

# 晚古生代古亚洲洋俯冲作用:来自珲春前山镁铁质侵入岩的年代学和地球化学记录\*

李红霞<sup>1,2</sup> 郭锋<sup>1\*\*</sup> 李超文<sup>1</sup> 赵亮<sup>1,2</sup>

LI HongXia<sup>1,2</sup>, GUO Feng<sup>1\*\*</sup>, LI ChaoWen<sup>1</sup> and ZHAO Liang<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2010-02-01 收稿, 2010-03-10 改回.

**Li HX, Guo F, Li CW and Zhao L. 2010. Late Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical records from Qianshan mafic intrusion in Hunchun area, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5):1530–1540**

**Abstract** Mafic magmatism occurring at Qianshan in the Hunchun area of eastern Jilin Province, NE China, comprises a wide spectrum of rock types from olivine gabbro, norite to gabbroic diorite. Zircon U-Pb dating results on a gabbroic diorite indicate an Early Permian emplacement age ( $273 \pm 2\text{Ma}$ ,  $n = 12$ ,  $\text{MSWD} = 1.6$ ). These rocks show typical geochemical characteristics to arc tholeiitic basalt, e. g., enrichments in LILEs (Ba and Sr) and LREEs but depletion in HFSEs (Nb, Ta, Zr and Hf), with La/Nb range of 2.8 ~ 4.8 and Zr/Sm range of 8.0 ~ 22.5. They also have depleted Sr-Nd-Hf isotopic features, spanning an  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$  range of 0.70295 ~ 0.70375, an  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  range of +4.5 ~ +6.4, and an  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  range of +9.6 ~ +14.6, suggesting their derivation from an isotopically depleted mantle reservoir. Combined major, trace element and Sr-Nd-Hf isotope data suggest that the primary magma was derived from a metasomatized mantle wedge, predominantly modified by fluid released from the subducted sediments. This magma then experienced fractional crystallization of olivine and clinopyroxene to form the wide spectrum of rock types. Generation of Qianshan mafic intrusions was genetically associated with subduction of the Paleo-Asian oceanic slab. Our new results indicate that the existence of the Paleo-Asian Ocean lasted even to the end of Paleozoic in the eastern segment of the Central Asian Orogenic belt.

**Key words** Paleo-Asian oceanic subduction; Mafic intrusion; Early Permian; NE China

**摘要** 珲春地区前山镁铁质侵入岩主要由橄榄辉长岩、苏长岩和辉长闪长岩组成, 形成年龄  $273 \pm 2\text{Ma}$ , 为早二叠世侵入岩。该岩体显示出岛弧拉斑玄武岩的元素地球化学特征, 弱富集 LREE 且正 Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.05 \sim 1.44$ ) 异常的 REE 配分模式, 在不相容元素中富集大离子亲石元素 (LILE) 如 Ba 和 Sr, 亏损高场强元素 (HFSE) ( $\text{La}/\text{Nb} = 2.8 \sim 4.8$ ;  $\text{Zr}/\text{Sm} = 8.0 \sim 22.5$ ), 与起源于流体交代地幔楔部分熔融的岛弧低钾拉斑玄武岩类似。在同位素特征上低放射成因 Sr, 高放射成因 Nd 和 Hf ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i) = 0.70295 \sim 0.70375$ ;  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +4.5 \sim +6.4$ ;  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +9.6 \sim +14.6$ ), 反映其来源于同位素组成亏损的交代地幔。结合区域地质背景, 我们认为前山镁铁质岩形成于晚古生代期间古亚洲洋向华北板块的俯冲作用背景, 其亏损 Nb-Ta、Zr-Hf 及 Hf-Nd 同位素解耦特点说明该岩体最有可能来源于俯冲流体交代的地幔楔。

**关键词** 古亚洲洋俯冲作用; 镁铁质侵入岩; 早二叠世; 中国东北地区

中图法分类号 P588.124; P597.3

\* 本文受国家自然科学基金项目 (40674033) 和国家 973 项目 (2006CB403504) 联合资助。

第一作者简介: 李红霞, 女, 1984 年出生, 硕博连读研究生, 岩石地球化学专业

\*\* 通讯作者: 郭锋, 男, 1971 年生, 博士, 研究员, 构造地质学专业, E-mail: guofeng@263.net

## 1 引言

汇聚板缘镁铁质岩浆是俯冲板片物质迁移改造上覆地幔楔的熔融产物 (Elliott *et al.*, 1997)。俯冲带镁铁质岩浆成因、源区性质以及不同俯冲端元组分对岩浆源区的贡献是当前研究大陆造山带岩石圈形成和演化的重要内容之一 (Grove and Kinzler, 1986; Davies and Stevenson, 1992; Arculus, 1994; Kepezhinskas *et al.*, 1996; Shimoda *et al.*, 1998; Hanyu *et al.*, 2002, 2006; Tatsumi, 2006)。由于岛弧镁铁质岩浆的熔融源区记录了俯冲组分对地幔楔的改造富集作用,其成因同时对于理解板块俯冲过程、地壳物质再循环和地幔不均一性具有良好的示踪意义。

东北地区作为东北亚陆缘增生、陆-弧/陆碰撞形成的中亚造山带的重要组成部分 (Sengör *et al.*, 1993; Sengör and Natal'in, 1996),是了解中亚造山带东段发展、演化及古亚洲洋俯冲过程、最终闭合时间的重要窗口。目前对于古亚洲洋的最终闭合时间和位置仍存在分歧:(1)邵济安 (1991)认为俯冲作用发生在早古生代,石炭纪已经完成;但来自贺根山蛇绿岩的研究则反映在 300Ma 之后仍存在古亚洲洋俯冲作用 (Miao *et al.*, 2008);(2) Zhang XH *et al.* (2008)认为自 280Ma 以来区域进入碰撞后伸展阶段,与 Chen *et al.* (2000)和 Zhu *et al.* (2001)研究结果相似;(3) Xiao *et al.* (2003)和 Li (2006)认为早二叠世古亚洲洋还没有完全闭合,古亚洲洋的存在一直持续到古生代末期。然而前人的研究工作主要集中在大兴安岭地区,对中亚造山带东南端—延边地区的研究则非常少,古亚洲洋的俯冲闭合作用是否存在区域上的差异,在俯冲体制上不同时期是否存在差别,目前仍不清楚。寻找与晚古生代古亚洲洋俯冲作用直接相关的镁铁质岩浆记录对于理解中亚造山带晚古生代演化具有重要意义,也是解决上述认识分歧的一把钥匙。

珲春位于吉林省东部延边朝鲜族自治州,属于中亚造山带的东南端。根据前人的区调结果 (吉林省地质矿产局, 1993),该地区除广泛分布有晚古生代和中生代花岗岩和火山岩外,还零星出露一些“晚古生代”镁铁质基性侵入体 (图 1)。目前对该地区的研究仅限于花岗岩年代学 (Zhang *et al.*, 2004)、中生代火山岩成因 (孟庆丽和周永昶, 1996; Li *et al.*, 2007),以及古新世埃达克质安山岩成因 (Guo *et al.*, 2007, 2009a, b)。而对于这些“晚古生代”镁铁质侵入体的研究则较少,其形成时代缺乏精准的年代学资料,其成因和构造背景还缺乏了解,特别是岩体的形成是否与古亚洲洋俯冲作用有直接成因联系更不清楚。本文选择该区前山镁铁质侵入岩开展了岩石学、年代学和元素-同位素地球化学研究,以理解其熔融源区特征和可能的深部动力学过程,为探讨古亚洲洋俯冲作用和在中亚造山带演化提供年代学和地球化学制约。

## 2 区域地质背景及矿物学、岩石学特征

延吉地区构造位置属于中亚造山带东端,处于兴凯、龙岗和佳木斯地块结合部位,于晚古生代-早中生代发生了华北陆块与兴凯、佳木斯地块等的拼贴和碰撞作用 (Jia *et al.*, 2004),是一个经历了古亚洲洋演化、中生代古太平洋板块俯冲以及新生代陆壳断裂作用的叠加复合构造区 (彭玉鲸和苏养正, 1997)。古亚洲洋东端在二叠纪-早三叠世期间开始关闭 (郑亚东等, 2000; Davis *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004a),形成了大量同碰撞花岗岩 (Wu *et al.*, 2004a, b; Zhang *et al.*, 2004),而基性岩体只有零星出露 (吉林省地质矿产局, 1993)。

本次研究的前山镁铁质岩体出露于吉林省东部珲春县 (图 1)。采样点位于近东西向的珲春-前山复活大断裂和近北东向的五道沟-春化复活大断裂的相交处。岩体西部边缘过渡为闪长岩相,侵入到二叠纪地层中。前人将其划分为华力西晚期第一期侵入岩 (吉林省地质矿产局, 1993)。岩石主要有橄榄辉长岩、苏长岩及辉长闪长岩,手标本呈深灰色,斑状结构。苏长岩中辉石占 20% ~ 30%,长石占 50% ~ 60%,角闪石占 5% ~ 10%,暗色矿物约 5%;辉长闪长岩的辉石占 10% ~ 15%,长石 40% ~ 50%,角闪石 30% ~ 35%;橄榄辉长岩中长石占 45% ~ 55%,辉石约 30%,橄榄石约 5%,不透明金属矿物大于 5%,主要为磁铁矿和钛铁矿。橄榄石为透铁橄榄石,辉石主要有紫苏辉石和普通辉石,斜长石发育聚片双晶,由基性培长石和中长石组成 (图 2)。

## 3 分析技术

锆石从大约 20kg 的新鲜样品 (06HCH-55) 中通过破碎和人工重砂的方法分选出来。分选过程在无污染的流程中进行,经过人工重矿物分离和双目显微镜下挑出约 60 颗锆石。锆石的 U-Pb 年代学分析在中国地质科学院离子探针中心的 SHRIMP II 上完成 (表 1)。具体的分析流程见刘敦一等 (2003)。

样品的主、微量元素含量和 Sr-Nd 同位素比值在中国科学院广州地球化学研究所测试完成。主量元素以 Rigaku ZSX 100e 型 X 射线荧光光谱仪测定,分析误差总体约在 1%;微量元素利用 ELAN 6000 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 完成,分析误差在 5% ~ 10% (表 2)。具体分析流程参见刘颖等 (1996)。Sr-Nd 同位素比值在 MicroMass ISOPROBE 型多接收电感耦合等离子质谱仪 (MC-ICP-MS) 上测定。对 Sr-Nd 同位素分析所需样品采用酸淋滤方法进行预处理,以减少后期蚀变作用对同位素比值,尤其是 Sr 的影响。大约 130mg 全岩粉末样品加入纯化 HF-HClO<sub>4</sub> 酸,在高温下完全溶解。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化是在装有 5 毫升体积 AG 50W-X12 交换树脂 (200 ~ 400 目) 的石英交换

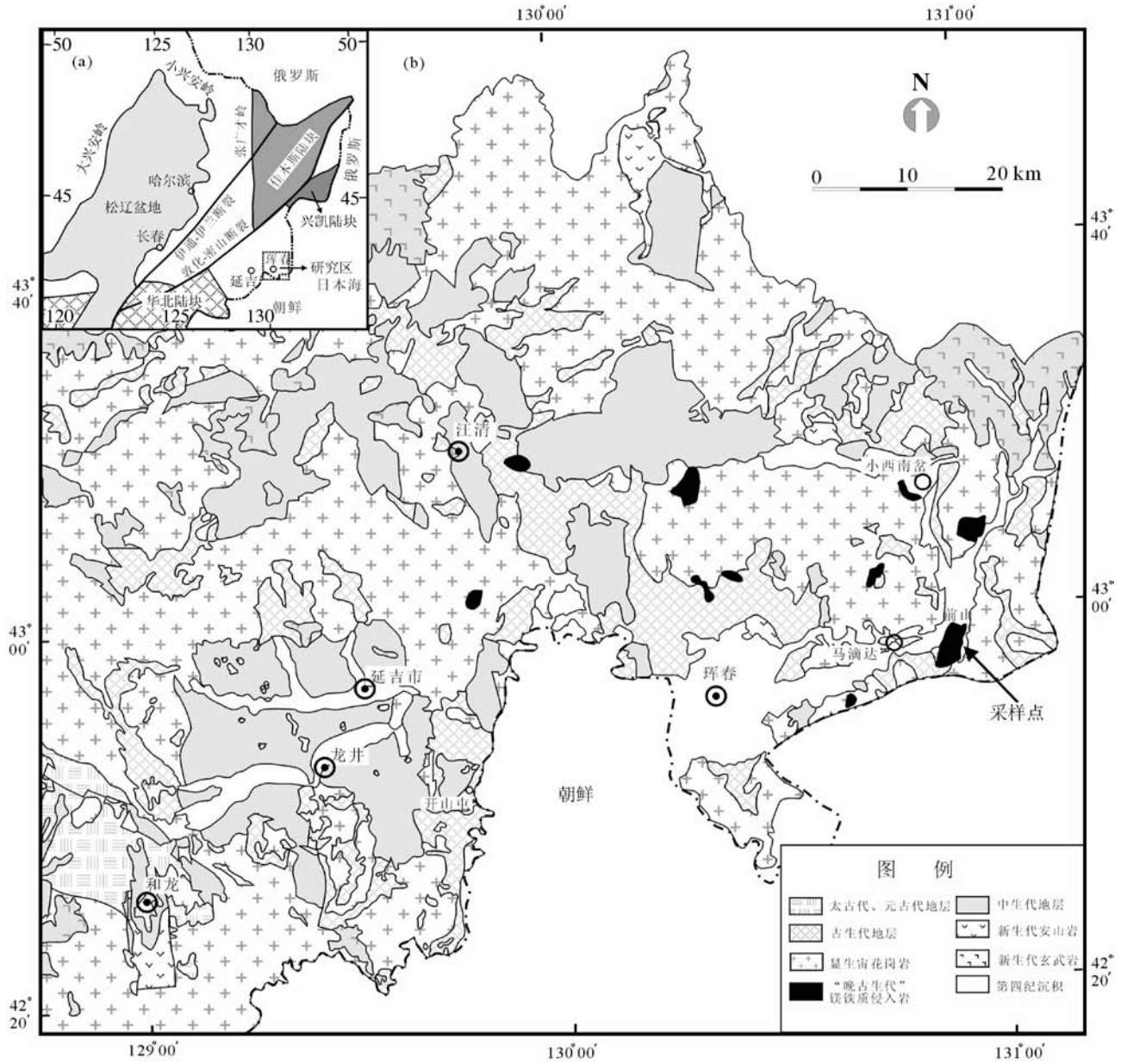


图1 东北地区大地构造分区 (a)和吉林珲春地区地质简图 (b) (据吉林省地质矿产局,1993)

Fig.1 Tectonic division of NE China (a) and a simplified geological map of Hunchun area, eastern Jilin Province, NE China (b) (after BGMJR, 1993)

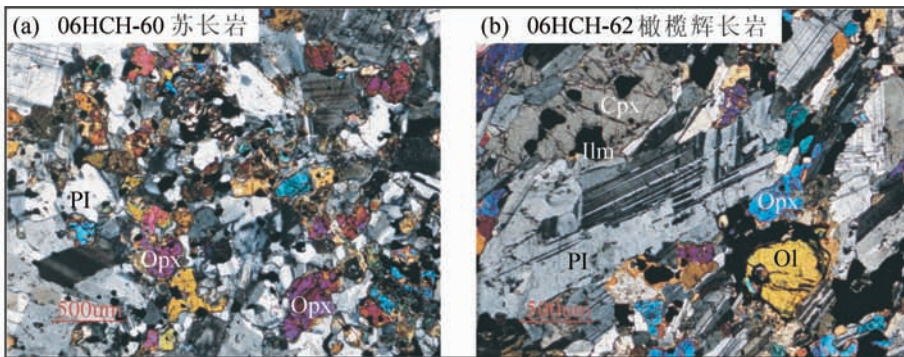


图2 前山镁铁质侵入岩正交偏光下的显微照片

(a)-06HCH-60 苏长岩; (b)-06HCH-62 橄辉长岩; Ol-橄榄石; Opx-紫苏辉石; Cpx-普通辉石; Pl-斜长石; Ilm-钛铁矿

Fig.2 Microphotos of Qianshan mafic intrusion (+)

(a)-norite (06HCH-60); (b)-olivine gabbro (06HCH-62). Ol-olivine; Opx-orthopyroxene; Cpx-clinopyroxene; Pl-plagioclase; Ilm-ilmenite

表1 前山辉长闪长岩 (06HCH-55) 的锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of 05HCH-55 gabbroic diorite of Qianshan mafic intrusion

点号	<sup>206</sup> Pb (%)	U (×10 <sup>-6</sup> )	Th (×10 <sup>-6</sup> )	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U 年龄 ±1σ (Ma)	点号	<sup>206</sup> Pb (%)	U (×10 <sup>-6</sup> )	Th (×10 <sup>-6</sup> )	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ (%)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U 年龄 ±1σ (Ma)
1.1	—	376	317	0.87	0.377	4.8	0.04311	1.4	272 ± 4	9.1	1.96	146	70	0.50	0.343	13	0.04340	1.8	274 ± 5
2.1	0.42	675	534	0.82	0.312	3.4	0.04249	1.2	268 ± 3	10.1	3.69	110	67	0.63	0.300	22	0.04316	2.0	272 ± 6
3.1	0.56	702	387	0.57	0.290	4.4	0.04185	1.2	264 ± 3	11.1	0.32	194	127	0.67	0.367	7.6	0.04321	1.6	273 ± 4
4.1	—	624	472	0.78	0.328	2.4	0.04213	1.2	266 ± 3	12.1	1.24	154	117	0.79	1.276	5.2	0.1325	1.5	802 ± 11
5.1	0.04	646	593	0.95	0.337	2.7	0.04409	1.2	278 ± 3	13.1	0.61	225	119	0.55	0.311	9.2	0.04010	2.1	253 ± 5
6.1	0.22	258	159	0.64	0.339	4.8	0.04368	1.4	276 ± 4	14.1	—	499	373	0.77	0.348	2.6	0.04406	1.2	278 ± 3
7.1	0.02	998	924	0.96	0.317	2.6	0.04392	1.1	277 ± 3	15.1	0.00	456	405	0.92	0.327	2.8	0.04239	1.2	268 ± 3
8.1	1.58	185	70	0.39	0.313	18	0.04401	1.8	277 ± 5	16.1	1.04	384	275	0.74	0.303	9.3	0.04164	1.4	263 ± 3

表2 前山镁铁质侵入岩的主量元素 (wt%) 和微量元素 (×10<sup>-6</sup>) 组成Table 2 Major oxide (wt%) and trace element (×10<sup>-6</sup>) compositions of Qianshan mafic intrusion

样品号	06HCH-52	06HCH-53	06HCH-54	06HCH-55	06HCH-59	06HCH-60	06HCH-62	样品号	06HCH-52	06HCH-53	06HCH-54	06HCH-55	06HCH-59	06HCH-60	06HCH-62
岩石类型	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	苏长岩	橄辉岩	岩石类型	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	辉长闪长岩	苏长岩	橄辉岩
SiO <sub>2</sub>	48.21	52.38	46.64	48.47	50.02	49.47	40.64	Pb	1.9	1.9	1.6	1.3	1.2	1.3	0.9
TiO <sub>2</sub>	1.61	1.41	0.97	1.01	1.30	1.57	2.22	Th	0.4	1.1	2.4	0.5	0.2	0.3	0.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.48	15.07	14.90	14.22	15.97	16.70	14.31	U	0.1	0.2	0.6	0.2	0.0	0.1	0.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.54	12.00	11.56	11.20	11.20	12.55	19.13	La	4.7	6.5	7.3	3.0	3.2	6.2	1.0
MnO	0.21	0.24	0.19	0.18	0.21	0.20	0.19	Ce	12.2	15.0	17.4	7.8	8.4	15.8	2.9
MgO	6.49	5.22	12.67	8.19	6.88	5.36	7.77	Pr	2.0	2.2	2.4	1.3	1.4	2.5	0.6
CaO	10.43	9.43	11.02	13.94	11.12	10.34	13.83	Nd	10.9	10.9	11.7	6.5	7.8	13.3	3.5
Na <sub>2</sub> O	2.83	3.35	1.53	1.51	2.80	3.30	0.97	Sm	3.4	3.0	3.2	1.9	2.5	3.7	1.3
K <sub>2</sub> O	0.26	0.37	0.22	0.29	0.17	0.16	0.11	Eu	1.5	1.5	1.2	0.7	1.3	1.9	0.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.17	0.10	0.03	0.19	0.27	0.02	Gd	4.2	3.6	3.6	2.4	3.0	4.5	1.9
LOI	0.45	0.50	0.18	0.72	0.37	0.15	0.36	Tb	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.8	0.4
Total	99.69	100.1	99.98	99.77	100.2	100.1	99.54	Dy	4.6	4.1	3.8	2.9	3.4	4.8	2.3
Mg <sup>#</sup>	0.49	0.47	0.69	0.59	0.55	0.46	0.45	Ho	1.0	0.9	0.8	0.6	0.7	1.0	0.5
Sc	44	39	37	64	37	39	69	Er	2.6	2.4	2.2	1.7	2.0	2.7	1.3
V	375	279	249	296	276	317	1075	Tm	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2
Cr	92	33	1069	183	151	47	48	Yb	2.3	2.2	2.1	1.6	1.7	2.4	1.1
Co	38.5	26.4	57.8	54.0	35.2	35.8	76.7	Lu	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2
Ni	20.2	6.8	334.1	32.9	28.8	16.3	8.6	Cu	49.6	23.3	8.5	58.2	24.3	43.1	88.6
Rb	3.5	4.2	3.2	5.0	2.8	1.5	3.2	Zn	122	104	134	59.4	85.6	92.6	118
Sr	286	271	176	212	282	310	224	Ga	17.5	16.6	14.4	13.0	15.9	18.3	18.6
Ba	61.9	112	110	47.6	77.0	91.0	21.9	Ge	1.9	2.1	1.8	1.5	1.9	1.9	2.0
Y	23.3	21.0	19.1	16.8	16.8	20.8	10.3	Cs	0.2	0.2	0.2		0.2	0.1	0.2
Zr	37.0	42.6	64.8	43.4	19.8	30.2	11.6	(La/Sm) <sub>N</sub>	0.91	1.37	1.47	1.01	0.83	1.07	0.47
Hf	1.2	1.3	1.9	1.2	0.7	1.1	0.5	(La/Yb) <sub>N</sub>	1.46	2.10	2.54	1.33	1.34	1.81	0.62
Nb	1.5	2.3	1.5	0.9	0.8	2.2	0.3	Eu/Eu*	1.22	1.36	1.10	1.05	1.42	1.41	1.44
Ta	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0								

柱进行的,而Sm和Nd的分离和纯化是石英交换柱用1.7mL Teflon<sup>®</sup>粉末作为交换介质完成的。<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr和<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd比值分别用<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.1194和<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219校正(表3)。详细的试验流程及仪器分析情况见梁细荣等(2003)。

$T_{DM}(Nd)$ 和 $T_{DM}(Hf)$ 的计算参数:DM:<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd=0.2137,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.51315, $\lambda=6.54 \times 10^{-12}/y$ 据Peucat *et al.* (1988);<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf=0.0384,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.28325, $\lambda=1.867 \times 10^{-11}/y$ 据Griffin *et al.* (2000)

Hf同位素化学分离在中国科学院广州地球化学研究所

完成。分析方法简介如下:将500mg样品与1000mg Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>混合均匀后置于铂金坩锅中,用XRF制玻璃片的高频感应炉在1250℃下熔融15min,将熔好的玻璃片压碎成粉末后用2M HCl(单柱Ln-Space提取色谱法将Hf和基体元素及干扰元素分离,详细的分析方法见李献华等(2005)和杨岳衡等(2006)。分离后的Hf同位素测试分析在中国科学院地质与地球物理研究所Neptune MC-ICP-MS上进行。测试中用<sup>179</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.7325和JMC-475标准的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf=0.282160进行质量分馏和外部校正(杨岳衡等,2006)。玄武

表3 前山镁铁质岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成

Table 3 Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Qianshan mafic intrusion

样品号	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	Lu ( $\times 10^{-6}$ )	Hf ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ $\pm 2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ $\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ $\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ (Ma)
06HCH-52	3.48	286	3.36	10.92	0.36	1.23	0.703549 $\pm$ 21	0.703417	0.512898 $\pm$ 7	5.34	406	0.283178 $\pm$ 18	13.0	457
06HCH-53	4.23	271	3.05	10.91	0.36	1.31	0.703646 $\pm$ 15	0.703476	0.512842 $\pm$ 8	4.86	445	0.283070 $\pm$ 6	9.7	693
06HCH-54	3.18	176	3.19	11.65	0.33	1.90	0.703433 $\pm$ 19	0.703237	0.512914 $\pm$ 9	6.38	320	0.283139 $\pm$ 15	14.6	359
06HCH-55	4.97	212	1.93	6.47	0.25	1.18	0.703206 $\pm$ 20	0.702951	0.512911 $\pm$ 9	5.80	368	0.283109 $\pm$ 14	12.7	486
06HCH-59	2.83	282	2.48	7.84	0.27	0.70	0.703854 $\pm$ 23	0.703745	0.512874 $\pm$ 9	4.69	459	0.283209 $\pm$ 5	11.8	540
06HCH-60	1.51	310	3.70	13.25	0.38	1.07	0.703680 $\pm$ 14	0.703627	0.512824 $\pm$ 9	4.50	474	0.283195 $\pm$ 11	12.1	517
06HCH-62	3.21	224	1.33	3.48	0.18	0.50	0.703310 $\pm$ 13	0.703154	0.513002 $\pm$ 8	5.74	372	0.283209 $\pm$ 10	12.7	483

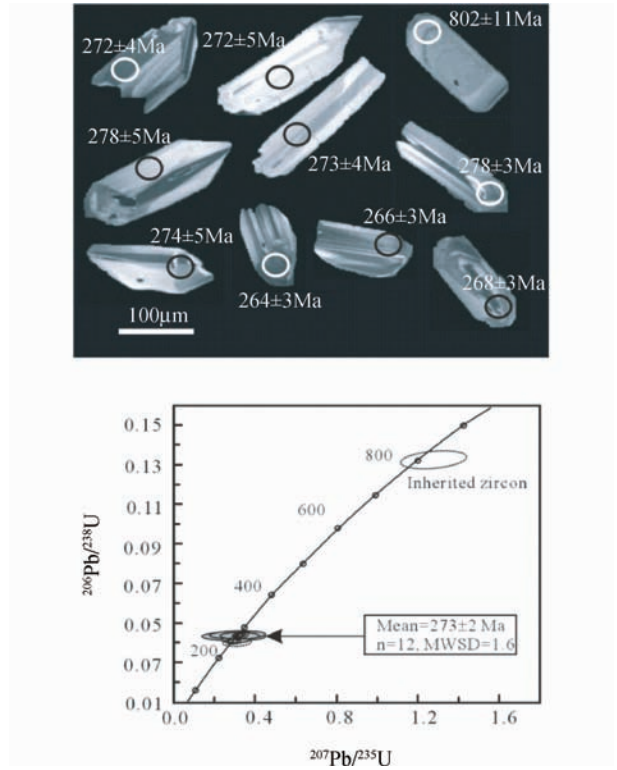


图3 前山辉长闪长岩(06HCH-55)锆石阴极发光图像和 U-Pb 测年结果

Fig. 3 CL images and U-Pb dating result of a gabbroic diorite (06HCH-55)

岩国际标样 BHVO-2 和 JB-3 给出的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为  $0.283087 \pm 10$  和  $0.283222 \pm 10$ , 与文献报道的结果 (Le Frevre and Pin, 2001; Bizzarro *et al.*, 2003) 在误差范围内一致 (表 3)。

## 4 年代学及地球化学特征

### 4.1 锆石 U-Pb 定年结果

所选出的锆石呈长柱状, 岩浆环带清晰, Th/U 比值高 ( $0.39 \sim 0.96$ ), 为岩浆结晶锆石 (图 3)。对其中的 16 颗锆石进行 U-Pb 定年, 其表面  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化在  $263 \pm 3\text{Ma}$  至  $278 \pm 3\text{Ma}$  之间, 其中一颗锆石的 U-Pb 年龄为  $802 \pm 11\text{Ma}$ , 为捕获锆石。12 颗落在谐和线的锆石给出了  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  平均年龄为  $273 \pm 2\text{Ma}$  ( $n=12, \text{MSWD}=1.6$ )。该年龄代表了锆石的结晶时间, 大体反映了前山镁铁质岩浆的侵入时间, 因此该岩体的侵位时代为早二叠世。

### 4.2 主、微量元素特征

前山镁铁质侵入岩的  $\text{SiO}_2 = 40.6\% \sim 52.4\%$ ,  $\text{MgO} = 5.2\% \sim 12.7\%$ , 全铁  $\text{FeO}^T = 11.2\% \sim 19.1\%$ ,  $\text{Mg}^\# = 45 \sim 69$ ,  $\text{Cr} = 47 \times 10^{-6} \sim 1069 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Ni} = 7 \times 10^{-6} \sim 334 \times 10^{-6}$ ;

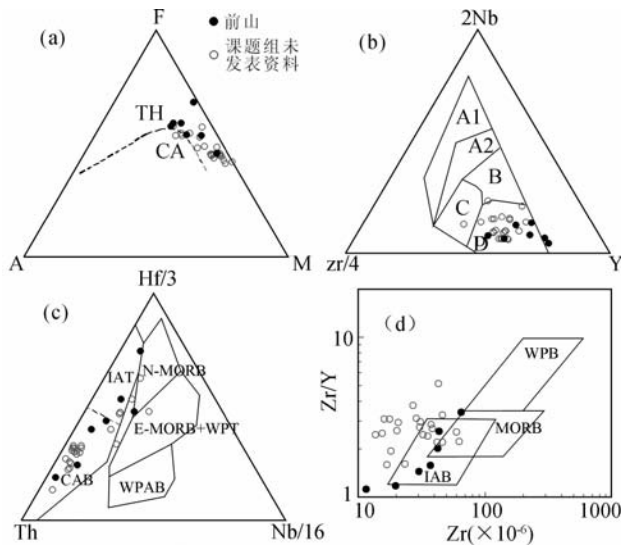


图4 前山镁铁质岩的 AFM (a)、2Nb-Zr/4-Y (b)、Hf/3-Th-Nb/16 (c) 和 Zr 对 Zr/Y (d) 图 (Pearce and Norry, 1979)

A1-板内玄武岩; A2-板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; A1 + A2-板内碱性玄武岩; A2 + C-板内拉斑玄武岩; B-E 型 MORB; D-N 型 MORB; C + D-火山弧玄武岩图解

Fig. 4 AFM (a), 2Nb-Zr/4-Y (b), Hf/3-Th-Nb/16 (c) and Zr versus Zr/Y (d) diagrams of Qianshan mafic intrusion, showing similar features to arc tholeiitic basalt (Pearce and Norry, 1979)

A1-within-plate basalt; A2-within-plate alkali and tholeiitic basalt; A1 + A2-within-plate alkali basalt; A2 + C-within-plate tholeiitic basalt; B-E-type mid-oceanic ridge basalt (MORB); D-N-type MORB; C + D-arc basalt

全碱  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.07\% \sim 3.71\%$ , 且  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ , 低  $\text{K}_2\text{O}$  含量 (0.11% ~ 0.37%), 显示出富钠低钾, 为低钾拉斑系

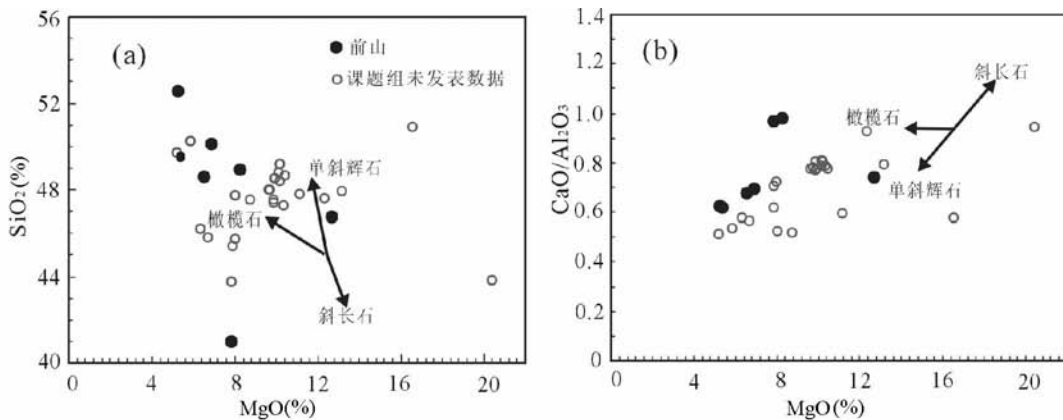


图5 前山镁铁质侵入岩的 MgO 对  $\text{SiO}_2$  (a) 和 MgO 对  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) 图

Fig. 5 MgO vs.  $\text{SiO}_2$  (a) and MgO vs.  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) diagrams of Qianshan mafic intrusion, showing the possible fractional phases during magmatic evolution

列, 在 AFM 图上全部落入拉斑玄武岩范围内, 其总体上低 Nb、Zr、Zr/Y (1.1 ~ 3.4) 比值等特征也显示出岛弧拉斑-钙碱性玄武岩 (Zr/Y = 1.8 ~ 2.7, Sun, 1980) 相似的特征 (图 4)。在 MgO 对  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  图解上 (图 5), 前山镁铁质侵入体在岩浆演化过程中主要受到橄榄石和单斜辉石分离结晶的影响。

前山镁铁质侵入岩总体上低 REE 含量 ( $\sum \text{REE} = 17.89 \times 10^{-6} \sim 60.10 \times 10^{-6}$ )。在球粒陨石标准化 REE 配分模式图上, 除个别样品 (06HCH-62, 为早期堆晶岩, 主要表现出单斜辉石的富集 MREE 的特征, 并有 Eu 正异常), 前山镁铁质侵入岩显示出近平行的、略富集 LREE ( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.62 \sim 2.54$ ;  $(\text{La}/\text{Sm})_N = 0.83 \sim 1.47$ ) 且具 Eu 正异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.05 \sim 1.44$ ) 的特征 (图 6a 和表 2), 暗示有斜长石的堆晶作用。

在不相容微量元素原始地幔标准化的蛛网图上, 除 06HCH-54 外, 其它样品微量元素呈现类似岛弧玄武岩的特征, Nb、Ta 相对 LREE 和 Th-U 亏损, 富集大离子亲石元素 (LILE) 如 Ba 和 Sr, 同时还亏损 Zr 和 Hf (图 6b)。此外, Th、U 含量与 Zr 存在明显的正相关性, 反映岩浆演化过程中有富 Zr、Th、U (如锆石或斜锆石) 的矿物被分离结晶出去。

样品 06HCH-62 的 REE 含量最低并且亏损 LREE, 总体上显示出单斜辉石的 MREE 上抛的 REE 配分模式; 在不相容元素蛛网图上也整体较其它样品低, 且显示出明显的 Eu 和 Sr 正异常, 代表了岩浆早期演化的堆晶体。

#### 4.3 Sr-Nd-Hf 同位素特征

前山镁铁质岩表现出类似 PREMA 的 Sr-Nd 同位素特征 (Zindler and Hart, 1986)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (i) = 0.70295 \sim 0.70375$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}} (t) = +4.5 \sim +6.4$ ,  $\varepsilon_{\text{Hf}} (t) = +11.8 \sim +14.6$  (除一个样品 06HCH-53 为 +9.7), 其 Sr-Nd-Hf 同位素特征反映该岩体可能起源于同位素组成长期亏损的地幔源区。

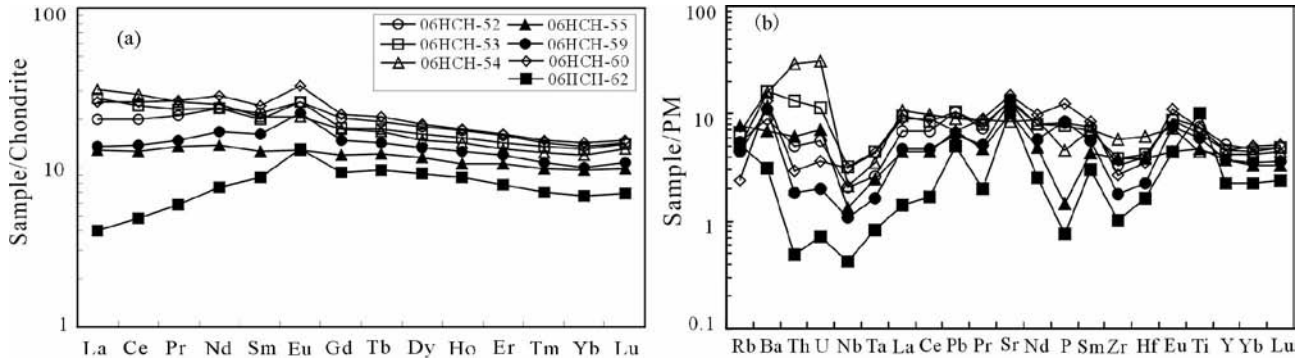


图6 前山镁铁质侵入岩的稀土元素配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

球粒陨石值引自 Taylor and McLennan (1985); 原始地幔值引自 Sun and McDonough (1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle (PM)-normalized spidergrams of Qianshan mafic intrusion. The REE concentrations of chondrite are from Taylor and McLennan (1985) and the trace element concentrations of PM are from Sun and McDonough (1989)

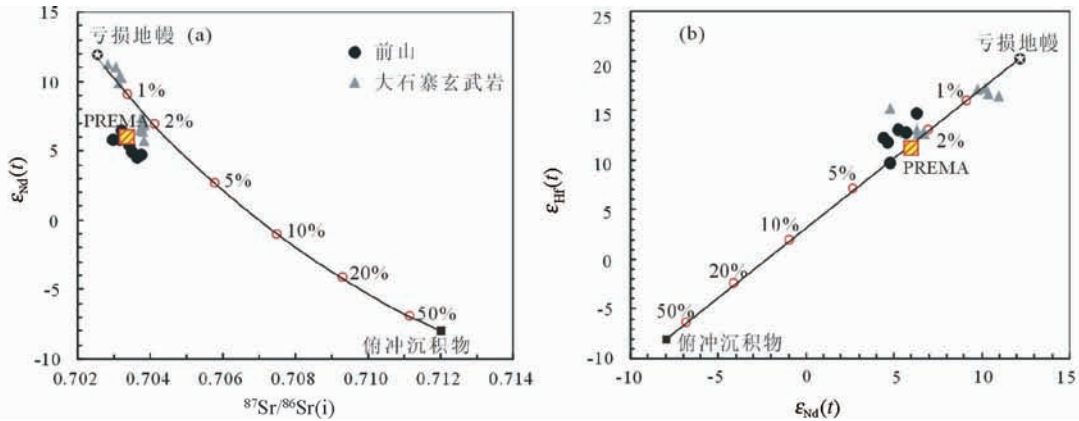


图7 前山镁铁质侵入岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成及熔融源区模拟结果

模拟参数: 亏损地幔:  $Sr = 20 \times 10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7025$ ;  $Nd = 1.2 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = +12$ ;  $Hf = 0.25 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Hf}(t) = +20$ . 俯冲沉积物:  $Sr = 200 \times 10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.712$ ;  $Nd = 20 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -8$ ;  $Hf = 4.06 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Hf}(t) = -8$ . 模拟参数来自 Miao *et al.* (2008); Plank and Langmuir (1998), Workman and Hart (2005). 大石寨组玄武岩数据引自 Guo *et al.* (2009b)

Fig. 7 Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Qianshan mafic intrusion and the modelling results for the melting source

Calculation parameters: depleted mantle:  $Sr = 20 \times 10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7025$ ;  $Nd = 1.2 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = +12$ ;  $Hf = 0.25 \times 10^{-6}$ ;  $\epsilon_{Hf}(t) = +20$ ; subducted sediments:  $Sr = 200 \times 10^{-6}$ ;  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.712$ ;  $Nd = 20 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -8$ ;  $Hf = 4.06 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{Hf}(t) = -8$  (Miao *et al.*, 2008; Plank and Langmuir 1998, Workman and Hart, 2005). The Sr-Nd-Hf isotope data of Dashizhai basalt are from Guo *et al.* (2009b)

在  $^{87}Sr/^{86}Sr(i) - \epsilon_{Nd}(t)$  图上 (图 7a), 前山样品投点位于 PREMA (主流地幔) 附近。在  $\epsilon_{Nd}(t) - \epsilon_{Hf}(t)$  图上 (图 7b), 样品表现出明显的正相关关系,  $\Delta\epsilon_{Hf} = 0.14 \sim 3.06$  (表 3), 说明前山镁铁质侵入岩相对 Nd 更富集放射成因 Hf, 存在一定程度的 Hf-Nd 同位素解耦现象。

## 5 讨论

珲春前山镁铁质侵入岩为拉斑玄武岩系列, 在微量元素特征表现出相对富集 LILE (Ba, Sr, K), 亏损 HFSE (Th, Nb, P, Zr), 具有典型岛弧岩浆的特点。其高放射成因 Nd 和 Hf

以及低放射成因 Sr 组成特征也显示其来源于同位素组成亏损的地幔, 最有可能就是受到同期或近期改造的交代地幔楔。在  $SiO_2$  对 Sr (图 8a) 和  $SiO_2$  对 Zr/Y (图 8b) 与日本岛弧火山岩相似 (Hunter and Blake, 1995), 而明显较大兴安岭和美国西部盆岭省的造山后岩浆低 Sr 和 Zr/Y (Fan *et al.*, 2003; Zhang LC *et al.*, 2008; Hawkesworth *et al.*, 1995), 也暗示该岩体形成于俯冲环境。由于前山岩体来自亏损地幔, 源区本身低 Sr 和 Zr/Y, 且岩体 LREE/HREE 分馏低, 无石榴子石残留, 因此 Zr/Y 低; 而大兴安岭中生代造山后火山岩源区为受到改造的富集岩石圈地幔相对高 Sr, 熔融深度大, LREE/HREE 分馏高, 有石榴子石残留, 导致岩体 Zr/Y 比值

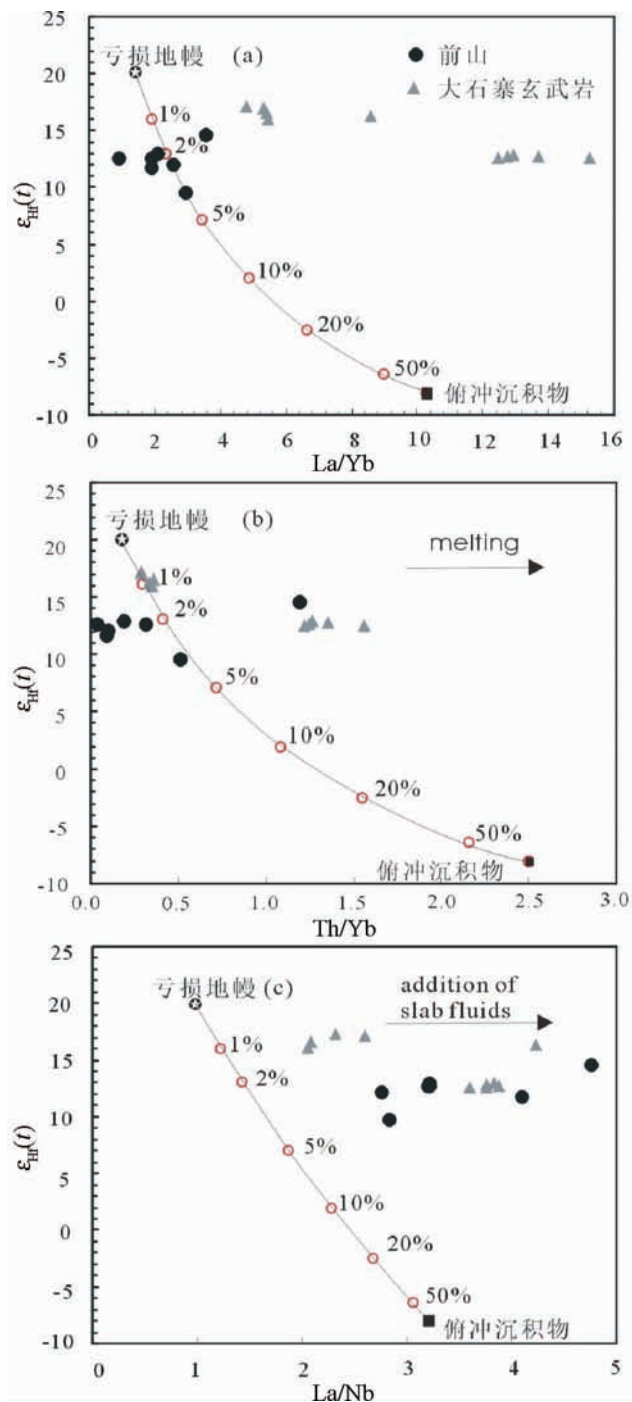


图 8  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  对 La/Yb (a)、Th/Yb (b) 和 La/Nb (c) 之间的变化关系以及岩浆熔融源区模拟结果

亏损地幔:  $\text{Hf} = 0.25 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +20$ ,  $\text{La} = 0.69 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb} = 0.71 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 0.08 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} = 0.49 \times 10^{-6}$ ; 俯冲沉积物:  $\text{Hf} = 4.06 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -8$ ,  $\text{La} = 28.8 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb} = 8.94 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 7 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} = 2.8 \times 10^{-6}$

Fig. 8  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  versus La/Yb (a), Th/Yb (b) and La/Nb (c) diagrams of Qianshan mafic intrusion and the modelling results for the melting source

Calculation parameters; depleted mantle:  $\text{Hf} = 0.25 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +20$ ,  $\text{La} = 0.69 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb} = 0.7 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 0.08 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} = 0.48 \times 10^{-6}$ ; subducted sediments:  $\text{Hf} = 4.06 \times 10^{-6}$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -8$ ,  $\text{La} = 28.8 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb} = 8.94 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Th} = 7 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Yb} = 2.8 \times 10^{-6}$

高。

除样品 06HCH-54 具有高  $\text{Mg}^\#$  (69) 和 Cr ( $1069 \times 10^{-6}$ )、Ni ( $334 \times 10^{-6}$ ) 可能代表初始地幔成分, 其他样品的  $\text{Mg}^\# < 60$  以及低 Cr ( $33 \times 10^{-6} \sim 183 \times 10^{-6}$ )、Ni ( $7 \times 10^{-6} \sim 33 \times 10^{-6}$ ) 含量, 则反映岩浆在上升过程中经历了分异作用 (Hart and Davis 1978; Baker *et al.*, 1997)。在下文中我们将主要讨论该岩体的岩浆过程、源区特征和构造背景。

### 5.1 岩浆过程

由于中上地壳物质具有高的 U、Th 含量 (Taylor and McLennan, 1985), 因此如果有地壳物质混染作用, 势必会引起岩浆中 U-Th 含量的迅速升高; 然而前山镁铁质岩表现出 U-Th 相对 LREE 亏损, 说明中上地壳物质混染的可能性可以忽略。而且该岩体的 Nd 同位素组成变化小,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化在 2 个单元之内, 反映了该岩体经历沉积物混染或地壳混染作用可以忽略。前山岩体主要镁铁矿物的  $\text{Mg}^\#$  从橄榄石 (64 ~ 65) (斜方辉石 (68 ~ 72) (单斜辉石 (73 ~ 80) 依次增高, 且成分较均一, 无明显环带, 反映岩浆演化过程符合鲍文分离结晶序列, 岩浆处于相对封闭状态, 受地壳混染、岩浆混合作用的可能性较小。从前面描述可知, 前山镁铁质岩在岩浆演化过程中经历了橄榄石、单斜辉石的分离结晶作用, 从而使  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$  的含量随  $\text{SiO}_2$  增加而减小, 这可以较好地解释它们近平行的微量元素配分模式 (图 6)。因此, 该岩体目前所显示出的微量元素和 Sr-Nd-Hf 同位素特征主要继承了熔融源区特点。

### 5.2 岩浆源区特征

前山侵入体的低放射成因 Sr, 高放射成因 Nd 和 Hf 同位素组成总体上与大石寨二组玄武岩相似 (Guo *et al.*, 2009a), 反映该岩体来源于同位素组成亏损的地幔 (图 7)。根据区域亏损地幔 (以贺根山蛇绿岩为代表) 和现代俯冲沉积物的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 我们模拟了前山岩体的熔融源区特征, 结果显示, 前山岩体的地幔源区需要约 2% 的俯冲沉积物贡献 (图 7)。

前山岩体在微量元素特征上富集 LILE、LREE 而亏损 HFSE, 指示其熔融地幔源区经历了俯冲组分的改造作用。通常认为这种导致 HFSE 亏损主要来自俯冲洋壳和上覆沉积物的改造, 如通过俯冲板片脱水 and/或熔融形成流体或熔体来交代上覆的地幔楔。依据  $\epsilon_{\text{Hf}}$  与 Th/Yb、La/Yb 及 La/Nb 之间的协变关系 (图 8), 简单的二端元 (亏损地幔楔 + 俯冲沉积物) 混合不能很好地解释前山岩体的高 La/Nb、低 Th/Yb (除 05HCH-54 具高 Th/Yb 外, 其它样品的 Th/Yb = 0.09 ~ 0.51) 和 La/Yb (0.9 ~ 3.5) 比值。而这些岩石显示出的相对 Sm 亏损 Zr-Hf 的特点 (图 6b) 反映了流体交代的特点 (Woodhead *et al.*, 2001; Hanyu *et al.*, 2006)。由于沉积物流体携带 Nd 的能力强于 Hf, 因此被沉积物流体改造的地幔楔将包含更多的低放射成因 Nd 而较少的低放射成因 Hf 组



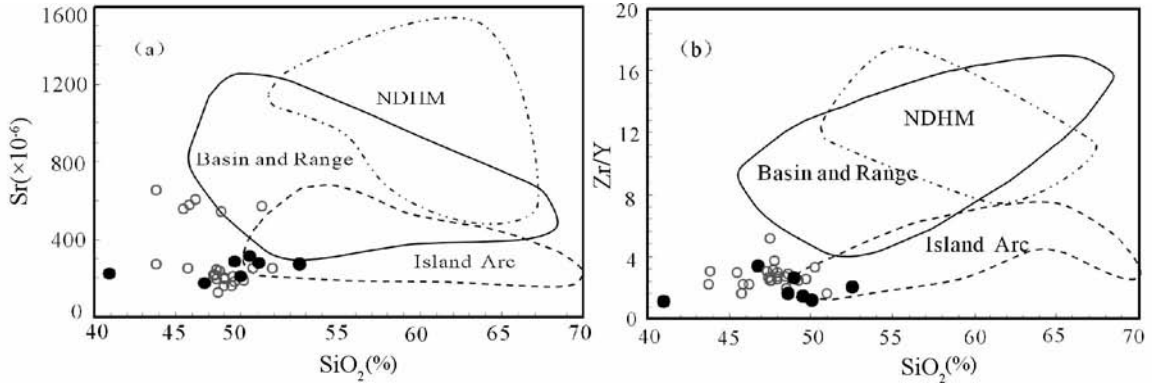


图9 前山镁铁质侵入岩的  $\text{SiO}_2$  对 Sr 图解 (a) 和  $\text{SiO}_2$  对 Zr/Y 图解 (b)

数据来源: Basin and Range (Hawkesworth *et al.*, 1995); Island Arc 为日本岛弧火山岩 (Hunter and Blake, 1995); NDHM-北兴安岭 (Fan *et al.*, 2003). 其它图例如图 5

Fig. 9  $\text{SiO}_2$  versus Sr (a) and Zr/Y (b) diagrams of Qianshan mafic intrusion

Data sources: Basin and Range (Hawkesworth *et al.*, 1995); Island Arc (Hunter and Blake, 1995); NDHM (Fan *et al.*, 2003). The other symbols are the same as in Fig. 5

分,从而引起 Hf-Nd 同位素解耦现象,即相对 Nd 具有更高的放射成因 Hf (Pearce *et al.*, 1999; Woodhead *et al.*, 2001; Hanyu *et al.*, 2006)。这种 Hf-Nd 同位素解耦现象在洋内岛弧玄武岩中非常普遍 (Carpentier *et al.*, 2009)。因此沉积物流体交代也能很好地解释前山岩体的正  $\Delta\epsilon_{\text{Hf}}$  值 (0.14 ~ 3.06)。

### 5.3 对晚古生代古亚洲洋俯冲作用的制约

大陆造山带与俯冲带的镁铁质岩浆通常都具有类似岛弧火山岩的微量元素地球化学特征,如高的 LILE / HFSE、LREE/HFSE 比值,但二者之间的熔融机制是有差别的。大陆造山带火成岩通常为钙碱性-高钾钙碱性系列,而低钾拉斑系列则很少 (Hawkesworth *et al.*, 1995; Fan *et al.*, 2003)。在同位素组成上大陆造山带镁铁质岩石由于造山带垮塌或地壳物质再循环作用往往较同一地区的俯冲带镁铁质岩浆具有更演化的 Sr-Nd-Hf 同位素组成。

在前面的论述可知,前山岩体为岛弧拉斑玄武岩系列,其类似 MORB 的低放射成因 Sr,高放射成因 Nd-Hf,其熔融源区最有可能为受到俯冲改造的地幔楔。另外,其低 Sr 和 Zr/Y 的特征也显然区别于东北地区造山后镁铁质岩石 (图 9, Fan *et al.*, 2003)。为此我们认为前山镁铁质侵入岩形成于俯冲动力学背景,而不是造山后阶段的产物。

此外,前人对延吉地区蛇绿岩、二叠纪大陆边缘沉积序列、火山岩地球化学特征以及索伦山-吉林省中部不同时代古生物区域研究,认为在早二叠世期间,延吉地区仍然存在一个古洋盆,该洋盆直到二叠世末才可能完全闭合 (Li, 2006),也说明当时区域上存在古亚洲洋俯冲作用。

## 6 主要认识

通过对前山镁铁质侵入体的岩石学、年代学、元素-同位

素地球化学研究,本文获得了如下几点认识:

(1) 前山辉长闪长岩中锆石结晶年龄为  $273 \pm 2\text{Ma}$ ,其侵位时代为早二叠世;

(2) 前山镁铁质侵入体属岛弧拉斑玄武岩系列,富集 LILE、LREE 而亏损 HFSE,在 Sr-Nd- Hf 同位素组成上低放射成因 Sr,高放射成因 Nd 和 Hf,且相对 Nd 更高放射成因 Hf,其熔融源区为俯冲沉积物析出流体交代的地幔楔;

(3) 前山侵入体形成于古亚洲洋板片向华北陆块俯冲的动力学背景,与来自古地理、沉积和蛇绿岩的研究结果认为区域二叠纪仍存在古亚洲洋盆的结论相吻合。因此,在中亚造山带东段,古亚洲洋的俯冲作用至少持续到二叠纪。

## References

- Arculus RJ. 1994. Aspects of magma genesis in arcs. *Lithos*, 33: 189 - 208
- Baker JA, Menzies MA, Thirlwall MF and Macpherson GC. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a, Yemen: Implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *J. Petrol.*, 38: 1359 - 90
- Bizzarro M, Baker J and Ulfbeck D. 2003. A new digestion and chemical separation technique for rapid and highly reproducible determination of Lu/Hf and Hf isotope ratios in geological materials by MC-ICPMS. *Geostandards Newsletter*, 27: 133 - 145
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province (BGMJRJ). 1988. *Regional Geology of Jilin Province*. Beijing: Geological Publishing House, 698 (in Chinese)
- Carpentier M, Chauvel C, Maury RC and Mattielli N. 2009. The "zircon effect" as recorded by the chemical and Hf isotopic compositions of Lesser Antilles forearc sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287: 86 - 99
- Chen B, Jahn B M, Wilde S and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157 - 182
- Davies JH and Stevenson DJ. 1992. Physical model of source region of subduction zone volcanics. *J. Geophys. Res.*, 97: 2037 - 2070

- Davis GA, Zheng YD, Wang C, Darby BJ, Zhang CH and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix MS and Davis GA (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Boulder, Colorado, Geol. Soci. Amer. Memo., 194: 171–197
- Elliott T, Plank T, Zindler A, White WM and Bourdon B. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.*, 102(B7): 14991–15019
- Fan WM, Guo F, Wang YJ and Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of Post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 121: 115–135
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133–147
- Grove TL and Kinzler RJ. 1986. Petrogenesis of andesites. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 14: 417–454
- Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayashi K and Li CW. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing from the Yanji area, NE China. *J. Petrol.*, 484: 661–692
- Guo F, Nakamura E, Fan FW, Kobayashi K, Li CW and Gao XF. 2009a. Mineralogical and geochemical constraints on magmatic evolution of Paleocene adakitic andesites from the Yanji area, NE China. *Lithos*, 112: 321–341
- Guo F, Fan WM, Li CW, Miao LC and Zhao L. 2009b. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia. *Sci. China (Series D)*, 52(7): 940–951
- Hanyu T, Tatsumi Y and Nakai A. 2002. A contribution of slab melts to the formation of high-Mg andesite magmas; Hf isotopic evidence from SW Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 81–84
- Hanyu T, Tatsumi Y, Nakai S *et al.* 2006. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: Constraints from geochemistry. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(7): 1–29
- Hart SR and Davis KE. 1978. Nucle partitioning between olivine and silicate melt. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 40: 203–219
- Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T and Rogers N. 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range, *J. Geophys. Res.*, 100(B6): 10271–10286
- Hunter AG and Blake S. 1995. Petrogenetic evolution of a transitional tholeiitic-calc-alkaline series; Towada volcano, Japan. *J. Petrol.*, 36: 1579–1605
- Jia DC, Hu RZ, Lu Y and Qiu XL. 2004. Collision belt between the Khanka block and the North China block in the Yanbian Region, Northeast China. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 211–219
- Kepezhnikas PK, Defant MJ and Drummond MS. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1217–1229
- Le Fevre B and Pin C. 2001. An extraction chromatography method for Hf separation prior to isotopic analysis using multiple collection ICP-mass spectrometry. *Analy. Chem.*, 73: 2453–2460
- Li CW, Guo F, Fan WM and Gao XF. 2007. Ar-Ar geochronology of Late Mesozoic volcanic rocks from the Yanji area, NE China and tectonic implications. *Sci. China (Series D)*, 50(4): 505–518
- Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *J. Asian Earth Sci.*, 26: 207–224
- Li XH, Qi CS, Liu Y, Liang XR, Tu XL, Xie LW and Yang YH. 2005. Rapid separation of Hf from rock samples for isotope analysis by MC-ICPMS: A modified single-column extraction chromatography method. *Geochimica*, 34(2): 109–114 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Li XH, Liu Y and Wei GJ. 2003. Precise measurement of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and Sm/Nd ratios using multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 92–96 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Jian P, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia; Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geol. Sin.*, 77: 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace element elements using ICP-MS. *Geochimica*, 25: 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Meng QL and Zhou YX. 1996. The formation and evolution of magma for J2-K1 volcanic-intrusive complex in eastern Yanbian, Jilin Province. *Acta Petrol. Mineral.*, 15: 30–39 (in Chinese)
- Miao LC, Fan WM, Liu DY, Zhang FQ, Shi YR and Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex; Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxing' anling Orogenic Belt, China. *J. Asian Earth Sci.*, 32: 348–370
- Pearce JA and Norry MJ. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33–47
- Pearce JA, Kempton PD, Nowell GM and Noble SR. 1999. Hf-Nd Element and Isotope Perspective on the Nature and Provenance of Mantle and Subduction Components in Western Pacific Arc-Basin Systems. *Journal of Petrology*, 40(11): 1579–1611
- Peng YJ and Su YZ. 1997. Geotectonic characteristics of central Jilin Province. *Memoirs of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 5–6: 335–376 (in Chinese)
- Peucat JJ, Vidal P, Bernard-Griffiths J and Condie KC. 1988. Sr, Nd and Pb isotopic systematics in the Archaean low-to high-grade transition zone of southern India: Syn-accretion vs. post-accretion granulites. *J. Geol.*, 97: 537–550.
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediments and its consequence for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, 145: 325–394
- Sengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Sengör AMC and Natal' in BA. 1996. Paleotectonics in Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486–640
- Shao JA. 1991. *Crustal Evolution of the Middle Segment of the Sino-Korean Plate*. Beijing: Peking University Press, 1–136 (in Chinese)
- Shimoda G, Tatsumi Y, Nohda S, Ishizaka K and Jahn BM. 1998. Setouchi high-Mg andesites revisited; Geochemical evidence for melting of subducting sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160: 479–492.
- Sun SS. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil Trans R. Soc. Lond. A297*, 409–45
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunderson AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Pub., 42: 313–345
- Tatsumi Y. 2006. High-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, southwestern Japan; Analogy to Archean magmatism and continental crust formation? *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34: 467–499
- Taylor SR and McLennan SW. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford Press, 1–312
- Woodhead JD, Hergt JM, Davidson JP and Eggins SM. 2001. Hafnium isotope evidence for “conservative” element mobility during subduction zone processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192: 331–346
- Workman RK and Hart SR. 2005. Major and trace element composition of

- the depleted MORB mantle DMM. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 231: 53–72
- Wu FY, Wilde SA, Zhang GL and Sun DY. 2004a. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 781–797
- Wu FY, Sun DY, Jahn BM and Wilde SA. 2004b. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 731–744
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22: 1069, doi: 10.1029/2002TC001484
- Yang YH, Zhang HF, Xie LW, Liu Y, Qi CS and Tu XL. 2006. Petrogenesis of typical Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from the North China Craton: New evidence from Hf isotopic studies. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1665–1671 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Zhou XH, Ying JF, Wang F, Guo F, Wan B and Chen ZG. 2008. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics. *Chem. Geol.*, 256: 12–23
- Zhang XH, Zhang HF, Tang YJ, Simon WA and Hu ZC. 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chem. Geol.*, 249: 262–281
- Zhang YB, Wu FY, Wilde SA, Zhai MG, Lu XP and Sun DY. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China. *Island Arc*, 13: 484–505
- Zheng YD, Davis GA, Wang Z, Darby BJ and Zhang CH. 2000. Major Mesozoic tectonic Events in the Yanshan belt and the plate tectonic setting. *Acta Geol. Sin.*, 74: 289–302 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Sun SH, Gu LB, Ogasawara Y, Jiang N and Honma H. 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: Geochemistry, magma sources and petrogenesis. *Geol. Mag.*, 138: 101–115
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493–571

### 附中文参考文献

- 吉林省地质矿产局. 1993. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–698
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 梁细荣, 涂湘林, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 岩石样品快速分离与 MC-ICP-MS 同位素分析: 一个改进的单柱提取色谱方法. *地球化学*, 34(2): 109–114
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  和  $\text{Sm}/\text{Nd}$  比值. *地球化学*, 32(1): 92–96
- 刘敦一, 简平, 张旗等. 2003. 内蒙古土岭开蛇绿岩中埃达克岩的 SHRIMP 年龄: 早古生代俯冲证据. *地质学报*, 77: 317–327
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25: 552–558
- 孟庆丽, 周永旭. 1996. 吉林延边东部  $\text{J}_2\text{-K}_1$  火山-侵入杂岩岩浆的生成和演化. *岩石矿物学杂志*, 151: 30–39
- 彭玉鲸, 苏养正. 1997. 吉林中部地区区域地质特征. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所集刊*, 5–6: 358–369
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 1–136
- 杨岳衡, 张宏福, 谢烈文, 刘颖, 祁昌实, 涂湘林. 2006. 华北克拉通中-新生代典型火山岩的岩石成因: Hf 同位素新证据. *岩石学报*, 22(6): 1665–1671
- 郑亚东, Davis GA, 王琮, Darby BJ, 张长厚. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. *地质学报*, 74(4): 289–302