

辽东半岛早第三纪饮马湾山辉长岩体的基本特征 及岩浆结晶过程

徐 钊 韩宝福 张 磊 舒桂明

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 辽东半岛饮马湾山辉长岩体为早第三纪晚期的侵入岩体, 是东北地区最年轻的镁铁质侵入体之一。对该岩体进行了岩石学和地球化学方面的研究, 并采用 PELE(硅酸岩熔体结晶计算软件)模拟了岩浆结晶过程。研究表明, 饮马湾山辉长岩具有高的 Al_2O_3 含量(16.28%~19.27%)和低的 MgO 含量(3.63%~5.57%), 属于高铝玄武质。该辉长岩主要造岩矿物有橄榄石、单斜辉石、磁铁矿、钛铁矿、黑云母、斜长石和钾长石。辉长岩所具有的辉绿辉长结构、大量细长针状磷灰石、单斜辉石中较低的 Al^{VI}/Al^{IV} 值(0.00~0.28, 平均为 0.12)及橄榄石中较低的 CaO 含量(0.04%~0.24%, 平均为 0.12%)均体现出浅成侵入岩的特点。PELE 硅酸岩熔体结晶模拟结果和岩石结构特征表明, 辉长岩中矿物结晶顺序依次为斜长石、橄榄石、磁铁矿、单斜辉石、钛铁矿、磷灰石、黑云母、钾长石。该辉长岩是高铝玄武岩岩浆快速侵位至近地表处冷却结晶的产物, 可能是该地区新生代强烈的岩浆底侵作用在浅部的表现。

关键词: 辽东半岛, 早第三纪, 辉长岩, 结晶过程, PELE 软件

中图分类号: P588.12⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)05-0389-09

General characteristics and crystallization process of Early Tertiary Yinmawanshan gabbro in Liaodong Peninsula

XU Zhao, HAN Bao-fu, ZHANG Lei and SHU Gui-ming

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Yinmawanshan gabbro in southern Liaodong Peninsula is one of the youngest plutons in Northeast China. In this paper, the gabbro was investigated by petrologic and geochemical methods and calculated by means of PELE program (a silicate liquid crystallization program). The gabbro has high Al_2O_3 (16.28%~19.27%) and low MgO (3.63%~5.57%), belonging to high aluminum basalt. The gabbro has the assemblage of olivine + clinopyroxene + magnetite + ilmenite + biotite + plagioclase + K-feldspar. The ophitic and subophitic textures, elongated apatite crystals, low Al^{VI}/Al^{IV} ratios (0.00~0.28, 0.12 on average) in clinopyroxene, and low CaO content in olivine (0.04%~0.24%, average 0.12%) indicate that the gabbro was crystallized at a low pressure. The sequence of mineral crystallization in the gabbro is as follows: plagioclase, olivine, magnetite, clinopyroxene, ilmenite, apatite, biotite, K-feldspar, as revealed by petrography combined with the calculation using PELE program. The gabbro is indicative of intense magmatism in Cenozoic in Northeast China.

Key words: Liaodong Peninsula; Early Tertiary; gabbro; crystallization process; PELE program

长期相对稳定的华北克拉通在中、新生代强烈活动, 岩石圈发生了明显的减薄, 伴随着大面积、强烈的岩浆活动 (Fan and Menzies, 1992; Fan *et al.*, 2000; Menzies *et al.*, 1993; 路凤香等, 1996; 郑建平, 1999; 吴福元等, 1999, 2003; 许

收稿日期: 2008-03-06; 修订日期: 2008-04-10

基金项目: 北京大学大型仪器开放测试基金资助项目(0000001983)

作者简介: 徐 钊 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事大地构造与岩石地球化学研究, E-mail: pkuxuzhao@gmail.com; 通讯作者: 韩宝福 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, 构造地质学专业, E-mail: bfhan@pku.edu.cn.

文良等, 2000; Xu, 2001; Zhang *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 1998, 2002, 2004; 周新华, 2006)。与中国东部其他地区相比, 东北地区新生代基性岩浆作用延续时间长, 主要沿 NNE 向断裂呈带状分布(赵海玲等, 1996), 所形成的玄武岩经常含有大量幔源包裹体, 为研究中国东部岩石圈地幔的形成和演化提供了难得的机会(鄂莫岚等, 1987)。

辽东饮马湾山辉长岩体是东北地区最年轻的镁铁质侵入体之一, 暗示着该地区在新生代期间发生过强烈的岩浆底侵作用, 对研究深部地壳结构和岩浆起源与成因有着重要意义(袁洪林等, 2003)。本文将在前人基础上, 通过岩石学、地球化学和计算模拟的方法, 对该辉长岩体的基本特征及岩浆结晶过程进行研究, 以此来进一步揭示东北地区新生代岩浆作用特点及其与大地构造背景之间的关系。

1 地质背景

辽东半岛是华北克拉通的重要组成部分, 在构造分区上属于东部块体(Zhao *et al.*, 2005)。区内发育太古宙、古元古代的变质结晶基底。基底由较老的鞍山群及不整合于其上的辽河群两部分组成。基底之上的盖层为自震旦纪以来的沉积地层。

自中生代以来, 华北克拉通东部由稳定转化为强烈活动。辽东半岛岩浆作用发育, 形成了大量的花岗岩类岩石(林景任等, 1992)。这些花岗岩主要形成于三叠纪(212~233 Ma)、侏罗纪(156~180 Ma)和早白垩世(117~131 Ma) 3 个阶段, 以早白垩世为主。其中, 早白垩世岩浆活动持续时间约为 10 Ma, 可能与太平洋-库拉板块向欧亚大陆俯冲时所引起的华北东部岩石圈的拆沉作用有关(吴福元等, 2005; Wu *et al.*, 2005)。辽东半岛南部发育着 NNE 向的金州拆离断层, 其东侧为以辽南太古宙杂岩为核心的变质核杂岩(杨中柱等, 1996; 路孝平等, 2004; Liu *et al.*, 2005)。沿金州拆离断层, 自北向南发育着一系列中生代花岗岩体, 依次为古道岭、万家岭、庙岭、饮马湾山、七星台山、城子坦和洼子店等。其中, 饮马湾山花岗岩体为多期次侵入的复式岩体, 由外向内分别是片麻状花岗岩、似斑状花岗岩和中细粒二长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 120~130 Ma, 属于早白垩世同变形就位的花岗岩体, 体现出中国东部在早白垩世时处于伸展构造背景(郭春丽等, 2004)。

除花岗岩外, 该地区还发育晚中生代到第三纪的碱性玄武岩, 如曲家屯(82±3 Ma)、乱石山子(58±2 Ma)、菜园子(36±1 Ma 和 39±1 Ma) 等碱性玄武岩(王薇等, 2006, 2007)。饮马湾山辉长岩体也是这个时期幔源岩浆活动的产物。

饮马湾山辉长岩体位于饮马湾山花岗岩体的南侧, 出露面积不足 1 km²(图 1), 侵入到花岗岩体中。该辉长岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄为 31.9±0.4 Ma, 为早第三纪晚期的侵入岩, 是东北地区最年轻的镁铁质侵入体之一(袁洪林等, 2003)。在采石场剖面中, 辉长岩体顶部与饮马湾山花岗岩体的似斑状花岗岩接触。辉长岩体边缘部分含有大量灰白色的长英质捕虏体。这些捕虏体大小不等, 呈角砾状。根据其形

状和成分判断, 这些捕虏体可能是基性岩浆在上升侵位过程中捕获的花岗岩围岩。两个岩体的接触带还发育有大量后期形成的黑色细小岩脉, 侵入到花岗岩体和辉长岩体中。与之相比, 辉长岩体底部岩石位于岩体的中心部位, 岩石组成单一, 不含捕虏体, 也未被后期形成的岩脉侵入。

2 矿物成分与结晶顺序

野外观察发现, 该岩体底部岩石中的矿物颗粒粒度较大, 呈典型的辉绿辉长结构, 岩石颜色为浅灰黑色; 相比之下, 岩体顶部岩石中的矿物颗粒粒度较小, 代表快速冷却结晶的过程, 岩石颜色也较岩体底部岩石深, 为深灰黑色。

总体上, 该辉长岩呈灰黑色, 为中粗粒辉绿辉长结构(图 2a)。斜长石呈自形长柱状、板状, 形成格架, 其余矿物呈他形充填于斜长石格架的间隙中。岩石主要矿物组成为: 橄榄石(约 5%)+单斜辉石(15%)+黑云母(约 5%)+斜长石(60%)+钾长石(10%)+钛铁氧化物(5%)以及少量磷灰石、斜锆石。此外, 部分橄榄石颗粒具有斜方辉石反应边和极少量的角闪石反应边。岩石定名为中粗粒黑云母橄榄石二长辉长岩。

橄榄石为粒状, 粒径 0.4~1.5 mm, 晶形较好, 部分颗粒具有斜方辉石反应边。橄榄石的 Fo 值很低(表 1), 在 41~61 之间, 平均为 47, 属于透铁橄榄石和镁铁橄榄石。绝大多数橄榄石成分均匀, 从核部到边部, Fo 值基本恒定。橄榄石中 CaO 含量分布在 0.04%~0.24% 之间, 平均为 0.12%。

辉石主要为单斜辉石, 呈他形围绕橄榄石和钛铁氧化物生长, 充填于斜长石格架的间隙中(图 2b)。单斜辉石的 Al₂O₃ 含量较低, 并随着 TiO₂ 含量增加而增加, 属于普通辉石, 而斜方辉石属于紫苏辉石(表 1), 主要作为橄榄石的反应边出现(图 2b、2d), 是橄榄石与岩浆结晶后期的残余熔体之间相互反应的结果。

钛铁氧化物分为钒钛磁铁矿和钛铁矿两种(表 1), 二者往往呈伴生关系, 部分磁铁矿中含有针状钛铁矿出溶体(图 2f)。钛铁氧化物存在于斜长石格架的间隙中, 大部分被单斜辉石所包裹, 反映出其结晶顺序早于单斜辉石(图 2c)。

黑云母为红棕色片状体, 吸收性显著, 呈他形, 主要作为磁铁矿和钛铁矿的次生反应边产出(图 2a、2c、2d)。黑云母中 TiO₂ 和 MgO 含量较高(表 1), 并且 TiO₂ 随着 MgO 升高而降低。钛铁矿周围生长的黑云母比磁铁矿周围生长的黑云母具有更高的 TiO₂ 含量。这表明在岩浆结晶后期, 残余熔体中逐渐富集的 K₂O、MgO 和 H₂O 与早期结晶的钛铁氧化物发生了交代作用。

岩石样品中斜长石的粒度变化较大。岩体顶部岩石样品中的斜长石颗粒较小, 呈自形柱状(0.2~0.4)mm×(0.5~1)mm。岩体底部岩石样品中的斜长石颗粒较大, 呈自形板状(0.5~1)mm×(3~7)mm。斜长石普遍发育聚片双晶和卡钠复合双晶, An 值(23~59)较低(表 1), 以奥长石、中长石、拉长石为主。极少数斜长石颗粒牌号较高, 发育正环带,

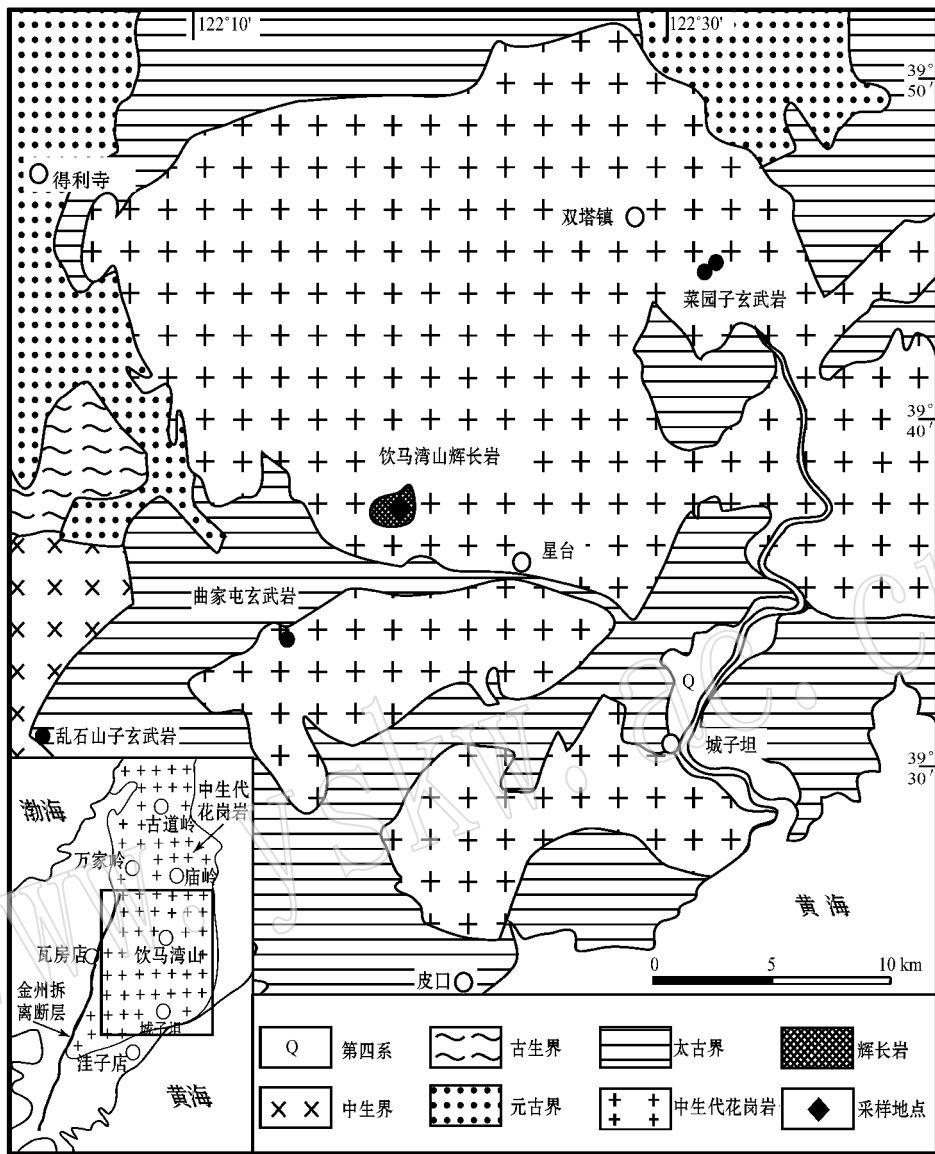


图 1 辽东半岛南部饮马湾山地区地质简图 [乱石子、曲家屯和菜园子玄武岩的分布根据王微等(2006, 2007)]
 Fig. 1 Simplified geological map of Yinmawanshan area in southern Liaodong Peninsula (locations of Luanshishanzi, Qujiatun and Caiyuanzi basalts from Wang Wei *et al.*, 2006, 2007)

从核部到边部 An 值由 75 降至 53。这表明在岩浆就位前的高压环境下有少量的斜长石结晶,但绝大部分斜长石的结晶发生于岩浆就位以后。部分橄榄石和磁铁矿中包含有斜长石(图 2a、2f)表明斜长石的结晶不晚于橄榄石和磁铁矿。且橄榄石中的斜长石 An 值(62)远高于磁铁矿中的斜长石 An 值(26 和 27)表明橄榄石比磁铁矿先结晶。

钾长石(表 1)呈填隙状存在于斜长石颗粒之间(图 2e),包裹磁铁矿、钛铁矿及辉石,表明钾长石结晶晚于其他主要造岩矿物,代表了岩浆的最终冷却固结。

此外,辉长岩中含有少量的磷灰石。岩体顶部的磷灰石成针状,代表岩浆与围岩接触后,快速冷却结晶。岩体底部的磷灰石多呈柱状,表明内部岩浆随着温度的降低缓慢结晶的过程。

3 岩石地球化学

饮马湾山辉长岩主量元素分析结果见表 2。除接触带样品和 LS-10 样品以外,饮马湾山辉长岩的 SiO_2 含量在 48.05%~50.24% 之间, Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 2.87%~3.43% 和 1.30%~1.94%,全碱含量较高,成分介于碱性至亚碱性玄武岩之间(图 3)。 Al_2O_3 含量在 16.28%~19.27% 之间, MgO 的含量在 3.63%~5.57% 之间,属于高铝玄武质岩浆。 TiO_2 含量在 1.99%~2.69% 之间, TFe_2O_3 的含量为 9.91%~13.49%, $Mg^\#$ 为 46~54。

接触带样品由于受到花岗岩围岩的影响,其 SiO_2 和全碱

$w_B/\%$

表1 辉长岩中各主要造岩矿物的化学成分

Table 1 Chemical composition of rock-forming minerals in gabbro from Yimawanshan

矿物	橄榄石	单斜辉石	斜方辉石(钛铁 氧化物反应边)	斜方辉石(钛铁 氧化物反应边)	钛铁矿	磁铁矿	黑云母	斜长石 (橄辉石中)	斜长石 (钛铁氧化物中)	钾长石	
测点数	30	21	6	1	4	8	5	17	1	2	7
SiO ₂	34.48	50.63	52.25	51.40	0.04	0.14	38.17	55.32	51.36	60.73	64.53
TiO ₂	0.03	0.98	0.09	0.25	51.34	10.31	5.03	0.06	0.16	0.21	0.04
Al ₂ O ₃	0.01	1.91	0.39	0.34	0.07	2.49	13.01	27.25	30.00	24.05	18.73
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.01	0.00	0.02	0.11	0.07	0.02	0.00	0.01	0.01
FeO	43.08	11.82	24.93	28.85	45.88	78.55	14.26	0.40	0.73	0.35	0.15
MnO	0.72	0.29	0.58	0.74	0.68	0.30	0.08	0.02	0.00	0.04	0.00
MgO	21.84	13.12	20.78	17.17	1.59	0.46	15.90	0.07	0.04	0.31	0.00
CaO	0.12	20.16	1.04	0.97	0.00	0.00	0.06	10.22	13.16	5.74	0.46
NiO	0.02	0.02	0.00	0.01	0.07	0.02	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00
N ₂ O	0.03	0.42	0.04	0.02	0.03	0.06	0.36	5.84	4.38	8.13	3.28
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	8.84	0.37	0.19	0.79	11.91
Total	100.36	99.37	100.09	99.74	99.71	92.43	95.83	99.57	100.03	100.36	99.11
Mg [#]	47	70	61	51	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂	-	3.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ^{IV} /Al ^{VI}	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
An	-	-	-	-	-	-	-	48	62	27	2
Ab	-	-	-	-	-	-	-	50	37	69	29
Or	-	-	-	-	-	-	-	2	1	4	69

注:主要造岩矿物化学成分分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 JXA-8100 电子探针 X 射线显微分析仪上完成;测试条件:加速电压 15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑 $1 \mu\text{m}$,采用 PRZ 修正方法,以美国 SPI 公司 53 种矿物为标准样品; $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$; $\text{Al}_2 = 100 \times \text{Al}^{\text{IV}} / (\text{Si} + \text{Al}^{\text{IV}})$; 电子探针定性分析显示磁铁矿中含有少量的钼。

表 2 饮马湾山辉长岩主量元素分析结果

Table 2 Major element compositions of gabbro from Yimawanshan

样品	w _B /%													
	LS-01 岩体顶部	LS-02 岩体顶部	LS-03 岩体顶部	LS-04 接触带	LS-05A 接触带	LS-05B 接触带	LS-06 接触带	LS-07 岩体底部	LS-08 岩体底部	LS-09 岩体底部	乱石山子 玄武岩	曲家屯 玄武岩	菜园子 玄武岩 I	菜园子 玄武岩 II
SiO ₂	49.73	50.24	49.38	54.09	53.92	53.78	53.75	50.05	48.05	49.03	45.44	43.71	43.80	44.51
TiO ₂	2.21	2.09	1.99	2.26	2.28	2.27	2.26	2.18	2.69	2.56	2.39	2.60	2.03	2.47
Al ₂ O ₃	18.43	18.68	18.04	16.63	16.62	16.75	16.70	19.27	16.28	18.61	11.12	13.87	12.70	12.14
Fe ₂ O ₃	10.57	10.06	10.70	10.12	10.20	10.24	10.22	9.91	13.49	10.87	13.06	13.69	11.98	12.44
MnO	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.13	0.18	0.14	0.18	0.20	0.17	0.15
MgO	4.21	4.08	5.23	3.18	3.18	3.16	3.16	3.63	5.57	4.03	13.55	8.18	8.39	10.11
CaO	9.63	9.54	9.76	6.78	6.99	6.98	6.88	8.61	7.76	8.93	10.42	12.44	12.73	11.96
Na ₂ O	3.00	3.05	2.87	3.53	3.55	3.55	3.59	3.43	3.13	3.27	2.22	2.49	1.83	1.89
K ₂ O	1.38	1.39	1.30	2.40	2.22	2.23	2.29	1.86	1.94	1.73	0.76	0.93	1.34	1.11
P ₂ O ₅	0.34	0.35	0.34	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.55	0.45	0.44	0.58	0.43	0.29
LOI	-0.13	-0.17	0.03	0.12	0.15	0.15	0.26	0.18	-0.10	0.13	1.22	1.88	4.32	2.71
Total	99.51	99.45	99.78	99.76	99.76	99.76	99.76	99.74	99.54	99.75	100.80	100.57	99.70	99.77
Mg [#]	48.47	48.93	53.58	42.55	42.35	42.15	42.23	46.41	49.38	46.63	72.56	64.90	58.14	61.72

注：主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的 ARL ADVANT'XP + 型顺序式 X 荧光光谱仪上完成；乱石山子、曲家屯、菜园子玄武岩平均组成根据王徽等(2006, 2007)。

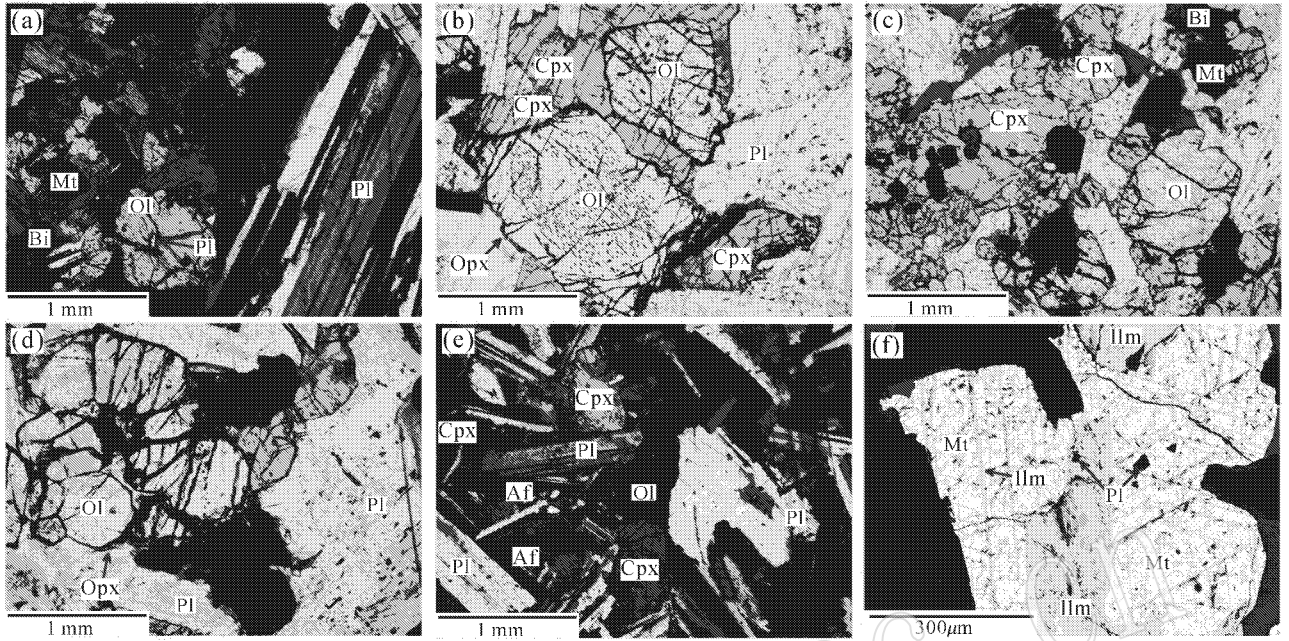


图 2 饮马湾山辉长岩的显微结构

Fig. 2 Photomicrographs of the Yinmawanshan gabbro

a—橄榄石中包裹斜长石,正交偏光;b—具有斜方辉石反应边的橄榄石被单斜辉石包裹,单偏光;c—单斜辉石包裹磁铁矿和钛铁矿,单偏光;d—橄榄石的斜方辉石反应边及钛铁氧化物的黑云母反应环,单偏光;e—辉长结构及斜长石间隙中填充的钾长石,正交偏光;f—磁铁矿和钛铁矿及其包裹的斜长石,背散射图像;Af—钾长石,Apt—磷灰石,Bi—黑云母,Cpx—单斜辉石,Ilm—钛铁矿,Mt—磁铁矿,Ol—橄榄石,Opx—斜方辉石,Pl—斜长石

a—plagioclase in olivine, cross polarized; b—poikilitic olivine with orthopyroxene rim, plane polarized; c—magnetite and ilmenite in clinopyroxene, plane polarized; d—orthopyroxene reaction rim of olivine and biotite around Ti-Fe oxides, plane polarized; e—ophitic texture and K-feldspar in plagioclases, cross polarized; f—magnetite, ilmenite and plagioclase in Ti-Fe oxides, BSE image; Af—K-feldspar, Apt—apatite, Bi—biotite, Cpx—clinopyroxene, Ilm—ilmenite, Mt—magnetite, Ol—olivine, Opx—orthopyroxene, Pl—plagioclase

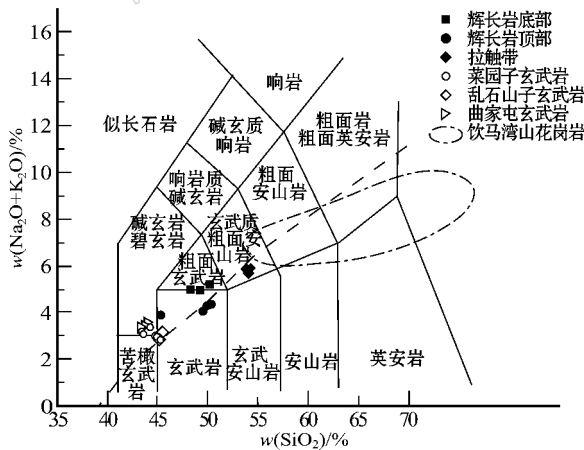


图 3 饮马湾山辉长岩硅碱图

Fig. 3 Total alkali versus SiO₂ diagram for the Yinmawanshan gabbro

乱石山子、曲家屯、菜园子玄武岩组成根据王微等 (2006, 2007); 饮马湾山花岗岩组成根据郭春丽等 (2004) compositions of Luanshishanzi, Qujiatun, Caiyuanzi basalts from Wang Wei *et al.* (2006, 2007); compositions of the Yinmawanshan granite from Guo Chunli *et al.* (2004)

含量明显偏高, Mg[#] (42~43) 偏低。LS-10 样品的 SiO₂、Al₂O₃ 和 CaO 含量明显偏低, 而 Fe₂O₃ 和 MgO 含量明显偏高, 可能与样品中的暗色细小岩脉有关。显然, 这些样品不能代表岩体的化学成分。

与曲家屯玄武岩、乱石山子玄武岩(王微等, 2006)及菜园子玄武岩(王微等, 2007)相比, 饮马湾山辉长岩的 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O 和 K₂O 的含量较高, 而 TF₂O₃、MgO、CaO 的含量较低。

4 岩浆结晶过程的模拟

PELE 软件(Boudreau, 1999)是以吉布斯自由能最小化为基本计算原则的硅酸盐熔体-晶体-流体模拟计算软件。它是 MELTS 软件(Ghiorso and Sack, 1995)基于 Microsoft Windows 的一种简化改进版本, 可根据硅酸盐熔体中主要元素含量对其结晶过程进行简单有效的计算模拟。

在模拟过程中, 假定饮马湾山辉长岩的全岩成分即为岩浆成分, 采用受围岩影响最小、最能反映玄武岩浆化学组成的岩体底部岩石样品的平均成分作为岩浆成分。根据岩浆成分, 对于岩浆中 Fe 的价态, 选择 Fe₂O₃/FeO=0.2 质量分数,

下同)进行调整(Rollinson, 1993)。同时,假设 H_2O 的含量等于 $0.11 \times FeO + \text{烧失量}$,即所有挥发分均为 H_2O 。

计算模拟选取等压降温条件下的平衡结晶过程,并根据镜下观察选择合适的矿物组合($Ol + Cpx + Pl + Mt + Ilm + Apt + Bi + Af$),以近似地模拟岩浆快速侵位后的缓慢冷却过程。由于斜方辉石是橄榄石与残余岩浆反应的结果,而非从熔体中直接结晶,所以斜方辉石结晶的模拟过程是不可靠的。模拟过程采用不含斜方辉石的矿物组合。同时,为了检验压力对岩浆结晶过程的影响,选取不同的压力条件进行多次模拟,获取不同压力下每种矿物的初始结晶温度。

应该注意的是,以平衡结晶为条件计算出的岩浆结晶过程与实际结果是有差别的。PELE软件以吉布斯自由能最小化为基本计算原则,所得出的矿物与矿物之间、矿物与熔体之间是完全平衡的关系。而对于类似饮马湾山辉长岩体的小侵入岩体,岩浆冷却速度较快,先结晶的矿物不一定与后期残余熔体达到PELE软件所模拟出的完全平衡。在模拟过程中,当岩浆结晶程度较小时,模拟结果和实际情况间的差距较小;但随着岩浆结晶程度的加大,模拟结果和实际情况间的差距也会不断加大,甚至在模拟结果中出现橄榄石被重新吸收而钾长石未晶出现象。为了解决这一问题,在其他条件不变的情况下,采取两步模拟的方法。由于样品中橄榄石的 Fo 值平均为47。因此,在第1步的模拟过程中,当橄榄石的 Fo 值降到50左右时,暂停计算,将所有已结晶部分从体系中移出。然后,采用残余熔体继续第2步模拟结晶过程。这种模拟方式粗略地考虑了岩浆冷却结晶过程中的不平衡因素,将先期结晶的矿物从体系中去除,排除了这些矿物对后期残余熔体模拟计算时的影响。在第2步模拟的结果中,黑云母和钾长石顺利地依次晶出,得出了较好的结果。这样,就得到该玄武质岩浆体系中各种矿物的结晶曲线(图4)。

饮马湾山辉长岩橄榄石 Fo 值(41~61,平均为47)很低。根据Revillon等(1999)提出的计算方法,选取橄榄石和熔浆

之间 $Fe-Mg$ 分配系数为0.33(Bickle, 1982),假定主岩中的 FeO 含量(平均为9%左右)代表原始岩浆中 FeO 的含量,计算出与橄榄石平衡的熔体中 MgO 含量不超过3%。这证明橄榄石从该基性岩浆中直接晶出,并非深源捕虏晶。因此,采用PELE软件在等压降温的条件下模拟岩浆的平衡结晶过程基本是可靠的。

5 讨论

主元素地球化学特征显示,饮马湾山辉长岩体是高铝玄武质岩浆结晶的产物。一般认为中国东部新生代玄武岩起源于软流圈地幔(鄂莫岚等,1987;赵海玲等,1996)。实验岩石学的研究也表明,玄武质岩浆应是地幔橄榄岩部分熔融的产物(Yoder and Tilley, 1962)。依据Frey和Prin(1978)、邓晋福等(1987)提出的判定原生玄武岩浆的标准,结合饮马湾山辉长岩体高铝(16.28%~19.27%)、低 $Mg^{\#}$ (46~54),且不含深源岩石包体的特点,可以断定该岩浆并非与地幔橄榄岩平衡的幔源原生玄武岩浆。而更早形成的曲家屯、乱石山子、菜园子等碱性玄武岩具有原生玄武岩浆的特点,是地幔橄榄岩部分熔融的产物(王薇等,2006,2007)。因此,形成饮马湾山辉长岩的高铝玄武质岩浆可能是由原生玄武岩浆演化的产物。

饮马湾山辉长岩的 TiO_2 、 Al_2O_3 和 K_2O 含量具有大陆裂谷型玄武岩的特点(赵崇贺,1989)。单斜辉石的 Al_2/TiO_2 值($Al_2 = Al^{IV}/(Si + Al^{IV}) \times 100$)偏低也表明该玄武质岩浆产生于大陆拉伸环境下(Loucks, 1990)。前人的研究表明,晚中生代以来,中国东部及毗邻地区发生了广泛而多次重复的伸展作用(Ren *et al.*, 2002)。日本海在渐新世或更早以前从亚洲大陆的边缘张开,在中新世早期到中期加速扩张(Kano *et al.*, 2007),并于15.4~15.2 Ma产生了在日本诸岛广泛分布黑矿型矿床(Horikoshi, 1990)。因此,饮马湾山辉长岩的特点与晚中生代以来中国东北地区的伸展环境是一致的。

饮马湾山辉长岩所具有的辉绿辉长结构以及岩体顶部所具有的大量针状磷灰石体现出浅成侵入相的特点(Morata *et al.*, 2005)。单斜辉石的 Al^{VI}/Al^{IV} 值(=0.00~0.28,平均为0.12)较低,表明其结晶压力较低(Green and Ringwood, 1968)。橄榄石具有很低的 Fo 值和 CaO 含量,也具有在低压条件下从基性岩浆中结晶的特点(Brown, 1982)。而较早喷出的乱石山子、曲家屯、菜园子等玄武岩直接覆盖在中生代花岗岩之上(图1)也表明早在饮马湾山辉长岩侵位之前,该地区就已经遭受强烈剥蚀,花岗岩被抬升至地表。因此,饮马湾山辉长岩的侵位深度很浅,为浅成侵入岩。

岩相学观察和岩浆结晶过程模拟的结果表明,辉长岩中各种矿物在低压下的结晶顺序为:斜长石、橄榄石、磁铁矿、单斜辉石、钛铁矿、磷灰石、黑云母和钾长石。应用低压环境下的橄榄石与单斜辉石之间阳离子 $Mg-Fe^{2+}$ 交换地质温度计(Loucks, 1996),得到饮马湾山辉长岩橄榄石与单斜辉石的平衡温度主要介于983~1055°C之间,平均为999°C,代表单

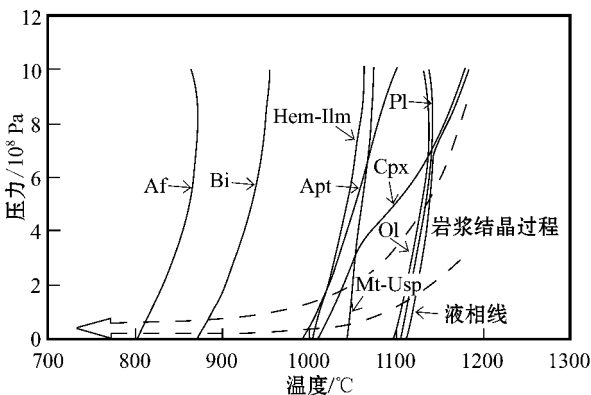


图4 饮马湾山辉长岩结晶序列

Fig. 4 Crystallization sequence of the Yinmawanshan gabbro

Hem—赤铁矿; Usp—钛铁矿

Hem—hematite; Usp—ulvöspinel

斜辉石初始结晶的温度,与 PELE 软件模拟计算的结果相近。采用二长石地质温度计(Elkins and Grove, 1990)对低 An 值的斜长石及与之平衡的钾长石矿物对进行计算,得到温度为 769~819℃,代表钾长石的初始结晶温度,也与用 PELE 计算模拟得到的钾长石结晶温度相一致,接近于岩浆的固结温度。这表明采用 PELE 进行岩浆结晶过程的计算模拟比较准确。

岩浆结晶过程模拟的结果说明,只有在压力小于 7×10^8 Pa 的条件下,橄榄石才能先于单斜辉石结晶。同时,只有在压力小于 3×10^8 Pa 的条件下,磁铁矿才能早于单斜辉石结晶。这说明除了少量的斜长石和橄榄石以外,绝大部分岩浆结晶时的压力条件应该在 3×10^8 Pa 以下,即侵入深度不超过 10 km。其结晶过程如图 4 所示。

样品中的黑云母大多围绕磁铁矿和钛铁矿生长,具有明显的反应环结构,这可能是后期残余的富镁岩浆对早期生成的磁铁矿和钛铁矿进行交代的结果,说明结晶晚期残余岩浆有一个富镁的过程。在岩石样品中,斜方辉石作为橄榄石与晚期残余熔体的反应边存在。斜方辉石的 $Mg^{\#}$ (57~68) 高于橄榄石的 $Mg^{\#}$ (41~61) 是晚期残余熔体中富集镁的证据。这可能是由于钛铁氧化物大量结晶,导致残余熔体中相对富镁贫铁。

6 结论

饮马湾山辉长岩是高铝玄武岩岩浆迅速上升侵位后冷却结晶的产物,具有大陆拉张环境下成因的特点,表明中国东北地区在新生代发生了强烈伸展作用。岩相学观察和岩浆结晶过程模拟表明饮马湾山辉长岩为浅成侵入岩体。在岩浆就位之前,其结晶程度很低,主要结晶过程发生于岩浆就位之后的低压环境下,矿物结晶顺序依次为:斜长石、橄榄石、磁铁矿、单斜辉石、钛铁矿、磷灰石、黑云母、钾长石。在结晶作用晚期,残余熔体发生了镁的相对富集。熔体与钛铁氧化物反应生成富镁的黑云母,与橄榄石反应生成比橄榄石更加富镁的斜方辉石反应边。

References

Bickle M J. 1982. The magnesium contents of komatiitic liquids [A]. Arndt N T and Nisbet E G. Komatiites [C]. London : George Allen and Unwin Ltd. , 479~494.

Boudreau A E. 1999. PELE—a version of the MELTS software program for the PC platform [J]. Computers and Geosciences , 25 : 201~203.

Brown G E. 1982. Olivines and silicate spinels [A]. Ribbe P H. Orthosilicates , Review in Mineralogy [C]. Mineral Society American , 5 : 275~381.

Deng Jinfu , E Molan and Lu Fengxiang. 1987. Composition , texture and thermal behavior of upper mantle in eastern Liaoning [J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 6(1) : 1~10 (in Chinese with English abstract).

E Molan and Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic Basalt and Xenoliths from Depth in Eastern China [M]. Beijing : Science Press , 10~133 (in Chinese).

Elkins L T and Grove T L. 1990. Ternary feldspar experiments and thermodynamic model [J]. American Mineralogist , 75(5~6) : 544~559.

Fan Weiming and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and asthenosphere mantle beneath eastern China [J]. Geotectonica et Metallogenia , 16 : 171~179.

Fan Weiming , Zhang Hongfu , Baker J , et al. 2000. On and off the North China craton : Where is the Archean keel [J]. Journal of Petrology , 41 (7) : 933~950.

Frey F A and Prinz M. 1978. Ultramafic inclusions from San Carlos , Arizona , petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis [J]. Earth and Planetary Science Letters , 38 : 139~176.

Gao Shan , Luo Tingchuan , Zhang Benren , et al. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 62(11) : 1959~1975.

Gao Shan , Rudnick R L , Carlson R W , et al. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. Earth and Planetary Science Letters , 198 : 307~322.

Gao Shan , Rudnick R L , Yuan Honglin , et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. Nature , 432 : 892~897.

Ghiorso M S and Sack R O. 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpretation and extrapolation of liquid \pm solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 119 : 197~212.

Green T H and Ringwood A E. 1968. Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 18 : 105~162.

Guo Chunli , Wu Fuyuan , Yang Jinhui , et al. 2004. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China : example from Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula [J]. Acta Petrologica Sinica , 20(5) : 1193~1204 (in Chinese with English abstract).

Horikoshi E. 1990. Opening of the Sea of Japan and Kuro deposit formation [J]. Mineralium Deposita , 25(2) : 140~145.

Kano K , Uto K and Ohguchi T. 2007. Stratigraphic review of Eocene to Oligocene successions along the eastern Japan Sea : Implication for early opening of the Japan Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences , 30 : 20~32.

Lin Jingqian , Tan Dongjuan , Chi Xiaoguo , et al. 1992. Mesozoic Granites in Jiao-Liao Peninsula [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~208 (in Chinese).

Liu Junlai , Davis G A , Lin Zhiyong , et al. 2005. The Liaonan metamorphic core complex , Southeastern Liaoning Province , North China : A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning , Korea and contiguous area [J]. Tectonophysics , 407 : 65~80.

Loucks R R. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/ Ti ratio in clinopyroxene [J]. Geology , 18 : 346~349.

Loucks R R. 1996. A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology , 125 : 140~150.

Lu Fengxiang and Zheng Jianping. 1996. Paleozoic lithospheric mantle and deep processes in North China platform [A]. Chi Jishang and Lu Fengxiang. Kimberlite , Paleolithosphere and Diamond Prospecting in the North China Platform [C]. Beijing : Science Press , 215~274 (in Chinese).

Lu Xiaoping , Wu Fuyuan , Lin Jingqian , et al. 2004. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong Peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China Craton [J]. Chinese Journal of Geology , 39 : 123~138 (in Chinese).

Menzies M A , Fan Weiming and Zhang Ming. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of > 120km of Archean lithosphere , Sino-Korean craton , China [J]. Geological Society of London Special Publication , 76 : 71~78.

Morata D , Oliva C , de la Cruz R , et al. 2005. The Bandurrias gabbro :

- Late Oligocene alkaline magmatism in the Patagonian Cordillera [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2): 147~162.
- Ren Jianye, Tamaki K, Li Sitian, *et al.* 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 344 : 175~205.
- Revillon S, Arndt N T, Hallot E, *et al.* 1999. Petrogenesis of picrites from the Caribbean Plateau and the North Atlantic magmatic province [J]. *Lithos*, 49 : 1~21.
- Rollinson H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation* [M]. London: Longman Group UK Ltd., 48~66.
- Wang Wei, Xu Wenliang, Ji Weiqiang, *et al.* 2006. Late Mesozoic and Paleogene basalts and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning Province, China: constraints on nature of lithospheric mantle [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 30~40 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Xu Wenliang, Wang Dongyan, *et al.* 2007. Caiyuanzi Paleogene basalt and deep-derived xenocrysts in eastern Liaoning, China: constraints on nature and deep process of the Cenozoic lithospheric mantle [J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 27(1): 63~70 (in Chinese).
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, *et al.* 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60 (in Chinese).
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 : 103~119.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313~318 (in Chinese).
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui and Liu Xiao. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305~317 (in Chinese).
- Xu Wenliang, Wang Dongyan and Wang Simin. 2000. PTt model of Mesozoic and Cenozoic volcanism and lithospheric evolution [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(4): 329~335 (in Chinese).
- Xu Yigang. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath eastern China: evidence, timing and mechanism [J]. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26(9~10): 747~757.
- Yang Zhongzhu, Meng Qingcheng, Gang Jiang, *et al.* 1996. The metamorphic core-complex structure in South Liaoning [J]. *Liaoning Geology*, 13 : 241~250 (in Chinese).
- Yoder H S and Tilley C E. 1962. Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock system [J]. *Journal of Petrology*, 3 : 346~532.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and rare earth element analyses for Cenozoic intrusion in northeast area, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1 511~1 520 (in Chinese).
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: evidence from major-trace element and Sr-Nd-Pb isotopic studies of Fangcheng basalts [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 144 : 241~253.
- Zhao Chonghe. 1989. The ATK diagram of basic-intermediate volcanic rocks and tectonic environment [J]. *Geological Science and Technology Information*, 8(4): 1~4 (in Chinese).
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136 : 177~202.
- Zhao Hailing, Deng Jinfu, Chen Fajing, *et al.* 1996. Cenozoic volcanism, deep interior processes and continental rift basin formation in the north-eastern China [J]. *Earth Science*, 21(6): 615~619 (in Chinese).
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 6~47 (in Chinese).
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: review and prospect [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50~64 (in Chinese).

附中文参考文献

- 邓晋福, 鄂莫岚, 路凤香. 1987. 中国东北地区上地幔组成、结构及热状态 [J]. *岩石矿物学杂志*, 6(1): 1~10.
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体 [M]. 北京: 科学出版社, 10~133.
- 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等. 2004. 中国东部早白垩世岩浆作用的伸展构造性质——以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例 [J]. *岩石学报*, 20(5): 1 193~1 204.
- 林景任, 谭东娟, 迟效国, 等. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1~128.
- 路凤香, 郑建平. 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程 [A]. 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征 [C]. 北京: 科学出版社, 215~274.
- 路孝平, 吴福元, 林景任, 等. 2004. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架 [J]. *地质科学*, 39 : 123~138.
- 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——对岩石圈地幔性质的制约 [J]. *高校地质学报*, 12(1): 30~40.
- 王 微, 许文良, 王冬艳, 等. 2007. 辽东菜园子古近纪玄武岩和深源捕虏晶: 对新生代岩石圈地幔性质及深部作用过程的制约 [J]. *矿物岩石*, 27(1): 63~70.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题 [J]. *地学前缘*, 10(3): 51~60.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄 [J]. *长春科技大学学报*, 29(4): 313~318.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗岩质岩浆作用的年代学格架 [J]. *高校地质学报*, 11(3): 305~317.
- 许文良, 王冬艳, 王嗣敏. 2000. 中国东部中生代火山作用的 PTt 模型与岩石圈演化 [J]. *长春科技大学学报*, 30(4): 329~335.
- 杨中柱, 孟庆成, 江 江, 等. 1996. 辽南变质核杂岩构造 [J]. *辽宁地质*, 13 : 241~250.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析 [J]. *科学通报*, 48(14): 1 511~1 520.
- 赵崇贺. 1989. 中基性火山岩成分的 ATK 图解与构造环境 [J]. *地质科技情报*, 8(4): 1~5.
- 赵海玲, 邓晋福, 陈发景, 等. 1996. 东北地区新生代火上作用、深部作用与大陆裂谷型盆地 [J]. *地球科学*, 21(6): 615~619.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 6~47.
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题 [J]. *地学前缘*, 13(2): 50~64.