具有这种相关性,同时其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.705 2~0.706 1) 以及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (0.9~1.3) 变化范围都较小,暗示岩浆上升过程中没有受到明显的地壳物质混染.此外,双凤山橄榄辉长岩具有较低的 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值 (1.45~2.77),低于下地壳 (4.6),并远低于上地壳 $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ 比值

(28)(Taylor and McLennan, 1985),同时中上地壳混染会引起岩浆中 Th、U 含量的显著升高(Taylor and McLennan, 1985),双峰山橄榄辉长岩的 Th、U 含量相对 LREE 亏损(图 5d),这些都说明岩浆在上升过程中受到地壳混染的可能性较小.因此,该岩体所显示的主微量元素及同位素特征主要继承自地幔源区,可以用于反演地幔源区特征.

4.2 地幔源区性质及组成

双凤山橄榄辉长岩具有较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.705 2~0.706 1) 以及正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (0.9~1.3),同时具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (0~10.2),反映该岩体来源于亏损的地幔源区.但是同延吉地区二叠纪基性侵入岩(Guo *et al.*, 2016)相比(图 7a),双凤山橄榄辉长岩具有更为富集的 Sr-Nd 同位素组成,同松嫩—张广才岭地块三叠纪红旗岭橄榄辉石岩(冯光英等, 2011)以及早侏罗世大稗子沟辉绿玢岩(作者未刊)相比具有较为富集的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 7b),这种同位素变化的特征体现为地幔源区性质的不均一性.同时

双凤山橄榄辉长岩具有更老的 T_{DM1} , 反映其地幔源区从亏损地幔中分离出的时间较早, 此后伴随着古亚洲洋的多期次俯冲, 俯冲沉积物熔流体对地幔楔的改造程度逐渐增强. 同样的, 新疆东天山及北山古生代镁铁—超镁铁质岩地幔源区明显的 Sr-Nd-Hf 同位素高度不均一性也被认为同俯冲作用对地幔源区的改造密不可分(Su *et al.*, 2012).

镁铁质侵入岩由地幔二辉橄榄岩部分熔融形成, 稀土元素在地幔橄榄岩部分熔融过程中表现为中等不相容元素(Johnson, 1998), 其含量和比值主要受到地幔源区物质组成以及部分熔融程度的控制(Zhao and Zhou, 2007; Liu *et al.*, 2010), 因此可根据稀土元素的丰度和比值判断岩石的地幔源区组成和部分熔融程度. 部分熔融过程中, 由于尖晶石中 La、Sm 和 Yb 的分配系数相似($D_{\text{spinel/melt}} = 0.01$) (Mckenzie and O’Nions, 1991), 而石榴子石中 Yb 的分配系数明显高于 La 和 Sm, 因此, 伴随着石榴子石残留而形成的熔体具有低的 Yb 含量和高的 LREE/Yb 比值, 而尖晶石二辉橄榄岩地幔源区部分熔融则形成相对平坦的熔融趋势. 在 La/Yb-Sm/Yb 和 Gd/Yb-Dy/Yb 图解中, 双凤山橄榄辉长岩与石榴子石二辉橄榄岩部分熔融曲线相一致, 且部分熔融程度约为 20%(图 8).

4.3 地幔交代作用

斜长石 An 值取决于原始岩浆中 CaO、 Al_2O_3 和 H_2O 的含量, CaO/ Na_2O 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的比值, 以及原始岩浆的压力(Panjasawatwong *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2015). 因此, 岩浆成分、岩浆中的水饱和程度、结晶压力等都对斜长石的 An 值有控制作用. 岩浆成因的高 An 值斜长石(An80-100) 常出现在岛弧高铝玄武岩(Crawford *et al.*, 1987; Fournelle and Marsh, 1991) 以及洋内弧前环境下

发育的玻安岩(Danyushevsky *et al.*, 1997) 中, 此外, 大洋中脊玄武岩中也有产出高 An 值斜长石的实例(Sinton *et al.*, 1993). 实验研究表明高 An 值斜长石的母岩浆具有富水(水近饱和)、亏损(极高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) 的特征, 特别是对拉斑玄武岩的实验研究显示大多数高 An 值斜长石最适宜的结晶条件为 $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ Pa 且水饱和状态(Takagi *et al.*, 2005), 因此, 笔者推测其具有低钾拉斑系列属性的双凤山橄榄辉长岩中高 An 值(80.1~87.9, 平均值 85.5)斜长石的出现暗示地幔源区可能经历过充分的流体交代, 其较高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (14.63~16.05)以及 Al_2O_3 含量意味着源区经历过显著的岩浆抽取.

此外, 双凤山橄榄辉长岩富集大离子亲石元素 Ba、Sr 和 K, 而亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti, 如前所述, 研究区这种弧型微量元素特征跟地壳混染的关系不大, 而应该是源区受到俯冲板片熔体或者流体交代富集作用的影响. 俯冲组分主要包括俯冲沉积物、俯冲流体和俯冲洋壳(Tatsumi and Takahashi, 2006; Ge *et al.*, 2015). 俯冲洋壳部分熔融会产生埃达克质的岩石(Defant and Drummond, 1990), 因此, 可以排除俯冲洋壳对研究区橄榄辉长岩岩浆源区的直接贡献(曾志刚等, 2016). 此外, 研究表明, 洋壳俯冲过程中, 在弧下 80~130 km 深度, 蚀变玄武岩及其上覆沉积物发生脱水作用形成的流体相对富集水溶性元素(如大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE))和亏损水不溶性元素(如高场强元素(HFSE)). 这些流体交代上覆地幔楔形成蚀变橄榄岩(蛇纹石化和绿泥石化橄榄岩), 由该地幔源区部分熔融形成的大洋弧或大陆弧就具有弧型的微量元素分布特征(Peacock, 1993; Tatsumi and Eggins, 1995). 因此双凤山橄榄辉长

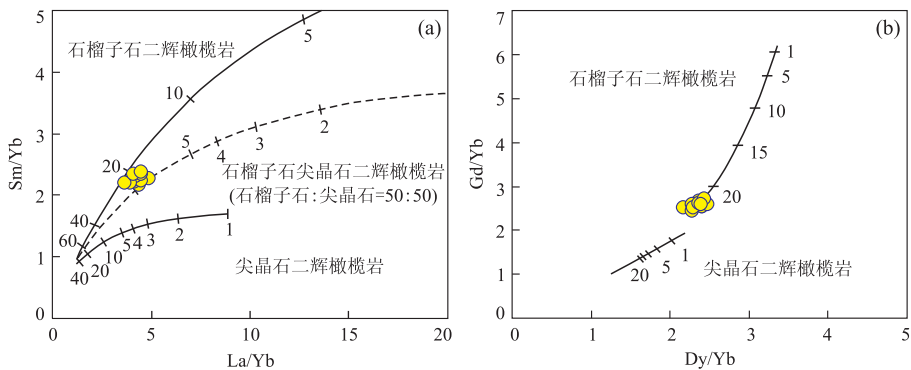


图 8 双凤山橄榄辉长岩 La/Yb-Sm/Yb (a)和 Gd/Yb-Dy/Yb (b)图解

Fig.8 La/Yb vs. Sm/Yb (a) and Gd/Yb vs. Dy/Yb (b) diagrams of the Shuangfengshan olivine gabbros

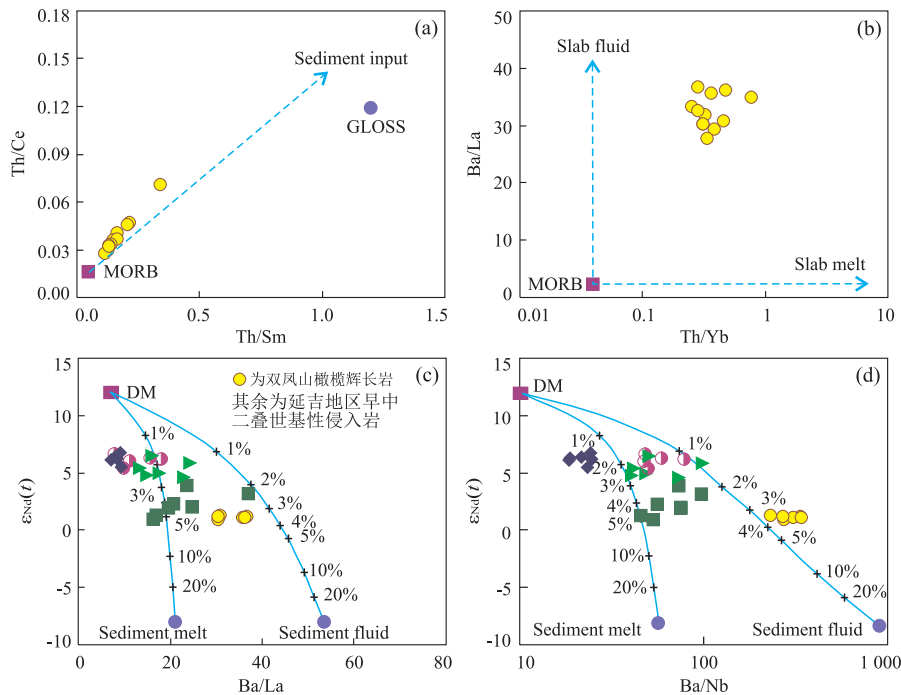


图 9 双凤山橄榄辉长岩 Th/Sm-Th/Ce (a), Th/Yb-Ba/La (b), Ba/La- $\epsilon_{Nd}(t)$ (c) 和 Ba/Nb- $\epsilon_{Nd}(t)$ (d) 图解
Fig.9 Th/Sm vs. Th/Ce (a), Th/Yb vs. Ba/La (b), Ba/La- $\epsilon_{Nd}(t)$ (c) and Ba/Nb- $\epsilon_{Nd}(t)$ diagrams of the Shuangfengshan olivine gabbros

亏损地幔(DM)的 Nd 同位素组成据贺根山蛇绿岩套中基性岩组分及内蒙古大石寨玄武岩(Miao *et al.*, 2008;郭锋等,2009);沉积物熔/流体的 Nd 同位素组成据全球海洋沉积物(GLOSS, Plank and Langmuir, 1998);MORB 据 Sun and McDonough(1989);延吉地区早中二叠世基性侵入岩据 Guo *et al.*(2016);其他参数参见 Guo *et al.*(2016)

岩所表现出的地球化学特征可能同洋壳俯冲过程中俯冲沉积物以及蚀变玄武岩脱水形成的流体的交代作用有关.此外,俯冲沉积物熔体也有可能对源区产生重要影响.Th、Ba 和 REEs 在俯冲带熔体和流体中显示明显不同的地球化学行为,同时由于这些元素在硅酸盐矿物中分配系数极低(远低于 1.0;Rollinson, 1993),因此矿物堆晶作用对其比值产生的影响可以忽略.双凤山橄榄辉长岩 Th/Ce 和 Th/Sm 的变化趋势以及高于 MORB 的 Th/Yb 和 Ba/La 比值指示地幔源区经历了俯冲沉积物熔体和流体的加入(图 9a, 9b).此外,通过 Ba/Nb 和 Ba/La 同 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间的变化趋势,笔者进一步对地幔源区熔体和流体加入的比例进行限制,如图所示(图 9c, 9d),俯冲沉积物熔体和流体可能都参与了对地幔源区的改造,但流体起主导作用.

此外,LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示双凤山橄榄辉长岩中捕获锆石的年龄介于 423~438 Ma,该年龄同内蒙古大石寨玄武岩以及内蒙古岛弧闪长岩—石英闪长岩的年龄(451~440 Ma)接近(Jian *et al.*, 2008;郭锋等, 2009),同时与张广才岭地块南缘的早古生代张家屯英云闪长岩(443±

5 Ma)年龄较为一致(裴福萍等,2014; Pei *et al.*, 2016).这些锆石年龄都记录了早古生代古亚洲洋俯冲活动对研究区岩浆活动的影响,同时该期俯冲过程产生的熔流体很可能参与了地幔源区的改造,而且改造作用随着地幔源区的演化不断增强.

4.4 岩石成因及地质意义

不相容元素组成特征可以对基性岩的形成环境进行限制.在 Th-Ta-Hf/3 以及 Al_2O_3 -MgO-FeO^T 图解中(图 10),双凤山橄榄辉长岩都显示具有 MORB 以及弧型玄武岩过渡特征,这些特征通常被认为同弧前(Isu-Bonin)或弧后(Lesser Caucasus 和 Mariana)的构造环境直接相关.不同的是,俯冲带弧前环境形成的岩浆岩通常显示变化范围较大的主量元素特征,并形成玻安岩—高镁安山岩—安山岩—长英质岩岩浆岩系列(Wang *et al.*, 2007),而目前在松嫩—张广才岭地块尚未有该类型岩石的报道,主要的岩浆岩类型为双峰式火山岩以及基性—超基性岩,同时双凤山橄榄辉长岩具有较为一致的主量元素组成,因此其形成环境不可能为弧前环境,而更可能为弧后环境.

早二叠世佳木斯地块东缘发育一套中钾钙碱性

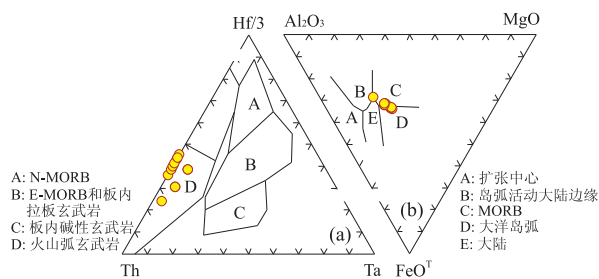


图 10 双凤山橄榄辉长岩构造判别图

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams of the Shuangfengshan olivine gabbros

a. Hf/3-Th-Ta 图解, 据 Wood(1980); b. Al₂O₃-MgO-FeO^T 图解, 据 Pearce *et al.*(1977)

玄武岩—玄武安山岩—安山岩—英安岩火山岩组合, 其微量元素具有大离子亲石元素富集和高场强元素亏损的特征, 显示活动大陆边缘火山岩属性 (Meng *et al.*, 2011; 许文良等, 2012; 于介江等, 2013). 同时期的松嫩—张广才岭地块发育一套玄武岩—流纹岩火山岩组合, 具有典型双峰式火山岩的组合特征 (许文良等, 2012), 加之双凤山橄榄辉长岩以及同时期出现的 A 型花岗岩 (郭奎城等, 2011) 都反映此时松嫩—张广才岭构造带应处于弧后伸展拉张的构造背景. 结合前文讨论, 双凤山橄榄辉长岩的形成与古亚洲洋多期次俯冲作用相关. 早二叠世, 古亚洲洋西向俯冲于佳木斯地块东侧, 使佳木斯地块东缘处于活动大陆边缘的构造环境, 而张广才岭构造带此时处于弧后盆地的伸展环境, 软流圈上涌加热上覆亏损岩石圈地幔导致其发生部分熔融, 岩浆演化过程中经历了斜方辉石的结晶分异以及斜长石的堆晶作用, 但没有受到明显的地壳混染, 最后上升侵位形成研究区基性岩岩岩.

同时期镁铁质侵入岩在延吉地区也有出露, 其侵位时代范围为 273~253 Ma (Guo *et al.*, 2016), 双凤山橄榄辉长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果表明这次镁铁质侵入岩岩浆活动可能开始于 279 Ma 之前, 此时岩石圈处于伸展拉张的构造背景. 而同时期不同区域镁铁质侵入岩 Sr-Nd-Hf 同位素变化的特征 (图 7a) 可能同古亚洲洋多期次俯冲作用析出熔/流体对地幔源区不同程度的改造相关.

5 结论

(1) 双凤山橄榄辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 279±4 Ma, 为早—中二叠世岩浆活动的产物.

(2) 矿物学特征及主微量元素组成显示其岩浆源区为经历了古亚洲洋俯冲沉积物熔/流体交代的亏损岩石圈地幔. 源区物质组成为石榴子石二辉橄榄岩, 部分熔融程度约 20%, 岩浆在上升过程中没有受到明显的地壳物质混染, 但岩浆演化过程中经历了斜方辉石的结晶分异以及斜长石的堆晶作用.

(3) 其地球化学组成显示 MORB 以及弧型玄武岩过渡的特征, 结合研究区构造演化历史以及同时期火山岩的分布特征, 笔者认为双凤山橄榄辉长岩形成于古亚洲洋西向俯冲于佳木斯地块之下而在松嫩—张广才岭地块形成的弧后伸展环境, 其地球化学特征同古亚洲洋多期次俯冲产生的熔流体对地幔源区的改造密切相关.

致谢: 本文野外工作得到高健同学的帮助, 锆石 CL 照相 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年以及电子探针分析过程中得到中国地质科学院地质研究所微区实验室施斌博士、吴才来研究员、雷敏高级工程师、王铮同学和戎合高级工程师的帮助, 在此表示诚挚感谢! 两位审稿人提出的问题和建议为本文质量的提升起到至关重要的作用, 在此深表感谢!

References

- Beard, J.S., Barker, F., 1989. Petrology and Tectonic Significance of Gabbros, Tonalites, Shoshonites, and Anorthosites in a Late Paleozoic Arc-Root Complex in the Wrangellia Terrane, Southern Alaska. *The Journal of Geology*, 97(6): 667–683. <https://doi.org/10.1086/629351>
- Crawford, A.J., Falloon, T.J., Eggins, S., 1987. The Origin of Island Arc High-Alumina Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(3): 417–430. <https://doi.org/10.1007/bf00372004>
- Danyushevsky, L.V., Carroll, M.R., Falloon, T.J., 1997. Origin of High-An Plagioclase in Tongan High-Ca Boninites: Implications for Plagioclase Melt Equilibria at Low P(H₂O). *The Canadian Mineralogist*, 35(2): 313–326
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Deng, J.F., 1987. Petrographical Facies Equilibrium and Petrogenesis. Wuhan College of Geology Press, Wuhan, 45–63 (in Chinese).
- Duncan, A.R., 1987. The Karoo Igneous Province—A Problem Area for Inferring Tectonic Setting from Basalt Geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 32(1–3): 13–34. <https://doi.org/10.1016/>

0377-0273(87)90034-5

- Elhlou, S., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1383>
- Feng, G. Y., Liu, S., Feng, C. X., et al., 2011. Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry and the Petrogenesis of the Ultramafic Pluton in Hongqiling, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1594—1606 (in Chinese with English abstract).
- Fournelle, J., Marsh, B. D., 1991. Shishaldin Volcano—Aleutian High-Alumina Basalts and the Question of Plagioclase Accumulation. *Geology*, 19(3): 234—237. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0234:svahab>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0234:svahab>2.3.co;2)
- Ge, M. H., Zhang, J. J., Liu, K., et al., 2016. Geochemistry and Geochronology of the Blueschist in the Heilongjiang Complex and Its Implications in the Late Paleozoic Tectonics of Eastern NE China. *Lithos*, 261: 232—249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.019>
- Ge, S. S., Zhai, M. G., Safonova, I., et al., 2015. Whole-Rock Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotope Systematics of the Late Carboniferous Volcanic Rocks of the Awulale Met-allogenic Belt in the Western Tianshan Mountains (NW China): Petrogenesis and Geodynamical Implications. *Lithos*, 228—229: 62—77. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.019>
- Guo, F., Fan, W. M., Li, C. W., et al., 2009. Early Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Dashizhai Basalts, Inner Mongolia. *Science in China (Earth Sciences)*, 39(5): 569—579 (in Chinese).
- Guo, F., Li, H. X., Fan, W. M., et al., 2015. Early Jurassic Subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and Geochemical Evidence from the Tumen Mafic Intrusive Complex. *Lithos*, 224—225: 46—60. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.014>
- Guo, F., Li, H. X., Fan, W. M., et al., 2016. Variable Sediment Flux in Generation of Permian Subduction-Related Mafic Intrusions from the Yanbian Region, NE China. *Lithos*, 261: 195—215. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.030>
- Guo, K. C., Zhang, W. L., Yang, X. P., et al., 2011. Origin of Early Permian A-Type Granite in the Wudaogou Area, Heihe City. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(4): 1077—1083 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A. W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385(6613): 219—229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481—492 (in Chinese with English abstract).
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2008. Time Scale of an Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Long-Lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for Continental Growth. *Lithos*, 101(3—4): 233—259. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.005>
- Johnson, K. T. M., 1998. Experimental Determination of Partition Coefficients for Rare Earth and High-Field-Strength Elements between Clinopyroxene, Garnet, and Basaltic Belt at High Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133: 60—68.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., et al., 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 35: 219—246. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- Liu, S., Hu, R. Z., Gao, S., et al., 2010. Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of Permian Granodiorite and Associated Gabbro in the Songliao Block, NE China and Implications for Growth of Juvenile Crust. *Lithos*, 114(3—4): 423—436. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.10.009>
- 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. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 4: 1—70.
- McKenzie, D., O'Nions, R. K., 1991. Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021—1091. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.5.1021>
- Meng, E., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2011. Permian Bimodal Volcanism in the Zhangguangcai Range of Eastern Heilongjiang Province, NE China: Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Geochemical Evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(2): 119—132. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.01.005>
- Meng, E., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Chronology of Late

- Paleozoic Volcanism in Eastern and Southeastern Margin of Jiamusi Massif and Its Tectonic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 53(8): 956—965 (in Chinese).
- Meng, J., Liu, X. Y., Liang, Y. H., et al., 2017. U-Pb Dating and Trace Elements Composition of Tadong Group from Jilin Province and Their Geological Implication. *Earth Science*, 42(4): 502—510 (in Chinese with English abstract).
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5—6): 348—370. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.11.005>
- Mitchell, J. N., Scoates, J. S., Frost, C. D., 1995. High-Al Gabbros in the Laramie Anorthosite Complex, Wyoming: Implications for the Composition of Melts Parental to Proterozoic Anorthosite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2—3): 166—180. <https://doi.org/10.1007/s004100050034>
- O'Neill, H. S. C., Jenner, F. E., 2012. The Global Pattern of Trace-Element Distributions in Ocean Floor Basalts. *Nature*, 491(7426): 698—704. <https://doi.org/10.1038/nature11678>
- Panjasawatwong, Y., Danyushevsky, L. V., Crawford, A. J., et al., 1995. An Experimental Study of the Effects of Melt Composition on Plagioclase-Melt Equilibria at 5 and 10 kbar: Implications for the Origin of Magmatic High-An Plagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118(4): 420—432. <https://doi.org/10.1007/s004100050024>
- Peacock, S. M., 1993. The Importance of Blueschist→Eclogite Dehydration Reactions in Subducting Oceanic Crust. *Geological Society of America Bulletin*, 105(5): 684—694. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)105<0684:tiobed>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<0684:tiobed>2.3.co;2)
- Pearce, T. H., Gorman, B. E., Birkett, T. C., 1977. The Relationship between Major Element Chemistry and Tectonic Environment of Basic and Intermediate Volcanic Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(1): 121—132. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(77\)90193-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(77)90193-5)
- Pei, F. P., Wang, Z. W., Cao, H. H., et al., 2014. Petrogenesis of the Early Paleozoic Tonalite in the Central Jilin Province: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2009—2019 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F. P., Zhang, Y., Wang, Z. W., et al., 2016. Early-Middle Paleozoic Subduction-Collision History of the South-Eastern Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Igneous and Metasedimentary Rocks of Central Jilin Province, NE China. *Lithos*, 261: 164—180. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.12.010>
- Plank, T., Langmuir, C. H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3—4): 325—394. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00150-2)
- Polat, A., Appel, P. W. U., Fryer, B. J., 2011. An Overview of the Geochemistry of Eoarchean to Mesoarchean Ultramafic to Mafic Volcanic Rocks, SW Greenland: Implications for Mantle Depletion and Petrogenetic Processes at Subduction Zones in the Early Earth. *Gondwana Research*, 20(2—3): 255—283. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.007>
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific & Technical, Harlow, United Kingdom, 352.
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299—307.
- Shao, J. A., Li, Y. F., Tang, K. D., 2013. Restoration of the Orogenic Processes of Zhangguangcai Range. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2959—2970 (in Chinese with English abstract).
- Sinton, C. W., Christie, D. M., Coombs, V. L., et al., 1993. Near-Primary Melt Inclusions in Anorthite Phenocrysts from the Galapagos Platform. *Earth and Planetary Science Letters*, 119(4): 527—537.
- Su, B. X., Qin, K. Z., Santosh, M., et al., 2013. The Early Permian Mafic-Ultramafic Complexes in the Beishan Terrane, NW China: Alaskan-Type Intrusives or Rift Cumulates? *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 175—187. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.12.039>
- Su, B. X., Qin, K. Z., Sun, H., et al., 2012. Subduction-Induced Mantle Heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O Isotopic Mapping of Late Paleozoic Mafic-Ultramafic Complexes. *Lithos*, 134—135: 41—51.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345.
- Takagi, D., Sato, H., Nakagawa, M., 2005. Experimental Study of a Low-Alkali Tholeiite at 1—5 kbar: Optimal Condition for the Crystallization of High-An Plagioclase in Hydrous Arc Tholeiite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(5): 527—540.
- Tatsumi, Y., Eggins, S., 1995. Subduction Zone Magmatism.

- Blackwell Science, Cambridge, 211.
- Tatsumi, Y., Takahashi, T., 2006. Operation of Subduction Factory and Production of Andesite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 101(3): 145—153.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 46.
- Wang, Y.J., Zhao, G.C., Fan, W.M., et al., 2007a. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Paleoproterozoic Mafic Dykes from Western Shandong Province: Implications for Back-Arc Basin Magmatism in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 154(1—2): 107—124.
- Wang, Y.X., Yang, J.D., Chen, J., et al., 2007b. The Sr and Nd Isotopic Variations of the Chinese Loess Plateau during the Past 7 Ma: Implications for the East Asian Winter Monsoon and Source Areas of Loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249(3—4): 351—361.
- Windley, B.F., Alexeiev, D., Xiao, W.J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47.
- Wood, D.A., 1980. The Application of a Th-Hf-Ta Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of Basaltic Lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11—30. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(80\)90116-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(80)90116-8)
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Ye, M., Zhang, S.H., 1995. Geodynamic Model of the Manzhouli-Suifenghe Geoscience Transect. *Earth Science*, 20(5): 535—539 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Wang, F., Meng, E., et al., 2012. Paleozoic-Early Mesozoic Tectonic Evolution in the Eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from Igneous Rock Association and U-Pb Geochronology of Detrital Zircons. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1378—1389 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Shao, J.A., et al., 2006. In-Situ U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Zircons from Volcanic Rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang-Xuan Area, Northeast China. *Earth Science*, 31(1): 71—80 (in Chinese with English abstract).
- Ye, M., Zhang, S.H., Wu, F.Y., 1994. The Classification of the Paleozoic Tectonic Units in the Area Crossed by M-S GGT. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(3): 241—245 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.J., Hou, X.G., Ge, W.C., et al., 2013. Magma Mixing Genesis of the Early Permian Liulian Pluton at the Northeastern Margin of the Jiamusi Massif in NE China: Evidences from Petrography, Geochronology and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 9(9): 2971—2986 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.G., Zhang, Y.X., Chen, Z.X., et al., 2016. Geological Tectonics, Magmatism and Seafloor Hydrothermal Activity in the Back-Arc Basins of the Western Pacific. *Studia Marina Sinica*, (0): 3—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.C., Mao, J.W., Saunders, A.D., et al., 2009. Petrogenetic Modeling of Three Mafic-Ultramafic Layered Intrusions in the Emeishan Large Igneous Province, SW China, Based on Isotopic and Bulk Chemical Constraints. *Lithos*, 113(3—4): 369—392. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.023>
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic Mafic Intrusions in the Panzhihua District (Sichuan Province, SW China): Implications for Subduction-Related Metasomatism in the Upper Mantle. *Precambrian Research*, 152(1—2): 27—47.
- Zhao, S., Xu, W.L., Tang, J., et al., 2016. Neoproterozoic Magmatic Event and Tectonic Attribution of the Erguna Massif: Constraints from Geochronological, Geochemical and Hf Isotopic Data of Intrusive Rocks. *Earth Science*, 41(11): 1803—1829 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.F., Dai, L.Q., Zheng, Y.F., 2015. Two Types of the Crust-Mantle Interaction in Continental Subduction Zone. *Science China: Earth Sciences*, 45(7): 900—915 (in Chinese).
- Zhao, Z.H., Wang, Q., Xiong, X.L., 2004. Complex Mantle-Crust Interaction in Subduction Zone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(4): 277—284 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, H., Zhu, W.G., Hu, R.Z., et al., 2009. Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of the Panzhihua A-Type Syenitic Intrusion in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China and Implications for Growth of Juvenile Crust. *Lithos*, 110(1—4): 109—128. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.12.006>
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., Zhang, X.Z., et al., 2009. The Onset of Pacific Margin Accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang High Pressure Metamorphic Belt. *Tectonophysics*, 478: 230—246. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.009>

附中文参考文献

- 邓晋福, 1987. 岩石相平衡与岩石成因. 武汉: 武汉地质学院出版社, 45—63.
- 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 等, 2011. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因. 岩石学报, 27(6): 1594—1606.
- 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 等, 2009. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据. 中国科学(地球科学), 39(5): 569—579.
- 郭奎城, 张文龙, 杨晓平, 等, 2011. 黑河市五道沟地区早二叠世 A 型花岗岩成因. 吉林大学学报(地球科学版), 41(4): 1077—1083.
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481—492.
- 孟恩, 许文良, 杨德彬, 等, 2008. 佳木斯地块东缘及东南缘二叠纪火山作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义. 科学通报, 53(8): 956—965.
- 孟杰, 刘晓暘, 梁一鸿, 等, 2017. 吉林省塔东群锆石 U-Pb 定年、微量元素研究及其地质意义. 地球科学, 42(4): 502—510.
- 裴福萍, 王志伟, 曹花花, 等, 2014. 吉林省中部地区早古生代英云闪长岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学证据. 岩石学报, 30(7): 2009—2019.
- 邵济安, 李永飞, 唐克东, 2013. 张广才岭造山过程的重构及其大地构造意义. 岩石学报, 29(9): 2959—2970.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 吴福元, 叶茂, 张世红, 1995. 中国满洲里—绥芬河地学断面域的地球动力学模型. 地球科学, 20(5): 535—539.
- 许文良, 王枫, 孟恩, 等, 2012. 黑龙江省东部古生代—早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1378—1389.
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 等, 2006. 冀北张—宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素. 地球科学, 31(1): 71—80.
- 叶茂, 张世红, 吴福元, 1994. 中国满洲里—绥芬河地学断面域古生代构造单元及其地质演化. 长春地质学院学报, 24(3): 241—245.
- 于介江, 侯雪刚, 葛文春, 等, 2013. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据. 岩石学报, 29(9): 2971—2986.
- 曾志刚, 张玉祥, 陈祖兴, 等, 2016. 西太平洋典型弧后盆地的地质构造、岩浆作用与热液活动. 海洋科学集刊, (0): 3—36.
- 赵硕, 许文良, 唐杰, 等, 2016. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用与微陆块构造属性: 来自侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约. 地球科学, 41(11): 1803—1829.
- 赵振华, 王强, 熊小林, 2004. 俯冲带复杂的壳幔相互作用. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 277—284.
- 赵子福, 戴立群, 郑永飞, 2015. 大陆俯冲带两类壳幔相互作用. 中国科学: 地球科学, 45(7): 900—915.