

doi:10.3799/dqkx.2012.00

吉林省辽源晚中生代碱性玄武岩成因及岩石圈地幔性质

路思明¹, 裴福萍^{1*}, 周群君¹, 靳 克², 彭玉鲸³, 陈 岩¹, 许文良¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 吉林省地质资料馆, 吉林长春 130061

3. 吉林地勘局区域地质矿产调查所, 吉林长春 130022

摘要: 报道了吉林辽源晚中生代玄武岩的全岩 K-Ar 定年结果和岩石地球化学资料, 以及其中幔源捕虏体的矿物化学分析结果, 进而探讨了晚中生代碱性玄武岩的成因及岩石圈地幔的性质。全岩 K-Ar 定年结果显示, 辽源玄武岩形成于晚白垩世 (91.7 ± 1.7 Ma, 82.5 ± 1.9 Ma, 99.3 ± 1.6 Ma, 82.2 ± 2.4 Ma)。该玄武岩的 SiO_2 含量介于 45.1%~45.9% 之间, 全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量介于 4.50%~6.72% 之间, $\text{Mg}^{\#} [\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 值介于 60~63 之间, 属于碱性玄武岩系列。该玄武岩相对富集轻稀土元素(LREEs)、亏损重稀土元素(HREEs), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值介于 12.0~14.0 之间, 无 Eu 异常, 具有洋岛玄武岩(OIB)型微量元素配分型式。辽源玄武岩中的幔源捕虏体以尖晶石二辉橄榄岩为主, 捕虏体中橄榄石的 $\text{Mg}^{\#}$ 值较低 (87.1~91.2), 结合捕虏体中其它矿物的主量和微量元素地球化学特征, 认为辽源晚白垩世岩石圈地幔以新增生的岩石圈地幔为主。捕虏体中单斜辉石的 LREEs 具有从富集到亏损的变化特征, 暗示岩石圈地幔经历了部分熔融和交代作用的改造, 地幔交代类型以硅酸盐熔体交代为主, 同时存在碳酸盐熔体交代作用。辽源晚白垩世玄武岩来源于软流圈地幔的部分熔融, 结合区域研究成果, 认为辽源晚白垩世玄武岩形成于古太平洋板块俯冲背景下的弧后伸展环境。

关键词: 吉林辽源; 玄武岩; 全岩 K-Ar 定年; 地球化学; 橄榄岩捕虏体; 岩石圈地幔。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-15

收稿日期: 2011-04-10

Origin of Late Mesozoic Alkaline Basalts and Nature of Lithospheric Mantle in Liaoyuan Area, Jilin Province

LU Si-ming¹, PEI Fu-ping^{1*}, ZHOU Qun-jun¹, JIN Ke², PENG Yu-jing³, CHEN Yan¹, XU Wen-liang¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Geological Archives of Jilin Province, Changchun 130061, China

3. Regional Survey of Geology & Mineral Resources of Jilin Province, Changchun 130022, China

Abstract: This paper presents whole-rock K-Ar dating results and geochemical data of the late Mesozoic basalts in the Liaoyuan area, Jilin province, and geochemical data of minerals from the entrained mantle xenoliths, with the aim of constraining the origin of the basalts and the nature of the late Mesozoic lithosphere mantle. The whole-rock K-Ar dating results indicate that Liaoyuan basalts formed in the late Cretaceous (91.7 ± 1.7 Ma, 82.5 ± 1.9 Ma, 99.3 ± 1.6 Ma, 82.2 ± 2.4 Ma). They have $\text{SiO}_2 = 45.1\%-45.9\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 4.50\%-6.72\%$, and $\text{Mg}^{\#} [\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})] = 60-63$, suggesting that they belong to the alkaline series. Liaoyuan basalts are enriched in light rare earth elements (LREEs), and depleted in heavy rare earth elements (HREEs) [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 12.0-14.0$], and have no Eu anomalies. Their trace element patterns are similar to that of OIB. The entrained peridotite xenoliths consist mainly of spinel lherzolites in which olivines have relatively low $\text{Mg}^{\#}$ (87.1~91.2). The major- and trace element data of the minerals from the xenoliths indicate that the Late Cretaceous lithosphere mantle beneath the Liaoyuan area be composed mainly of the juvenile one. The incompatible elements of clinopyroxenes from the peridotite xenoliths vary from the enrichment to the depletion, suggesting that the lithosphere mantle has experienced partial melting and fluid/melt metasomatism, and that the metasomatizing agents are mainly silicate melt and minor carbonate melt. The Late Cretaceous basalts in the Liaoyuan area were derived from partial melting of asthenospheric mantle. Combined

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20080454);国家自然科学基金项目(No. 40872049)。

作者简介:路思明(1987—),女,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。*通讯作者:裴福萍,E-mail: peifp@jlu.edu.cn

with the studies on the regional geology, we conclude that the basalts formed under the back-arc extensional setting related to the subduction of the Paleo-Pacific plate.

Key words: Liaoyuan; basalt; whole-rock K-Ar age; geochemistry; peridotite xenolith; lithospheric mantle.

0 引言

近年来,人们对我国东部新生代火山岩进行了大量研究,得到了很多年代学及地球化学数据,这为研究我国东部新生代以来的构造演化以及岩石圈地幔性质提供了重要的证据(鄂莫岚和赵大升, 1987; 刘嘉麒, 1987; 余扬, 1987; 池际尚等, 1988; 刘若新等, 1992; 徐义刚等, 1995; 陈文寄等, 1996; 樊祺诚等, 1998; Ren *et al.*, 2002, 郑建平等, 2009)。广泛的研究显示,新生代时期,我国东部主要处于陆内裂谷环境,形成了一系列的火山群,同时伴随着以溢流方式产出的新生代碱性玄武岩及其中的幔源和下地壳捕虏体(Orberger *et al.*, 1998; 郑建平, 1999; Rudnick *et al.*, 2004)。随着研究的深入,基于新生代碱性玄武岩和地幔捕虏体的研究,揭示出岩石圈地幔中存在洋壳残片(Yu *et al.*, 2010),确定了我国东部新生代岩石圈地幔演化与太平洋板块俯冲之间的关系。同时,对于东北地区早白垩世火成岩的研究也取得了大量的成果(裴福萍等,

2004, 2008; Wu *et al.*, 2005, 2011; Yang *et al.*, 2008; Pei *et al.*, 2011)。然而,与中国东部早白垩世和新生代火山岩研究程度相比,对于晚白垩世火山岩的研究相对较少(许文良等, 1993, 1999; 王冬艳等, 2002; 闫峻等, 2003; 张宏福和郑建平, 2003; 王微等, 2006)。这主要是由于目前发现的晚白垩世火山岩及其幔源捕虏体较少,从而制约了对晚白垩世火山岩形成的构造背景、岩石圈地幔性质及其深部动力学过程的认识。鉴于此,本文对吉林省辽源地区晚白垩世碱性玄武岩进行了年代学、岩石学和地球化学研究,对其中的幔源捕虏体进行了岩相学以及矿物主量及微量元素地球化学研究,这对了解该区晚白垩世碱性玄武岩的成因、岩石圈地幔的性质以及深部过程具有重要意义。

1 地质背景和岩相学

吉林省辽源地区位于兴蒙造山带的南缘,张广才岭东南缘,伊舒地堑西部(图 1b)。区内主要发育

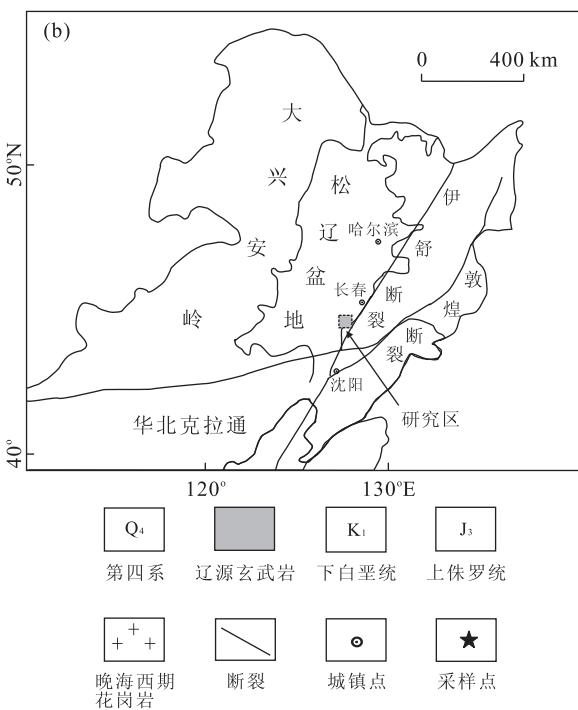
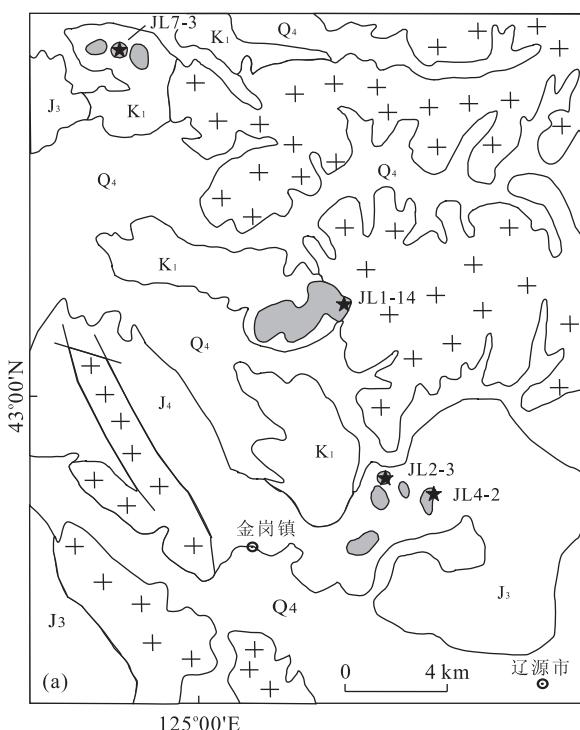


图 1 辽源玄武岩地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Liaoyuan basalts

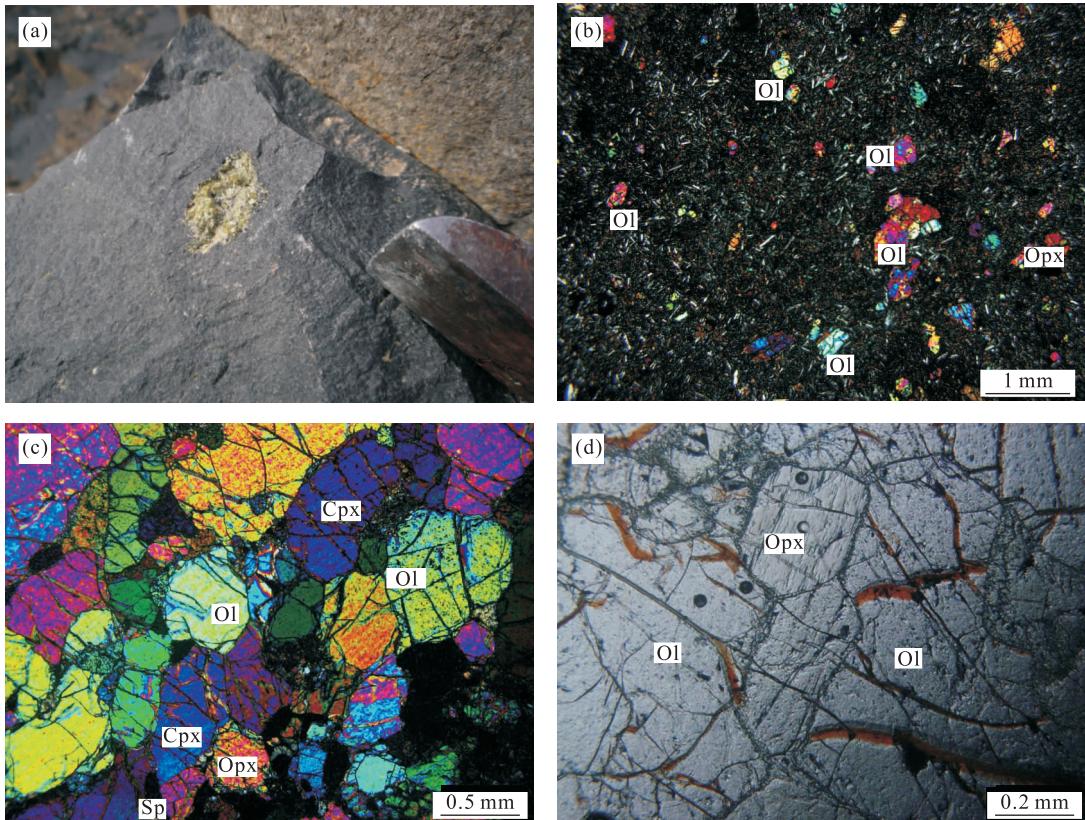


图2 玄武岩和橄榄岩捕虏体的产状与结构

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs showing the occurrence of lherzolite xenoliths and texture of basalts

a. 橄榄岩捕虏体的野外产状; b. 玄武岩的斑状结构(正交偏光); c. 捕虏体的结晶结构(正交偏光); d. 捕虏体中矿物特征(单偏光); Cpx. 透辉石; Ol. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Sp. 尖晶石

有早白垩世安民组安山岩、凝灰质熔岩和泉头组砂砾岩以及晚海西期的侵入岩。本文研究的辽源玄武岩位于辽源市西北部老道山、毛山、双山和四甲山(图1a),分布面积约 600 km^2 ,呈溢流状产出,不整合覆盖于晚侏罗世—早白垩世地层之上,玄武岩中存在幔源尖晶石二辉橄榄岩捕虏体(图2a)。前人主要根据地质体之间的接触关系认为辽源玄武岩的形成时代为古新世或晚白垩世(吉林省地质矿产局,1982;花艳秋等,2006)。

辽源玄武岩新鲜面呈灰黑色,斑状结构(图2b),块状构造。斑晶主要为橄榄石(8%)和透辉石(5%),少量的斜方辉石(3%),斑晶含量约占岩石总量的5%~15%,粒度约0.1 mm,橄榄石呈双锥状自形晶,少量透辉石具有环带结构。基质为间粒一问隐结构,由斜长石(30%)、橄榄石(20%)、辉石(15%)、不透明矿物和玻璃质组成。

辽源晚白垩世碱性玄武岩中的橄榄岩捕虏体的岩石类型主要为尖晶石二辉橄榄岩(图2a),同时含有少量的纯橄岩。捕虏体直径介于1~10 cm,与寄主岩

接触界线明显。尖晶石二辉橄榄岩,粗粒结构,板状构造,颗粒接触边界多为曲线型(图2c)。主要矿物由橄榄石(70%)、单斜辉石(10%~15%)、斜方辉石(10%~15%)和尖晶石(2%~5%)组成(图2d)。

2 分析方法

辽源玄武岩的全岩K-Ar同位素定年在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,在剔除斑晶与捕虏晶的基础上,将岩石粉碎到60~80目后进行测年分析;辽源玄武岩全岩主量元素分析在中国科学院贵阳地球化学研究所完成,采用 Axios PW4400型X射线荧光光谱仪(XRF)分析,元素分析的重现性(准确度)优于3%;全岩微量元素含量在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用Agilent 7500a ICP-MS分析完成,用于ICP-MS分析的样品处理如下:(1)称取粉碎至大约200目的岩石粉末50 mg于Teflon溶样器中;(2)采用Teflon溶样弹将样品用HF+

HNO_3 在 195 °C 条件下消解 48 h; (3) 在 120 °C 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO_3 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度见 Liu *et al.* (2008); 幔源橄榄岩捕虏体中矿物的主微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成, 采用矿物微区原位 LA-ICP-MS 分析, 实验仪器为 Agilent 7500a ICP-MS。激光束斑的直径为 60 μm 。内标为电子探针测定的单斜辉石中 Ca 和橄榄石与斜方辉石中的 Si。美国地质调查局(USGS)的参考玻璃(BCR-2G、BIR-1G 和 BHVO-2G)作为校正标准。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成, 详细的样品分析测试过程见 Liu *et al.* (2008)。

3 分析结果

3.1 辽源玄武岩的 K-Ar 定年

本文对辽源毛山、老道山、双山和四甲山 4 个地点的玄武岩进行了样品的采集及定年工作。全岩 K-Ar 定年结果分别为 99.3 ± 1.6 Ma (JL4-2)、91.7 ± 1.7 Ma (JL1-14)、82.5 ± 1.9 Ma (JL2-3) 和 82.2 ± 2.4 Ma (JL7-3)(表 1)。由此可见, 辽源玄武岩的形成时代介于 82.2~99.3 Ma 之间, 即晚白垩世。这与玄武岩不整合覆盖在晚侏罗世—早白垩世地层之上的地质事实相吻合。同时也与中国东部晚白垩世火山岩(如伊通大屯、辽西阜新碱锅玄武岩、辽东曲家屯玄武岩、吉黑东部绥芬河组火山岩等)形成时代相一致(许文良等, 1999; 王冬艳等, 2002; 王微等, 2006; 张辉煌等, 2006; Ji *et al.*, 2007)。

3.2 辽源玄武岩的主量元素和微量元素地球化学特征

辽源晚白垩世玄武岩的主量、微量元素分析结果见表 2。辽源玄武岩落入碱性玄武岩系列区域(图 3), 根据 CIPW 标准矿物计算结果, 辽源玄武岩属于碧玄岩($\text{Ne} > 5\%$)和碱性橄榄玄武岩($5\% > \text{Ne} > 0$), 该特点与邻区同时代的大屯拉斑玄武岩不同。辽源玄武岩的 SiO_2 含量介于 45.1%~45.9% 之间, 全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)介于 4.5%~6.7% 之间, $\text{Mg}^{\#}$ 值 [$100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$] 介于 60~63 之间, 全 Fe_2O_3 含量介于 8.8%~10.2% 之间。与华北克拉通晚白垩世玄武岩相比, 具有较高的 SiO_2 含量。其较低的 SiO_2 含量以及较高的全碱含量与早白垩世晚期—晚白垩世延边钙碱性火山岩和黑龙江东部绥芬河组钙碱性火山岩以及晚白垩世大屯拉斑玄武

岩明显不同(王冬艳等, 2002; 张宏福和郑建平, 2003; 张辉煌等, 2006; Ji *et al.*, 2007)。

辽源晚白垩世碱性玄武岩具有富集轻稀土元素(LREEs), 亏损重稀土元素(HREEs), 无 Eu 异常的特征, 稀土配分曲线呈明显的右倾型($\text{La/Yb})_{\text{N}} = 12.0 \sim 14.0$ (图 4a), 其稀土总量($\sum \text{REE}$)介于 $(180 \sim 223) \times 10^{-6}$ 之间; 微量元素蛛网图显示, 辽源晚白垩世玄武岩富集强不相容元素(Rb、Ba、Th、U、Nb 和 Ta), 具有弱的 Sr 正异常和 Ti 的负异常(图 4b)。其 Nb/U 比值介于 47.8~50.7 之间, 落入洋岛型和大洋中脊玄武岩范围内(Hofmann, 2003)。其 Fe/Mn 值介于 65~71 之间, 略低于河北汉诺坝玄武岩(69~72)。Nb/Ta 比值介于 17.6~18.3 之间, 略高于原始地幔的 Nb/Ta 比值(17.5)。辽源碱性玄武岩稀土及微量元素配分型式与洋岛型玄武岩(OIB; Ocean island basalt)相似, 和伊通大屯拉斑玄武岩具有相似的微量元素配分型式, 但大离子亲石元素含量较高(张辉煌等, 2006)。同时也与中国东部同时代华北克拉通晚白垩世玄武岩(辽西阜新、辽东曲家屯和鲁东大西庄玄武岩)的配分型式相似(王冬艳等, 2002; 闫峻等, 2003; 张宏福和郑建平, 2003; 王微等, 2006), 但辽源碱性玄武岩微量元素配分型式与同时代延边地区钙碱性火山岩明显不同(Ji *et al.*, 2007)。

3.3 橄榄岩捕虏体中矿物的主量和微量元素

辽源晚白垩世玄武岩中的幔源尖晶石二辉橄榄岩捕虏体中的橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石的矿物化学分析结果见表 3。

辽源地幔橄榄岩捕虏体中的橄榄石主要为贵橄榄石, 核部 $\text{Mg}^{\#}$ 值介于 87.1~91.2 之间, CaO 含量介于 0.07%~0.35% 之间, 显示了幔源的特点(郑曙等, 2009)。Cr 的含量介于 $(52 \sim 417) \times 10^{-6}$ 之间, Ni 的含量介于 $(1573 \sim 3010) \times 10^{-6}$ 之间。其 $\text{Mg}^{\#}$ 值、Cr 和 Ni 的丰度明显低于古生代岩石圈地幔中橄榄岩的丰度值($\text{Mg}^{\#} > 92$)(郑建平, 1999), 略高于中国东部新生代玄武岩中幔源捕虏体中橄榄石的 $\text{Mg}^{\#}$ 值、Cr 和 Ni 的丰度(鄂莫岚和赵大升, 1987)。其 $\text{Mg}^{\#}$ 值略高于辽西阜新玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩中橄榄石, 而低于其中难熔的尖晶石方辉橄榄岩中橄榄石($\text{Mg}^{\#} = 92 \sim 93$)(王微, 2008)。

斜方辉石主要为斜顽辉石, $\text{Mg}^{\#}$ 值介于 89.2~91.7 之间, Cr 和 Ni 的丰度分别介于 $(2027 \sim 4574) \times 10^{-6}$ 和 $(649 \sim 817) \times 10^{-6}$ 之间, 略高于东北地区新生代玄武岩橄榄岩捕虏体中的斜方辉石的 $\text{Mg}^{\#}$

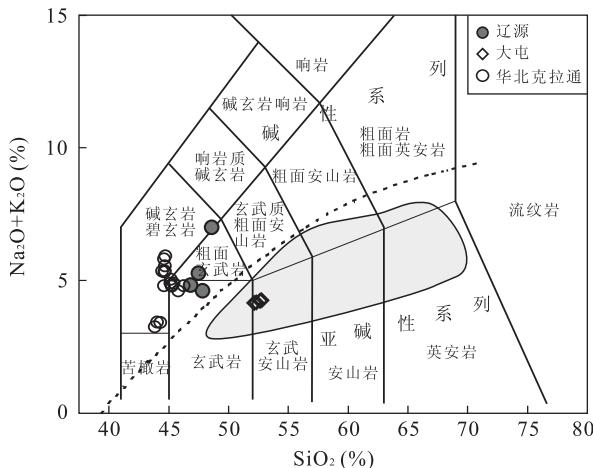


图 3 辽源晚白垩世玄武岩的 TAS 图解

Fig. 3 Total alkali vs. SiO_2 variation diagram for the Liaoyuan basalts

阴影区为延边晚白垩世火山岩的分布范围;大屯玄武岩数据引自张辉煌等(2006);延边火山岩数据引自 Ji *et al.* (2007);华北克拉通晚白垩世玄武岩数据引自许文良等(1999)、张宏福和郑建平(2003)、王微等(2006);碱性和亚碱性系列之间的界限引自 Irvine and Baragar(1971)

值、Cr 和 Ni 丰度, 明显低于辽西中生代玄武岩中难熔的方辉橄榄岩捕虏体中斜方辉石的 $\text{Mg}^\#$ 值、Cr 和 Ni 丰度(王冬艳等, 2002)。

捕虏体中单斜辉石主要为透辉石, $\text{Mg}^\#$ 值介于 89.5~90.8 之间, CaO 和 Al_2O_3 含量分别介于 20.4%~21.7% 之间和 2.96%~6.24% 之间, 其 $\text{Mg}^\#$ 值略高于新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的单斜辉石的 $\text{Mg}^\#$ 值(鄂莫岚和赵大升, 1987)。其 $\text{Mg}^\#$ 值低于同时代阜新晚白垩世玄武岩中难熔的尖晶石方辉橄

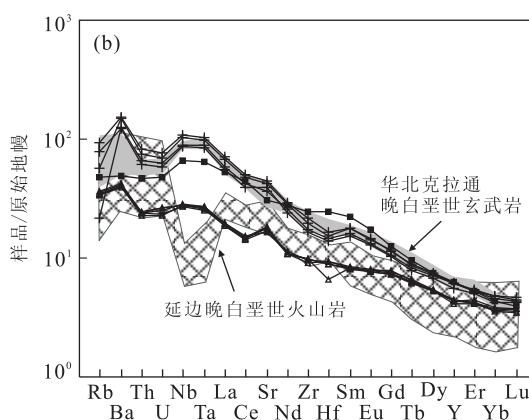
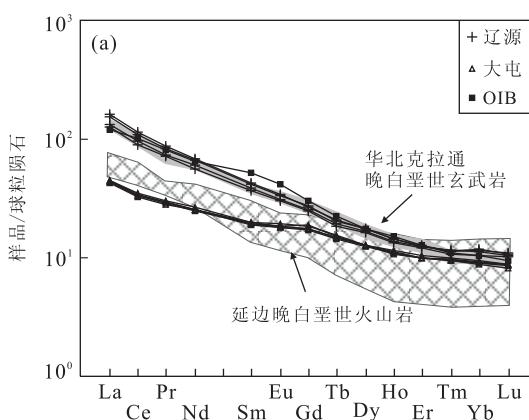
榄岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\#$ 值, 同时高于其中的尖晶石二辉橄榄岩中单斜辉石的 $\text{Mg}^\#$ 值(许文良等, 1999)。

在不含水的橄榄岩中, 单斜辉石富含 90% 以上的稀土元素, 因此, 单斜辉石的稀土元素可以代表全岩的稀土元素组成(Stosch *et al.*, 1982)。捕虏体中矿物微量元素分析结果见表 4, 从单斜辉石稀土元素配分图解中看出(图 5), 单斜辉石的稀土配分型式可分为如下 3 种类型:(1)LREEs 富集型: 强烈富集 LREEs, 明显亏损 HREEs[(La/Yb)_N=12.0~13.3], 样品的 $\text{Mg}^\#$ (90.2~90.4), Cr((7 507~7 604) $\times 10^{-6}$) 和 Ni((339~357) $\times 10^{-6}$) 的含量相对较高(图 5a);(2)配分型式整体近于平坦型: 与 HREEs 相比, LREEs 略亏损[(La/Yb)_N=0.59~0.90], 样品的 $\text{Mg}^\#$ 介于 86.5~90.0 之间, Cr 含量介于 (4 525~6 831) $\times 10^{-6}$ 之间, Ni 含量介于 (291~384) $\times 10^{-6}$ 之间, 其中近勺形的稀土分配型式显示 La 和 Ce 相对 Pr 的富集(图 5c);(3)LREEs 亏损型: 明显亏损 LREEs, 富集 HREEs[(La/Yb)_N=0.07], 表现出强烈的轻重稀土分异, $\text{Mg}^\#$ =90.81, Cr=4 195 $\times 10^{-6}$, Ni=301 $\times 10^{-6}$ (图 5e)。微量元素蛛网图上显示, 它们具有不同程度 Rb、Ba、Th、U 和高场强元素 Nb、Ta 和 Zr 的亏损(图 5)。

4 讨论

4.1 辽源玄武岩的形成时代

在吉林省 1:20 万区调工作中辽源玄武岩曾被





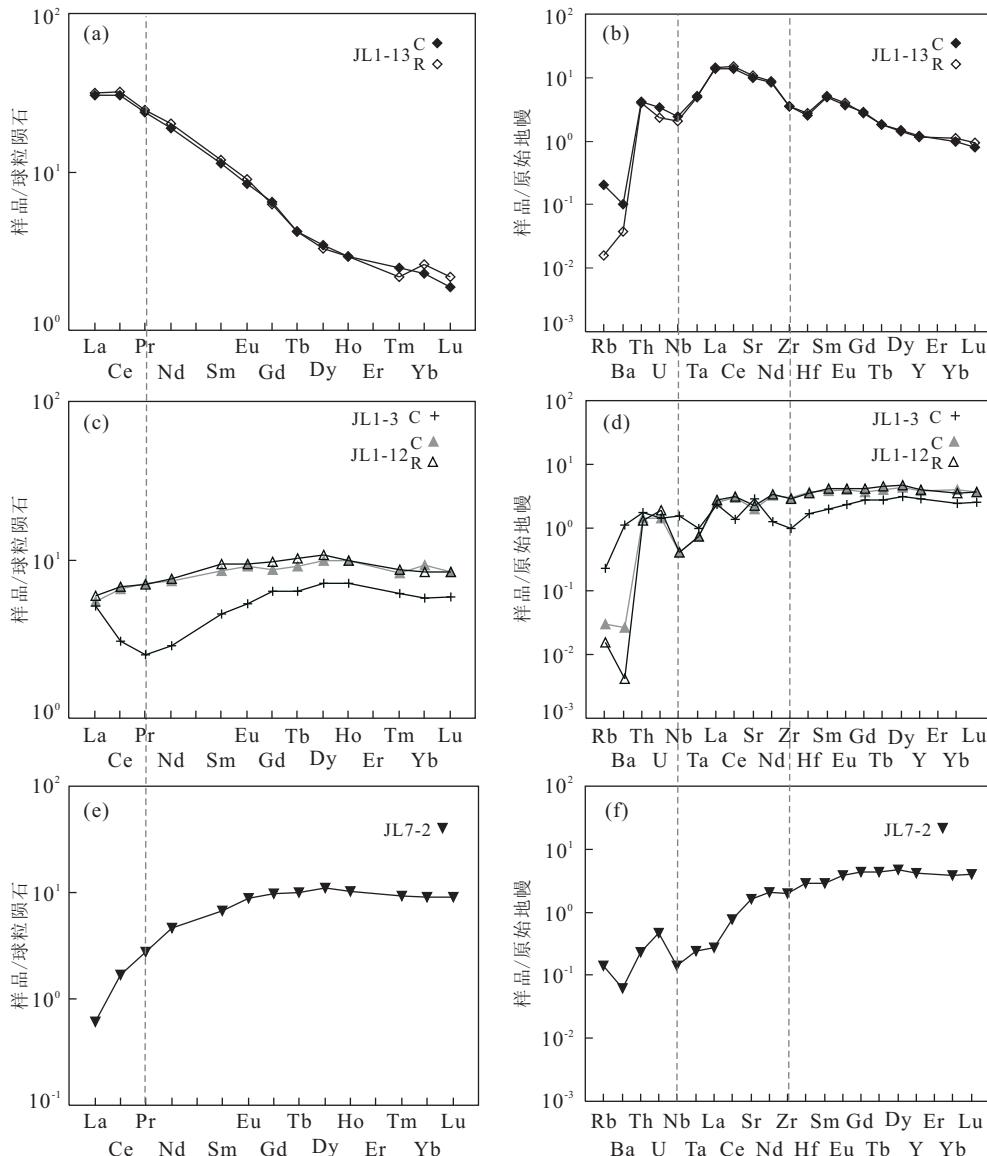


图5 辽源橄榄岩捕虏体中单斜辉石稀土元素配分图解(a,c,e)和微量元素蛛网图(b,d,f)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b, d, f) of clinopyroxenes from the peridotite xenoliths entrained by Liaoyuan basalts
球粒陨石标准化数据引自 Boynton(1984);原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough(1989);C. 矿物核部;R. 矿物边部

归于鹅头山组玄武岩,后归入新近纪船底山组(吉林省地质矿产局,1982. 中华人民共和国区域地质调查报告(1:20万);辽源市幅(K-51-Ⅲ)). 吉林省区域地质志中将辽源双山玄武岩置于古新世富峰山组(吉林省地质矿产局,1982). 前人在研究吉林省晚白垩世玄武岩时,也推测辽源玄武岩形成于晚白垩世(花艳秋等, 2006),但一直没有准确的测年资料加以证实. 本文对辽源玄武岩全岩 K-Ar 定年结果分别为 99.3 ± 1.6 Ma、 91.7 ± 1.7 Ma、 82.5 ± 1.9 Ma、 82.2 ± 2.4 Ma(表1),表明辽源玄武岩的形成时代介于 $82.2 \sim 99.3$ Ma 之间,即晚白垩世. 从区域上

看,长春大屯富峰山玄武岩测年结果为 92 Ma(张辉煌等, 2006),双辽大吐尔基山的碱性辉绿岩年龄为 86.22 ± 1.07 Ma(余扬, 1987),松辽盆地内部与青山口相伴生的橄榄粗安岩 K-Ar 年龄为 90.2 Ma(刘若新等, 1992),延边地区绥芬河组 (93.2 ± 1.3 Ma),屯田营组(88.2 ± 1.4 Ma、 97.3 ± 1.4 Ma)均形成于晚白垩世,由此可见,中国东部存在晚白垩世岩浆事件.

4.2 辽源晚白垩世玄武岩岩浆源区及性质

辽源玄武岩的 $Mg^{\#}$ 介于 60~63 之间,略低于幔源原始岩浆的 $Mg^{\#}$ 值范围,但是其 Sc、Co 和 Ni

的含量($(20.1 \sim 64) \times 10^{-6}$, $(34.5 \sim 44.3) \times 10^{-6}$, $(128 \sim 219) \times 10^{-6}$)与幔源原始岩浆相应值接近(Frey *et al.*, 1978; 邓晋福等, 1987). 另外, 无 Eu 异常的稀土配分形式, 其 Nb/U 比值(47.8~50.7)明显高于地壳(Nb/U=8, Rudnick and Fountain, 1995), 说明地壳混染是微弱的. 因此, 辽源玄武岩接近幔源的原始岩浆, 其地球化学特征应反映地幔的性质, 略低于原始岩浆的 Mg[#] 值可能与岩浆演化早期少量橄榄石和辉石等镁铁质矿物分离结晶作用有关, 这与岩相学观察相一致.

图 4 中可以看出, 辽源玄武岩具有明显 Nb 和 Ta 正异常, 这与受俯冲流体交代的地幔楔来源的玄武岩明显不同(如延边地区同时代玄武岩, 图 4), 同时也不同于大洋中脊玄武岩, 而与辽西阜新、辽东曲家屯以及胶东大西庄玄武岩的 OIB 型微量元素配分形式相似(图 4, 王冬艳等, 2002; 闫峻等, 2003; 张宏福和郑建平, 2003; 王微等, 2006). 同时, 其 Ce/Pb 和 Nb/U 比值也落入 MORB 和 OIB 范围内(Xu *et al.*, 2005), 上述特征说明辽源玄武岩主要来源于软流圈地幔的部分熔融.

不相容元素比值不受部分熔融程度和结晶分异的影响, 因此主要反映源区的特征. 辽源玄武岩的 Ba/Nb 比值介于 13.60~14.33, Ba/Th 比值介于 155~166, Th/La 比值为 0.14, 落入 EMI 型地幔相对应比值范围内(Ba/Nb = 9.1~23.4; Ba/Th = 80~204; Th/La = 0.09~0.15)(Weaver, 1991; Hart *et al.*, 1992; 徐义刚, 1999), 暗示辽源玄武岩中存在 EMI 型富集组份. 与 OIB 型微量元素分配型式相比, 辽源玄武岩具有 Ba 和 Sr 的正异常和 Ti 的负异常, 而 Eu 不具异常. 随着(La/Yb)_N 值的增大, Ba、Sr 和 K₂O 含量增高而 TiO₂ 的含量降低(表 2), 该特征可能暗示软流圈来源的玄武质岩浆在上升过程中经历了岩石圈地幔中富大离子亲石元素物质的混染, 暗示岩石圈地幔中存在早期的交代作用, 这与辽源晚白垩世玄武岩中幔源捕虏体的矿物地球化学特征相一致(见 4.4).

4.3 辽源晚白垩世玄武岩形成的构造背景

从晚白垩世玄武岩的空间分布上来看, 与早白垩世相比, 晚白垩世岩浆活动明显减弱, 仅在局部地区有晚白垩世岩浆作用的显示(如辽宁阜新、辽东曲家屯、吉黑东部、大屯等)(许文良等, 1999; 王冬艳等, 2002; 张宏福和郑建平, 2003; 王微等, 2006; 张辉煌等, 2006; Ji *et al.*, 2007), 而且火山岩岩石组合及地球化学特征随空间变化具有明显规律性,

表现在中国东部陆缘延边地区同时代的绥芬河组和屯田营组火山岩以钙碱性岩石组合为特征, 微量元素分配型式具有活动大陆边缘的特征, 显示与板块俯冲作用有关的动力学背景(Ji *et al.*, 2007), 而在中国东部陆内地区, 如吉林辽源、伊通、辽西阜新、鲁东大西庄和辽东曲家屯, 以碱性玄武岩的产出为特征, 暗示其形成于强烈的伸展环境(许文良等, 1999; 闫峻等, 2003; 王微等, 2006; 张辉煌等, 2006). 辽源碱性玄武岩和大屯拉斑玄武岩分布上受控于伊一舒断裂带, 并具有 OIB 型微量元素分配型式, 暗示其软流圈来源(图 4b). 根据古太平洋板块的活动历史(Maruyama and Send, 1986), 晚白垩世时期, 中国东部处于古太平洋板块俯冲作用背景之下, 这与东部陆缘钙碱性岩石组合相吻合, 而在大陆内部, 以碱性玄武岩的产出为特征, 处于俯冲背景下的弧后伸展环境, 同时形成沿切穿岩石圈的深大断裂, 如伊一舒断裂带, 沿断裂带分布着软流圈来源的弧后裂谷型玄武岩, 如辽源和伊通等地的碱性玄武岩.

4.4 辽源地区岩石圈地幔性质及其深部作用过程

辽源玄武岩中捕虏体类型主要为尖晶石二辉橄榄岩, 仅有少量的纯橄岩捕虏体, 表明辽源地区晚白垩世岩石圈地幔以尖晶石相橄榄岩为主, 这与中国东部新生代岩石圈地幔的物质组成相一致. 捕虏体中橄榄石核部的 Mg[#] 值(87.1~91.2)、透辉石 Mg[#] 值(89.5~90.8)和斜方辉石的 Mg[#] 值(89.2~91.7)以及它们的 Cr、Ni 丰度与新生代尖晶石二辉橄榄岩以及辽西阜新新增生岩石圈地幔中尖晶石二辉橄榄岩的同类矿物相似, 暗示岩石圈地幔以新生岩石圈地幔为主. 这与中国东部晚白垩世阜新玄武岩、长春大屯玄武岩、辽西曲家屯玄武岩以及鲁东大西庄玄武岩中幔源体的研究结果相一致(许文良等, 1999; 王冬艳等, 2002; 张宏福和郑建平, 2003; 闫峻等, 2005; 张辉煌等, 2006), 同时也与东北地区新生代幔源捕虏体的 Re-Os 同位素的研究结果相吻合(周琴等, 2007, 2010).

中国东部中生代—新生代火成岩及地幔捕虏体的研究表明(裴福萍等, 2004; 许文良等, 2004; 周琴等, 2007, 2010; Yu *et al.*, 2010), 地幔交代作用是广泛存在的, 同时还存在多期性的特征(Norman, 1998). 辽源地区地幔橄榄岩捕虏体中的透辉石强烈富集轻稀土元素、亏损重稀土元素以及平坦型的微量元素配分型式暗示后期地幔交代作用的存在(图 5c, 5d). 目前的研究表明, 地幔交代类型主要

有3种:富挥发分的硅酸盐熔体交代作用(Kelemen *et al.*, 1998)、碳酸盐交代作用(Ionov *et al.*, 1993; Yaxley *et al.*, 1998)以及起源于俯冲板块的H₂O-CO₂交代作用(Stalder *et al.*, 1998)。

根据单斜辉石中微量元素在碳酸盐和硅酸盐熔体中分配系数的不同可以区分地幔交代作用类型(Coltorti *et al.*, 1999),从图6中可以看出,辽源地区地幔橄榄岩捕虏体中的透辉石分别落入两个区域,硅酸盐熔体交代区域和碳酸盐熔体交代区域。大多数分析点落入硅酸盐熔体交代作用的区域内,而样品JL1-13中单斜辉石落入碳酸盐熔体的交代范围内。与其它样品中透辉石相比,JL1-13中透辉石具有较高的轻重稀土比值以及强烈的重稀土元素的亏损,该特征透辉石的形成主要有两种可能,一是地幔中存在与其相平衡的富含重稀土元素的矿物(如石榴石),二是地幔早期经历了强烈的熔体抽取,晚期又经历了碳酸盐质熔体交代作用的改造。根据目前的研究成果,新生代岩石圈地幔中未见有含石榴石的地幔橄榄岩,因而作者更认同第二种可能,这也与中国东部新生代玄武岩中幔源捕虏体的研究结果相一致(Xu *et al.*, 1998;周琴等,2007,2010; Yu *et al.*, 2010)。由此可见,辽源地幔橄榄岩以硅酸盐质熔体交代作用为主,同时存在碳酸盐质熔体交代作用。强烈的轻稀土富集以及平坦型一勺形的稀土元素配分型式与后期的交代作用有关,La和Ce相对Pr富集的勺形的稀土元素配分型式与岩石圈地

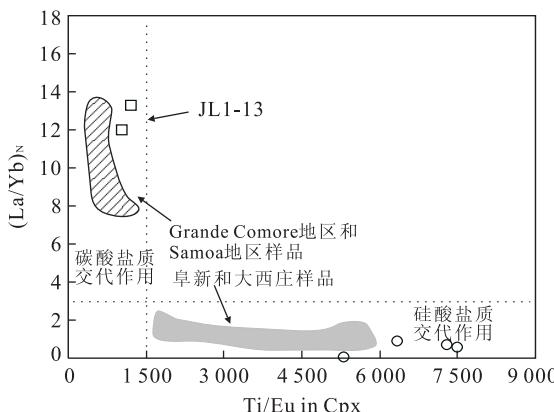


图6 辽源玄武岩中橄榄岩捕虏体单斜辉石的Ti/Eu与(La/Yb)_N图解(据Coltorti *et al.*, 1999)

Fig. 6 Plots of Ti/Eu versus (La/Yb)_N for clinopyroxenes from peridotite xenoliths entrained by the Liaoyuan basalts

Grande Comore 和 Samoa 地区数据引自 Coltorti *et al.* (1999);阜新和大西庄数据引自王微(2008)

幔中流体的色层分离柱交代模式相一致(Navon *et al.*, 1987;徐义刚,1998)。

辽源晚白垩世玄武岩中幔源捕虏体的单斜辉石强烈亏损轻稀土元素,中等富集重稀土元素的配分型式以及平坦型一勺形的稀土元素配分型式暗示岩石圈地幔经历了部分熔融作用。但与新生代双辽和舒兰地区橄榄岩捕虏体中单斜辉石的强烈亏损轻稀土元素的配分型式相比(未发表资料),辽源透辉石中轻稀土元素的亏损程度明显较弱,显示地幔经历的部分熔融程度明显偏低。

5 结论

基于辽源晚白垩世玄武岩全岩K-Ar年代学和地球化学特征,以及幔源捕虏体岩相学及其中矿物的地球化学特征的研究,得出如下结论:(1)辽源玄武岩的形成时代介于99.3~82.2 Ma之间,即形成于晚白垩世。玄武岩以碧玄岩和粗面玄武岩为主,属于碱性系列玄武岩。(2)玄武岩具有类似洋岛玄武岩型微量元素配分型式,主要来源于软流圈地幔的部分熔融。晚白垩世岩石圈地幔以新增生岩石圈地幔为主,岩石圈地幔主要经历了硅酸盐熔体的交代作用,同时存在碳酸盐熔体的交代作用。(3)辽源晚白垩世玄武岩的形成与古太平洋板块俯冲作用有关,形成于俯冲背景下的弧后伸展环境。

致谢:衷心感谢北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室在全岩K-Ar同位素定年过程中给予的帮助,同时感谢中国科学院贵阳地球化学研究所、中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室在玄武岩主量、微量元素和矿物微区分析中给予的支持与帮助。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province, 1982. Regional Geology of Jilin Province, 260—272 (in Chinese).
- Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteoric studies. In: Henderson, P., ed., Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishing Company Inc, New York, 63—114.
- Chen, W. J., Li, D. M., Li, Q., et al., 1996. Chronology and geochemistry of basalts in Xialahe rift basin. In: Liu, R. X., ed., Chronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in eastern China. Seismological Press, Beijing, 44—80 (in Chinese).

- Chi, J. S., 1988. The study of Cenozoic basalts and upper mantle beneath eastern China. China University of Geosciences Publishing House, Wuhan, 84—264 (in Chinese).
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Hinton, R. W., et al., 1999. Carbonatite metasomatism of the oceanic upper mantle: evidence from clinopyroxenes and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *Journal of Petrology*, 40(1): 133—165. doi: 10.1093/petroj/40.1.133
- Deng, J. F., E. M. L., Lu, F. X., 1987. The composition, structure and thermal condition of the upper mantle beneath Northeast China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(1): 1—10 (in Chinese).
- E, M. L., Zhao, D. S., 1987. Cenozoic basalts and deep-seated rock xenoliths in eastern China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Zhang, G. H., 1998. The genesis and evolution of bimodal volcanic rocks in Wangtian'e volcano, Changbaishan. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (3): 305—317 (in Chinese with English abstract).
- Frey, F. A., Green, D. H., Roy, S. D., 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19: 463—513. doi: 10.1093/petrology/19.3.463
- Hart, S. R., Hauri, E. H., Oschmann, L. A., et al., 1992. Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence. *Science*, 256 (5056): 517—520. doi: 10.1126/science.256.5056.517
- Hua, Y. Q., Sun, G., Ding, S. Y., et al., 2006. Geodynamic significance of late Cretaceous basalt in Jilin and its relation with oil and gas accumulation. *Global Geology*, 25 (4): 385—389 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A. W., 2003. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: isotopes and trace elements. In: Holland, H. D., Turredian, K. K., eds., Treatise on geochemistry. Oxford, Elsevier, 2: 61—101.
- Ionov, D. A., Dupuy, C., O'Reilly, S. Y., et al., 1993. Carbonated peridotite xenoliths from Spitsbergen: implications for trace element signature of mantle carbonate metasomatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 119(3): 283—297. doi: 10.1016/0012-821X(93)90139-Z
- Irvine, N. T., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. doi: 10.1139/e71-055
- Ji, W. Q., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2007. Chronology and geochemistry of volcanic rocks in the Cretaceous Suifenhe Formation in eastern Heilongjiang, China. *Acta geologica sinica*, 81(2): 266—277.
- Kelemen, P. B., Hart, S. R., Bernstein, S., 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164: 387—406. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00233-7
- Liu, J. Q., 1987. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 21—31 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R. X., Chen, W. J., Sun, J. Z., et al., 1992. The K-Ar age and tectonic environment of Cenozoic volcanic rocks in China. In: Liu, R. X., ed., Chronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in eastern China. Seismological Press, Beijing, 1—43 (in Chinese).
- 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: 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and relative plate motions: example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, 127 (3—4): 305—329. doi: 10.1016/0040-1951(86)90067-3
- Navon, O., Stolper, E., 1987. Geochemical consequence of melt percolation: the upper mantle as a chromatographic column. *Journal of Geology*, 95(3): 285—307. doi: 10.1086/629131
- Norman, M. D., 1998. Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICPMS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contrib Mineral Petrol*, 130: 240—255. doi: 10.1007/s004100050363
- Orberger, B., Xu, Y., Reeves, S. J., 1998. Platinum group elements in mantle xenoliths from eastern China. *Tectonophysics*, 296: 87—101. doi: 10.1016/s0040-1951(98)00138-3
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, western Shandong, China: constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88—97 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F. P., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Mesozoic volcanic rocks in the Southern Songliao basin: Zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of basin basement. *Earth science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 603—617 (in Chinese with English abstract).

- Pei, F. P. , Xu, W. L. , Yang, D. B. , et al. , 2011. Geochronology and geochemistry of Mesozoic mafic-ultramafic complexes in the southern Liaoning and southern Jilin provinces, NE China: constraints on the spatial extent of destruction of the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 636 — 650. doi: 10. 1016/j.sea. 2010. 10. 015
- Ren, J. Y. , Tamaki, K. , Li, S. T. , et al. , 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175—205. doi: 10. 1016/s0040-195(01)00271-2
- Rudnick, R. L. , Fountain, D. M. , 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Review of Geophysics*, 33: 267 — 309. doi: 10. 1029/95RG01302
- Rudnick, R. L. , Gao, S. , Ling, W. L. , et al. , 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609—637. doi: 10. 1016/j.lithos. 2004. 03. 033
- Stalder, R. , Foley, S. F. , Brey, G. P. , et al. , 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900—1 200 °C and 3.0—5.7 GPa: new experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (10): 1781 — 1801. doi: 10. 1016/S0016-7037(98)11010-X
- Stosch, H. G. , 1982. Rare earth element partitioning between minerals from anhydrous spinel peridotite xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46 (5): 739 — 811. doi: 10. 1016/0016-7037(82)90031-X
- Sun, S. S. , McDonough, W. F. , 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publications*, 42: 313 — 345. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1989. 042. 01. 19
- Wang, D. Y. , Xu, W. L. , Feng, H. , et al. , 2002. Nature of late Mesozoic lithospheric mantle in western Liaoning province: evidences from basalt and the mantle-derived xenoliths. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 32(4): 319—324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. , Xu, W. L. , Ji, W. Q. , et al. , 2006. Late Mesozoic and Paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning Province, China: constraints on nature of lithospheric mantle. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 30 — 40 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. , 2008. Evolution of Mesozoic and Cenozoic lithospheric mantle in eastern North China craton—evidence from igneous rocks and their deep-seated xenoliths and xenocrysts (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese).
- Weaver, B. L. , 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2—4): 381—397. doi: 10. 1016/0012-821X(91)90217-6
- Wu, F. Y. , Lin, J. Q. , Wilde, S. A. , et al. , 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103—119. doi: 10. 1016/j.epsl. 2005. 02. 019
- Wu, F. Y. , Sun, D. Y. , Ge, W. C. , et al. , 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 1 — 30. doi: 10. 1016/j.jseaes. 2010. 11. 014
- Xu, W. L. , Chi, X. G. , Yuan, C. , et al. , 1993. Mesozoic dioritic rocks and deep-seated inclusions in the Central North China platform. Geological Publishing House, Beijing, 14—67 (in Chinese).
- Xu, W. L. , Wang, D. Y. , Wang, Q. H. , et al. , 2004. Metasomatism of Silica-rich melts(liquids) in dunite xenoliths from western Shandong China: implication for Mesozoic lithospheric mantle thinning. *Acta Geological Sinica*, 78 (1): 72—80 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L. , Zheng, C. Q. , Wang, D. Y. , 1999. The discovery of mantle- and lower crust-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from western Liaoning, and their geological implications. *Geological Review*, 45(Suppl.): 444—449 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G. , 1998. Melt-rock interaction in the upper mantle and the evolution of continental mantle. *Earth Science Frontiers*, 5: 76 — 85 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G. , 1999. Continental basaltic magmatism in extensional setting: Nature and dynamic processes. In: Zheng, Y. F. , Advances in chemical geodynamics. Science Press, Beijing, 119—167 (in Chinese).
- Xu, Y. G. , Liu, C. Y. , Shi, L. B. , et al. , 1995. Upper mantle geotherm for eastern China and its geological implications. *Science in China (Ser. B)*, 38(12): 874—881 (in Chinese).
- Xu, Y. G. , Ma, J. L. , Frey, A. F. , et al. , 2005. Role of lithosphere–asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chemical Geology*, 224: 247—271. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 08. 004
- Yan, J. , Chen, J. F. , Xie, Z. , et al. , 2003. Mantle xenoliths

- from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province: new constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48(19):2139—2144 (in Chinese).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Mesozoic decratonization of the North China block. *Geology*, 36(6):467—470. doi:10.1130/G24518A.1
- Yaxley, G. M., Green, D. H., Kamenetsky, V., 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(11—12):1917—1930. doi:10.1093/petroj/39.11—12.1917
- Yu, S. Y., Xu, Y. G., Ma, J. L., et al., 2010. Remnants of oceanic lower crust in the subcontinental lithospheric mantle: trace element and Sr-Nd-O isotope evidence from aluminous garnet pyroxenite xenoliths from Jiaohe, Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 297:413—422. doi:10.1016/j.epsl.2010.06.043
- Yu, Y., 1987. Petrology and petrogenesis of the Cenozoic basaltic rocks from MT. Qingshan, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 3:55—63 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Zheng, J. P., 2003. The North China Mesozoic basalts' geochemical characters and petrological genesis: take Liaoning Fuxin as a example. *Chinese Science Bulletin*, 48(9):924—930 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. H., Xu, Y. G., Ge, W. C., et al., 2006. Geochemistry of Late Mesozoic-Cenozoic basalts in Yitong-Datum area, Jilin Province and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6):1579—1596 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., 1999. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath east China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zheng, J. P., Yu, C. M., Su, Y. P., et al., 2009. Mesozoic zonal lithosphere beneath the southern margin of the North China: significance for continental formation and evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1):28—36 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, S., Hu, Z. C., Shi, Y. F., 2009. Accurate determination of Ni, Ca and Mn in olivine by EPMA and LA-ICP-MS. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1):220—224 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Wu, F. Y., Chu, Z. Y., et al., 2007. Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterizations of the Jiaohe peridotite xenoliths in Jilin Province and constraints on the lithospheric mantle age in northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1269—1280 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Wu, F. Y., Chu, Z. Y., et al., 2010. Isotopic compositions of mantle xenoliths and age of the lithospheric mantle in Yitong, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4):1241—1264 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈文寄,李大明,李齐,等,1996.下辽河裂谷盆地玄武岩的年代学与地球化学.见:刘若新主编.中国新生代火山岩年代学与地球化学.北京:地震出版社,44—80.
- 池际尚,1988.中国东部新生代玄武岩及上地幔研究.武汉:中国地质大学出版社,84—264.
- 邓晋福,鄂莫嵒,路凤香,1987.中国东北地区上地幔组成、结构及热状态.岩石矿物学杂志,6(1):1—10.
- 鄂莫嵒,赵大升,1987.中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体.北京:科学出版社.
- 樊祺诚,刘若新,张国辉,等,1998.长白山望天鹅火山双峰式火山岩的成因演化.岩石学报,14(3):305—317.
- 花艳秋,孙罡,丁淑燕,等,2006.吉林省晚白垩世玄武岩地球动力学意义及油气成藏.世界地质,25(4):385—389.
- 吉林省地质矿产局,1982.吉林省区域地质志,260—272.
- 刘嘉麒,1987.中国东北地区新生代火山岩的年代学研究.岩石学报,4:21—31.
- 刘若新,陈文寄,孙建中,等,1992.中国新生代火山岩的K-Ar年代与构造环境.见:刘若新主编.中国新生代火山岩年代学与地球化学.北京:地震出版社,1—43.
- 裴福萍,许文良,王清海,等,2004.鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学一对岩石圈地幔性质的制约.高校地质学报,10(1):88—97.
- 裴福萍,许文良,杨德彬,等,2008.松辽盆地南部中生代火山岩:锆石U-Pb年代学及其对基地性质的制约.地球科学,33(5):603—617.
- 王冬艳,许文良,冯宏,等,2002.辽西中生代晚期岩石圈地幔的性质:来自玄武岩和地幔捕虏体的证据.吉林大学学报(地球科学版),32(4):319—324.
- 王微,许文良,纪伟强,等,2006.辽东中生代晚期和古近纪玄武岩及深源捕虏晶一对岩石圈地幔性质的制约.高校地质学报,12(1):30—40.
- 王微,2008.华北克拉通东部中新生代岩石圈演化—来自火成岩与深源捕虏体(晶)证据(博士学位论文),长春:吉林大学.
- 徐义刚,1998.上地幔熔体—岩石相互作用与大陆地幔演化.地学前缘,5:76—85.
- 徐义刚,1999.拉张环境中的大陆玄武岩浆作用:性质及动力学过程,见:郑永飞,主编,化学地球动力学.北京:科技

- 出版社,119—167.
- 徐义刚,林传勇,史兰斌,等,1995.中国东部上地幔地温线及其地质意义.中国科学(B辑),38(12):874—881.
- 许文良,迟效国,袁朝,等,1993.华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体.北京:地质出版社,14—67.
- 许文良,郑常青,王冬艳,等,1999.辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义.地质论评,45(增刊):444—449.
- 许文良,王冬艳,王清海,等,2004.鲁西纯橄岩捕虏体中富硅质熔(流)体的交代作用:对中生代岩石圈地幔减薄的意义.地质学报,78(1):72—80.
- 闫峻,陈江峰,谢智,等,2003.鲁东晚白垩世玄武岩中的地幔捕虏体:对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据.科学通报,48(14):1570—1574.
- 余扬,1987.吉林双辽七星山新生代玄武岩的特点及其成因探讨.岩石学报,3:55—63.
- 张宏福,郑建平,2003.华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因:以辽宁阜新为例.科学通报,48(6):603—609.
- 张辉煌,徐义刚,葛文春,等,2006.吉林伊通一大屯地区晚中生代—新生代玄武岩的地球化学特征及其意义.岩石学报,229(6):1579—1596.
- 郑建平,1999.中国东部地幔置换作用与中新生代岩石圈减薄.武汉:中国地质大学出版社.
- 郑建平,余淳梅,苏玉平,等,2009.中生代华北南缘带状岩石圈结构特征及大陆形成演化意义.地球科学,34(1):28—36.
- 郑曙,胡兆初,史玉芳,2009.橄榄石中Ni、Ca、Mn含量的电子探针与激光等离子体质谱准确分析.地球科学,34(1):220—224.
- 周琴,吴福元,储著银,等,2007.吉林蛟河地幔橄榄岩包体的Sr-Nd-Hf-Os同位素特征与岩石圈地幔时代.岩石学报,23(6):1269—1280.
- 周琴,吴福元,储著银,等,2010.吉林省伊通地区橄榄岩包体的同位素特征与岩石圈地幔时代.岩石学报,6(4):1241—1264.