

吉林晚古生代榆木川基性岩的地球化学特征 及其岩石成因

冯光英^{1,2}, 刘 燊^{1*}, 钟 宏¹, 贾大成³,
齐有强¹, 王 涛^{1,2}, 杨毓红^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 位于兴蒙造山带张广才岭块体的榆木川辉绿玢岩, K-Ar 年龄测定表明其形成年龄为 262~264 Ma, 微量元素研究表明, 辉绿玢岩 SiO₂ 含量为 47.02%~52.60%, 贫 K₂O (0.13%~0.47%), Na₂O > K₂O, 属于低钾拉斑系列; 稀土分布模式属于轻稀土略亏损的平坦型, 微量元素原始地幔标准化图解中大离子亲石元素 (Rb, Ba, Sr) 较为富集, 但不存在高场强元素 (Nb, Ta) 的亏损, 同位素组成显示 Sr 同位素初始比值在 0.704958~0.705631 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (7.2~8.1) 较高且变化较小, 表明其来源于亏损地幔的部分熔融且成岩过程中未受到地壳物质的混染。基性岩形成于造山后的伸展拉伸背景, 并结合前人的研究成果, 认为晚古生代 (约 270 Ma) 兴蒙造山带已经进入晚期, 此时加厚的岩石圈由于重力不稳定发生拆沉减薄作用, 导致软流圈的大量上涌和岩石圈拉伸, 从而引起先存亏损岩石圈地幔的部分熔融, 最后侵入地壳深部形成研究区辉绿玢岩。

关键词: 晚古生代; 辉绿玢岩; 岩石成因; 源区性质; 吉林省

中图分类号: P595; P581 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2010)05-0427-12

Geochemical characteristics and petrogenesis of late Paleozoic mafic rocks from Yumuchuan, Jilin Province

FENG Guang-ying^{1,2}, LIU Shen^{1*}, ZHONG Hong¹, JIA Da-cheng³, QI You-qiang¹,
WANG Tao^{1,2} and YANG Yu-hong^{1,2}

1. Institute of Geochemistry/ State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Geos exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: Yumuchuan siltites located in the Zhangguangcailing Block of the Xingmeng orogenic Belt, K-Ar dating yields the ages ranging from 262 to 264 Ma, geochemical data show that the SiO₂ contents of the siltites vary from 47.02% to 52.60%, these rocks belong to low potassium tholeiite series, and are characterized by low K₂O (0.13%~0.47%) and Na₂O > K₂O. Chondrite-normalized patterns for the siltites exhibit flat but moderate depletion in LREE ((La/Yb)_N = 0.65~0.87), and the primitive mantle-normalized spidergrams show relatively enrichment in Rb and Ba, but without depletion in the HSF, such as Nb and Ta. Strontium and Nd isotopic compositions of the representative siltites are characterized by low initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios (0.704958~0.705631), high and constant $\epsilon_{Nd}(t)$ values (7.2~8.1), suggesting that they were derived from a depleted mantle source without significant crustal contamination. It is generally accepted that mafic intrusions are formed in a post-orogenic extensional tectonic setting, based on the available studies. We thus propose a petrogenetic model for the studied siltites, i.e., in the late period of the Xingmeng orogenic belt, lithospheric delamination occurred due to the gravitational instability of the

收稿日期(Received): 2009-08-25; 改回日期(Revised): 2009-11-06; 接受日期(Accepted): 2009-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(40673029, 40773020, 40634020); 西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金(08LCD08)

作者简介: 冯光英(1983-), 女, 博士研究生, E-mail: fengguangying198@163.com

*通讯作者(Corresponding author): LIU Shen, E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891962

FENG Guang-ying et al.: Geochemical characteristics and petrogenesis of siltites from Yumuchuan, Jilin Province

thickened lithosphere, and then resulted in the upwelling of hot asthenosphere, lithospheric extension, as well partial melting of pre-existing depleted lithospheric mantle, meanwhile, extensive fractional crystallization of minerals, such as olivine and clinopyroxene during primary magma ascent, finally, intruded and formed Yumuchuan sillites.

Key words: Late Paleozoic; sillites; petrogenesis; source features; Jilin Province

0 引言

幔源基性岩是深部热-动力作用在地表的重要表现形式^[1],作为区域性地壳拉伸运动的产物,对研究深部地幔性质和大陆动力学演化具有重要的意义^[2-3]。因此,基性岩成为国内外地质学界研究的热点^[1,4]。东北地区构造情况复杂,是一个由多块体拼合而成的叠加块体^[5],虽然大多数学者都公认华北板块和西伯利亚板块至少在二叠纪时期已经碰撞拼合到一起^[6],但是对其构造演化的历史,特别是兴蒙造山带碰撞发生的地点以及由碰撞挤压状态转换为伸展拉伸状态的时间仍然存在很大的争议。前人的研究认为晚古生代时期的海西构造旋回是东北地区区域构造发展与演化史上的重要阶段^[7]。所以对该地区晚古生代基性岩的研究将具有重要的意义。东北地区基性岩发育广泛,其中不乏晚古生代基性岩,为上述问题的研究提供了很好的对象。然而,目前东北地区基性岩的研究还相对薄弱,仅有的几个岩体或岩墙(脉)的年代学数据主要集中在中新生代,如红旗岭镁铁超镁铁质岩(216 Ma)^[6]、辽东半岛南部辉绿岩(211 Ma)^[8]、辽东半岛斑岩岩脉(155 Ma)^[9]、吉林通化赤柏松辉长岩(134 Ma)^[10]、辽北辉绿岩墙(36.4 Ma)^[11]。与此相比,对晚古生代基性岩的研究尤为缺乏,已知的仅有延边地区五道沟群辉长岩(270 Ma)^[12]以及佳木斯地块东缘玄武岩-玄武安山岩(293 Ma)^[13]。鉴于研究的不足,本文选择松辽-张广才岭块体中晚古生代榆木川基性岩为研究对象,通过年代学和元素及同位素地球化学研究,对其成因加以探讨,从而为进一步探讨东北地区的构造格局与演化提供依据。

1 地质背景和岩相学特征

兴蒙造山带位于西伯利亚和东北克拉通所夹持的中亚造山带东部,是一个在古生代-中生代期间由多块体拼合而形成的构造堆叠区。根据目前的研究,

该区自北而南可进一步划分为北部的额尔古纳地块、兴安增生杂岩区,中部的松辽-张广才岭构造区和东南部的佳木斯地块。其中额尔古纳地块在早古生代可能已经转为稳定,兴安增生杂岩于早古生代沿塔源-喜桂图与额尔古纳地块拼合,而松辽增生杂岩在古生代晚期沿贺根山-嫩江断裂与上述联合块体拼贴。此后,上述复合块体在古生代末期与华北克拉通聚合。中生代初期,佳木斯地块沿牡丹江断裂与兴蒙造山带联合^[5,7]。本文所研究的榆木川基性岩体位于兴蒙造山带内的松辽-张广才岭构造区(图1)。

本区出露的地层主要有:二叠系下统范家屯组的凝灰质砂岩、黑色页岩、砾岩、含砂砾岩、砂岩以及一拉溪组的凝灰质砂板岩和中性熔岩;侏罗纪苏密沟组的安山岩夹紫色和黑色凝灰质粉砂岩,以及凝灰质砾岩和角砾岩、英安岩和流纹岩等。本区岩浆活动比较活跃,主要的岩浆岩有海西晚期的辉长岩和橄辉岩,以及燕山早期的花岗岩、白岗质花岗岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩和角闪黑云母花岗岩。榆木川基性岩侵位于二叠系下统的砂页岩中。

榆木川基性岩的主要岩性为辉绿玢岩。具典型的斑状结构,基质为隐晶质-微晶结构,块状构造,主要矿物组成为单斜辉石(40%~45%)和基性斜长石(50%~55%)。斑晶由他形或半自形的单斜辉石(1.5~2.0 mm, 13%~15%)、斜长石(1.0~2.0 mm, 20%~25%)和少量的斜方辉石(1.0~2.0 mm, 2%~3%)组成。基质由单斜辉石(0.06~0.1 mm, 25%~35%)、斜方辉石(0.05~0.1 mm, 3%~5%)、斜长石(0.03~0.06 mm, 30%~35%)、少量黑云母(0.04~0.06 mm, 2%~4%)和Fe-Ti氧化物(磁铁矿或铁铁矿)(0.04~0.06 mm, 3%~5%)组成。镜下无堆晶结构现象,样品较新鲜,没有明显的蚀变(烧失量0.5%~2.2%)。通过对2件全岩样品进行K-Ar年龄测定(表1),其成岩年龄集中在262~264 Ma之间,为晚古生代岩浆活动的产物,与同样位于张广才岭构造区的石门子花岗闪长岩(262.8 Ma)和辉长岩(262.1 Ma)的锆石U-Pb年龄一致^[14],可能为同期构造岩浆事件。

表2 楠木川辉绿玢岩主元素组成(%)
Table 2 Major element compositions (%) of sillites from Yunmochuan

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CuO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	烧失量	Total	Na ₂ O+K ₂ O	Mg [#]	A/CNK	A/NK	δ
YMC-01	50.32	13.47	12.71	6.54	9.15	3.38	0.36	0.23	0.11	1.55	1.87	99.68	3.73	50.7	1.0	3.61	1.90
YMC-02	50.67	13.64	12.00	7.79	9.71	2.90	0.37	0.30	0.11	1.61	1.08	100.17	3.27	56.5	1.1	4.18	1.39
YMC-03	52.60	14.69	13.38	5.35	8.13	2.94	0.41	0.37	0.14	1.58	0.64	100.21	3.35	44.4	1.3	4.39	1.17
YMC-04	52.40	14.93	11.90	5.50	9.31	3.66	0.19	0.24	0.16	1.52	0.58	100.39	3.85	48.0	1.1	3.88	1.58
YMC-05	48.14	13.50	12.39	6.03	11.45	5.34	0.40	0.35	0.12	1.52	0.89	100.14	5.74	49.3	0.8	2.35	6.41
YMC-06	51.90	14.09	12.40	5.87	9.30	3.36	0.26	0.23	0.11	1.44	0.71	99.66	3.62	48.6	1.1	3.89	1.47
YMC-07	52.54	14.49	12.63	5.50	8.29	3.23	0.40	0.35	0.12	1.59	0.61	99.76	3.63	46.6	1.2	3.99	1.39
YMC-08	52.07	13.47	12.94	5.89	9.36	3.18	0.32	0.21	0.13	1.51	0.83	99.91	3.50	47.7	1.0	3.85	1.35
YMC-09	51.12	13.79	12.22	6.36	9.36	3.26	0.38	0.26	0.13	1.61	0.83	99.83	3.54	51.0	1.0	3.90	1.54
YMC-10	50.60	14.17	13.47	5.66	9.89	3.05	0.25	0.24	0.21	1.53	0.78	99.85	3.30	45.7	1.1	4.29	1.43
YMC-11	50.74	14.58	11.98	7.18	9.91	2.57	0.16	0.26	0.11	1.58	0.85	99.90	2.73	54.5	1.2	5.34	0.96
YMC-12	49.03	15.74	12.94	5.77	10.14	2.91	0.47	0.27	0.12	1.71	0.70	99.81	3.38	47.2	1.2	4.65	1.90
YMC-13	49.02	14.40	13.38	7.49	11.42	2.19	0.22	0.23	0.11	1.62	0.69	100.78	2.41	52.8	1.0	5.97	0.97
YMC-14	51.91	13.97	11.97	6.66	8.42	4.10	0.22	0.23	0.12	1.61	0.61	99.82	4.32	52.7	1.1	3.23	2.10
YMC-15	51.94	13.89	12.70	6.30	9.21	3.84	0.21	0.24	0.12	1.62	0.26	100.35	4.06	49.8	1.0	3.43	1.84
YMC-16	52.49	13.78	11.70	6.55	8.28	4.20	0.26	0.22	0.11	1.52	0.82	99.92	4.45	52.8	1.1	3.09	2.09
YMC-17	51.78	13.97	11.89	6.56	8.36	4.06	0.28	0.23	0.11	1.57	0.89	99.71	4.34	52.5	1.1	3.22	2.14
YMC-18	51.78	13.63	11.92	6.57	8.43	4.23	0.25	0.23	0.11	1.55	0.79	99.50	4.48	52.4	1.1	3.04	2.29
YMC-19	51.15	14.09	11.75	6.51	9.34	3.84	0.25	0.24	0.11	1.56	1.00	99.84	4.09	52.6	1.0	3.44	2.06
YMC-20	51.11	13.70	12.46	6.93	8.86	3.64	0.18	0.25	0.12	1.64	0.92	99.82	3.82	52.7	1.1	3.58	1.80
YMC-21	51.90	13.91	11.88	6.91	8.09	4.15	0.18	0.24	0.12	1.67	0.75	99.80	4.33	53.8	1.1	3.21	2.10
YMC-22	51.37	13.86	13.18	6.23	8.04	4.01	0.30	0.25	0.12	1.67	0.90	99.91	4.31	48.6	1.1	3.22	2.22
YMC-23	47.02	13.90	13.95	5.89	12.80	2.42	0.29	0.24	0.14	1.26	2.13	100.05	2.71	45.8	0.9	5.13	1.83
YMC-24	51.91	13.74	12.43	5.58	9.16	4.28	0.22	0.22	0.12	1.55	0.78	99.98	4.49	47.3	1.0	3.06	2.26
YMC-26	51.47	13.69	11.21	5.30	9.68	4.25	0.15	0.22	0.13	1.54	2.17	99.81	4.39	48.6	1.0	3.12	2.28
YMC-25	51.80	13.85	10.56	4.52	10.63	4.73	0.13	0.19	0.13	1.64	1.39	99.57	4.86	46.1	0.9	2.85	2.68
YMC-27	50.31	13.38	12.19	7.83	10.04	3.44	0.23	0.21	0.11	1.47	0.90	100.11	3.67	56.2	1.0	3.65	1.84
YMC-28	52.40	14.72	11.35	5.27	7.93	4.83	0.20	0.20	0.12	1.56	0.46	99.05	5.04	48.2	1.1	2.92	2.70

注: Mg[#] = 100×Mg/(Mg+2Fe), 原子数比; δ = (K+NaO)/(SiO₂-43)。

混染或者流体的交代作用。过渡元素球粒陨石标准化图解中^[16](图 6), 岩石分配曲线呈现明显的“W”型,

Ni 和 Cr 明显亏损, 表明岩浆形成过程中经历了橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用。

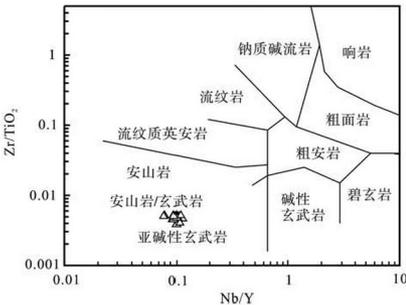
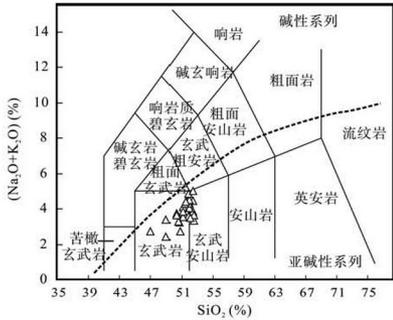


图 2 榆木川辉绿玢岩 TAS (a) 和 Zr/TiO_2 -Nb/Y (b) 图解
Fig. 2 TAS (a) and Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (b) diagrams for the Yumuchuan siltites

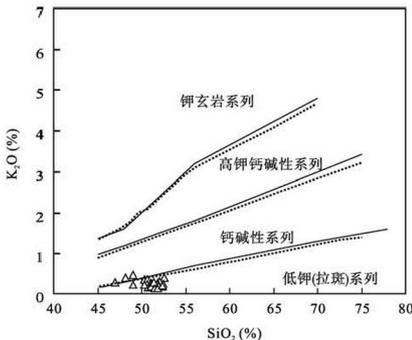


图 3 榆木川辉绿玢岩 K_2O - SiO_2 图解
Fig. 3 K_2O vs. SiO_2 diagram for the Yumuchuan siltites

4 Sr-Nd 同位素

Sr-Nd 同位素组成(表 4)显示, 研究区基性岩的 Sr 初始比值($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i=0.704958~0.705631, $e_{Nd}(t)$ = 7.2~8.1, 这种较低的 Sr 初始比值和较高的 $e_{Nd}(t)$ 值表明榆木川辉绿玢岩的基性岩浆可能来源于 LREE 长期较亏损的地幔源^[4]。

5 成因讨论

5.1 源区性质和部分熔融

榆木川辉绿玢岩 SiO_2 (47.02%~52.60%) 含量较低, 而任何地壳物质部分熔融形成的熔体都具有较高的 SiO_2 含量^[14,17-19], 表明其来自地幔而不是地壳源区, 同时榆木川辉绿玢岩具有低的 $Mg^{\#}$ (44.4~56.5), 明显小于原始玄武质岩浆 ($Mg^{\#} = 66\sim75$), 而且 Cr (107~189 $\mu g/g$) 和 Ni (48.3~110 $\mu g/g$) 含量也较低, 暗示该岩石来源于演化程度较高的岩浆。

在原始地幔标准化图解中, 榆木川辉绿玢岩的微量元素组成同 N-MORB 较一致(图 5b), 稀土分布模式也具有 N-MORB 特征的 LREE 亏损特征(图 5a); 此外, 同位素数据也显示它们具有较低的初始($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 比值(0.704958~0.705631)和正的 $e_{Nd}(t)$ 值(7.2~8.1 之间), 同亏损地幔组成相一致。以上特征表明研究区基性岩的源区为亏损的地幔。

全岩稀土含量主要受地幔组成以及部分熔融程度来控制, 所以稀土元素的丰度和比值可以被广泛地用于对幔源岩石源区特征及地幔熔融的程度限定^[20-23]。稀土元素在地幔橄榄岩的熔融过程中属于中等不相容元素^[21], 所以它们的浓度和比值不会受地幔亏损和流体混入的明显影响^[24-25]。此外, 地幔橄榄岩熔融过程中初始熔体中的 Yb 含量主要受控于残留的石榴子石^[21]。由地幔橄榄岩部分熔融并伴随有石榴子石残留而形成的熔体具有低的 Yb 含量和高的 LREE(如 La 和 Sm)/Yb 比值; 考虑到稀土模式由源区组成的富集和亏损来确定, 尖晶石-二辉橄榄岩源区部分熔融则会形成相对平坦的熔融趋势, 因为尖晶石中 La ($D_{spinel/melt} = 0.01$), Sm ($D_{spinel/melt} = 0.01$) 和 Yb ($D_{spinel/melt} = 0.01$)^[26] 的分配系数相似。

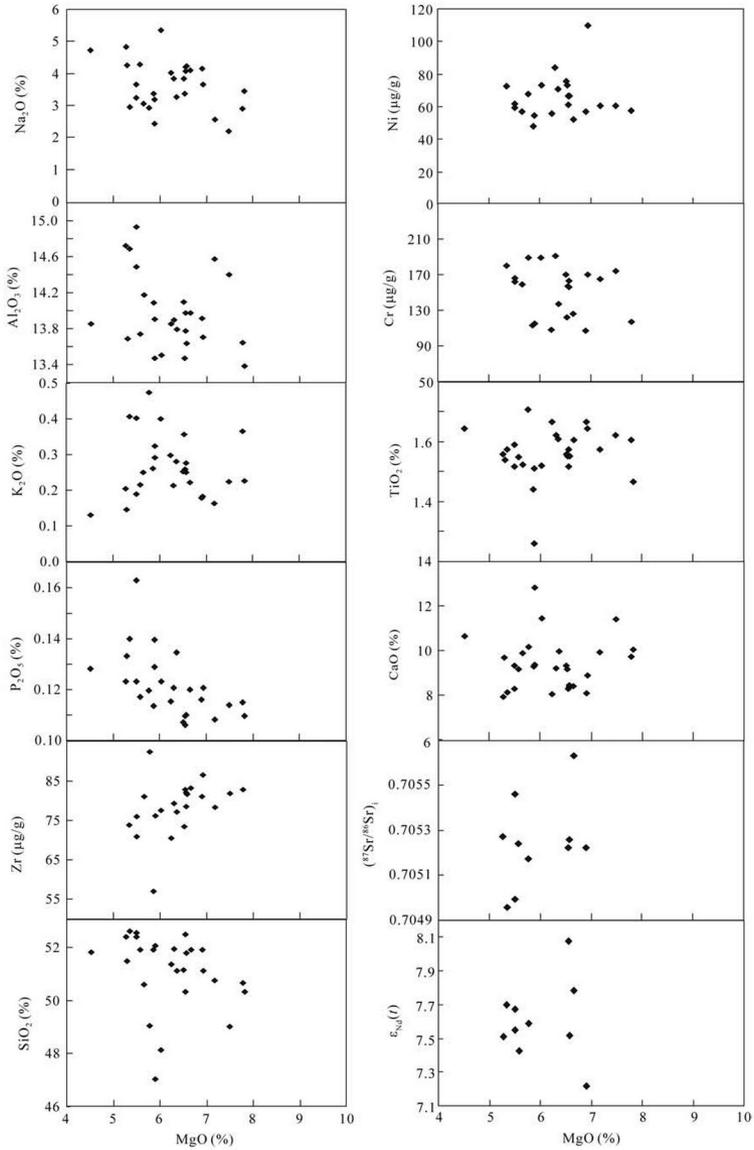


图4 榆木川辉绿玢岩 Harker 图解

Fig.4 Harker diagrams for the Yumuchuan sillites

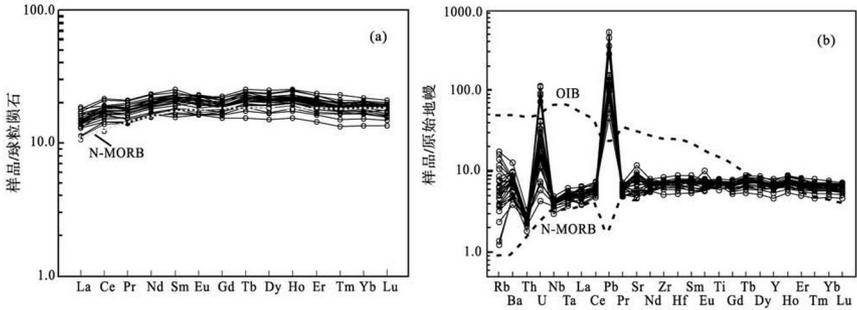


图5 榆木川辉绿玢岩稀土分布模式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for the Yumuchuan siltites 标准化值据Sun *et al.* [16].

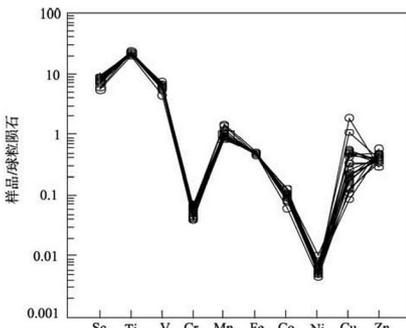


图6 榆木川辉绿玢岩过渡元素球粒陨石标准化图解

Fig. 6 Chondrite-normalized transitional elements diagram for the Yumuchuan siltites

基于上述讨论,在Sm/Yb-Sm图解中(图7),研究区辉绿岩的Sm/Yb比值与尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线相一致,从而表明其来源于尖晶石二辉橄榄岩地幔源区。

Ba/Ca-Sr/Ca和La-La/Sm图解(图8)明显表明,榆木川辉绿玢岩为部分熔融作用的产物。在Sm/Yb-Sm图解中(图7),计算结果表明研究区辉绿玢岩由尖晶石二辉橄榄岩经历了较低程度的(5%~10%)部分熔融而形成。

5.2 分离结晶

在Harker图解中(图4),MgO与Al₂O₃没有明显的相关关系,而且在稀土分布模式图中基本没有Eu的负异常,暗示成岩过程中不存在斜长石的分离结晶;MgO与P₂O₅存在明显的负相关关系,表明成岩过程中存在磷灰石的分离结晶;过渡元素球粒陨石

表4 榆木川辉绿玢岩Sr-Nd同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the representative siltites from Yumuchuan

样号	Rb (μg/g)	Sr (μg/g)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) (⁸⁶ Sr)	Sm (μg/g)	Nd (μg/g)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd(t)}
YMC-03	8.80	123	0.2068	0.705732	3	0.704958	2.77	7.89	0.2122	0.513059	2	0.512694	7.7
YMC-04	1.48	121	0.0353	0.705594	2	0.705462	2.58	7.38	0.2113	0.513050	3	0.512686	7.6
YMC-07	10.2	145	0.2033	0.705753	3	0.704992	3.20	8.96	0.2159	0.513064	2	0.512692	7.7
YMC-12	11.1	247	0.1299	0.705658	7	0.705172	3.87	10.8	0.2166	0.513061	4	0.512688	7.6
YMC-14	2.46	159	0.0447	0.705798	5	0.705631	3.44	9.81	0.2120	0.513063	2	0.512698	7.8
YMC-16	3.88	178	0.0630	0.705458	6	0.705222	3.04	8.89	0.2067	0.513069	5	0.512713	8.1
YMC-18	3.59	186	0.0558	0.705468	6	0.705259	3.27	9.11	0.2170	0.513058	4	0.512684	7.5
YMC-21	2.00	118	0.0490	0.705409	4	0.705226	2.77	7.59	0.2206	0.513049	3	0.512669	7.2
YMC-24	2.34	124	0.0545	0.705447	4	0.705243	3.29	9.08	0.2190	0.513057	2	0.512680	7.4
YMC-28	2.92	163	0.0518	0.705468	4	0.705274	3.64	10.7	0.2056	0.513038	3	0.512684	7.5

注: ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr和¹⁴³Sm/¹⁴⁴Nd比值由样品的ICP-MS结果计算获得。⁸⁷Rb/⁸⁶Sr = 2.89 × (Rb/Sr), ¹⁴³Sm/¹⁴⁴Nd = 0.6045 × (Sm/Nd),表中以t = 263 Ma(平均年龄)来对Sr、Nd同位素加以校正。

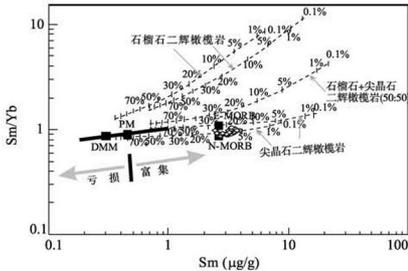


图 7 榆木川辉绿岩 Sm/Yb-Sm 图解

Fig.7 Sm/Yb vs. Sm diagram of sillites from Yumuchuan 熔融曲线为尖晶石+二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol0.530 + spx0.270 + cpx0.170 + sp0.030 and ol0.060 + opx0.280 + cpx0.670 + sp0.110)^[27]和石榴石+二辉橄榄岩(模式及熔体模式: ol0.600 + opx0.200 + cpx0.100 + gt0.100 and ol0.030 + cpx0.160 + cpx0.880 + gt0.090)^[28]。矿物/基质分配系数以及 DMM 引自 McKenzie et al.^[24,29]。PM、N-MORB 和 E-MORB 组成引自 Sun et al.^[16]。每条曲线上的数字对应于给定地幔源区的部分熔融程度。

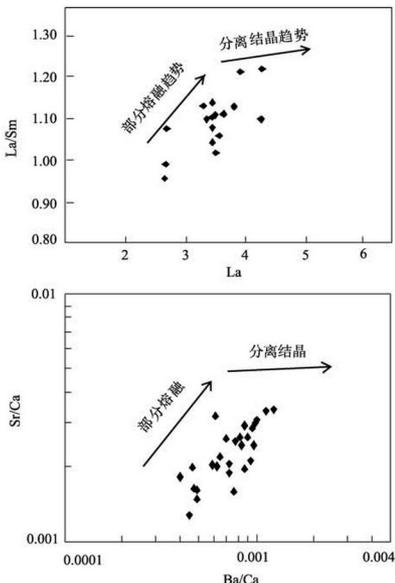


图 8 榆木川辉绿岩岩脉部分熔融图解

Fig.8 Partial melting diagram of the sillites from Yumuchuan

标准化图解暗示岩浆在上升侵位过程中可能同时经历了橄榄石、单斜辉石的分离结晶作用。

5.3 地壳混染和流体交代

地壳混染会引起玄武质岩石明显的 Sr-Nd 同位素变化, 从而导致 MgO 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间正的相关关系, 以及 MgO 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 之间负的相关关系, 此外还会引起 Nb-Ta 的亏损^[30], 然而在榆木川辉绿岩原始地幔标准化蛛网图中并不存在 Nb-Ta 的亏损; 而且, MgO 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 之间也没有明显的相关关系, 暗示榆木川基性岩岩浆在上升侵位过程中不可能受到大量地壳物质的混染。另外, 我们采用两端元混合计算方式来检验是否存在陆壳物质的混染。以亏损地幔与上地壳作为两端元以及亏损地幔与下地壳作为两端元分别进行混合计算, 结果同样表明, 成岩过程中没有明显地壳物质的参与(混染程度 < 1%) (图 9)。此外, 它们具有与原始地幔 (Ta/La = 0.06^[33]) 基本一致的 Ta/La 比值 (0.04~0.07), 也排除了地壳物质的混染。

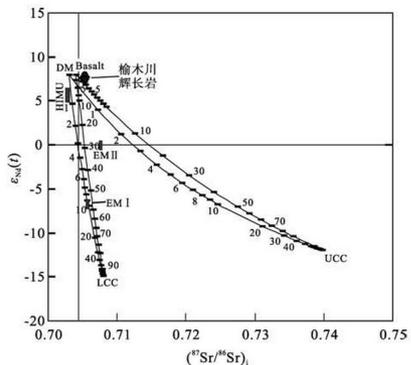


图 9 榆木川辉绿岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig.9 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for sillites from Yumuchuan 其中数字表示地壳物质参与的比例, 计算采用的参数 Nd ($\mu\text{g/g}$)、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、Sr ($\mu\text{g/g}$) 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值如下: 软流圈地幔(DM)分别为 1.2、+8、20 和 0.703; 玄武岩(Basalt)分别为 15、+8、200 和 0.704; 上地壳(UCC)分别为 30、-12、250 和 0.740^[31]; 下地壳(LCC)分别为 20、-15、230 和 0.708^[32]。

然而, 基性岩中大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr)与 N-MORB 相比存在不同程度的富集, 且 U 含量(平均值 0.69 $\mu\text{g/g}$)及 Pb 含量(3.19~36.9 $\mu\text{g/g}$)与 MORB (0.23 $\mu\text{g/g}$ 和 0.38 $\mu\text{g/g}$)^[34] 比较高, 暗示源区可能受到了流体的交代作用。因为已有研究表明, 在排除地壳物质混染的前提下, 地幔楔中亲石岩浆

元素(Rb、K、Sr、Ba、U和Pb等)的富集最可能是由流体交代作用引起的^[35-36]。另外,关于地幔流体的交代作用,目前多数人认为是洋壳俯冲过程中或之后脱水作用的结果^[2]。因此,结合研究区的构造演化历史,我们认为最可能是古亚洲洋俯冲沉积物析出流体交代了地幔源区。

5.4 构造背景及岩石成因

兴安-蒙古造山带是中亚造山带的一部分,位于北部的西伯利亚地台和南部的华北地块之间^[7],由多个块体拼合而成。综合各种地质和地球物理资料,兴安-吉黑地区诸多陆块在晚二叠世前已拼合成一体,随后作为一个统一的古陆块,先后于晚二叠世和早中侏罗世,完成了与华北陆块和西伯利亚板块的拼贴碰撞过程^[38]。虽然对于古亚洲洋最后闭合的时间和地点始终是一个长期争论的问题,但综合各方面的研究和证据基本可以确定其时间为晚古生代^[13, 37, 39],而且普遍认为一直到中生代初期才结束海域发育的历史,不过上述认识仍有待于进一步的研究^[37, 40]。

幔源基性岩(辉长岩、辉绿岩)作为伸展构造背景下形成的岩石,其形成表明造山带此时已完成碰撞而处于造山后的伸展拉张阶段。赵庆英等对延边地区五道沟群辉长岩的 SHRIMP U-Pb 高精度定年结果表明其就位年龄为~270 Ma,从而推断兴安造山带晚期由挤压向伸展转换的时间应该在~270 Ma。本文对榆木川辉绿岩岩体的初步研究表明其就位年龄为263 Ma,与上述年龄误差范围内一致,进一步表明此时兴安造山带已处于造山后的伸展拉张阶段,基本结束了古亚洲洋构造域的控制。这对研究兴安造山带的构造演化历史具有重要的意义。同位素分析结果表明,榆木川辉长岩具有较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i(0.704958-0.705631)和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(7.2-8.1),暗示其源区为亏损的地幔。结合主元素和微量元素研究我们认为榆木川辉绿岩的岩浆源区为受到古亚洲洋板片俯冲沉积物析出的流体改造的亏损岩石圈地幔,上升过程中未明显受到地壳混染影响。其岩浆演化的过程可能为:在兴安造山带的晚期(约270 Ma),由于挤压碰撞而导致岩石圈的缩短加厚,随后因重力不稳定而发生拆沉作用,下地壳和岩石圈地幔的拆沉作用将造成山根的垮塌,伸展作用和盆地的形成^[41]。在岩石圈减薄和拉张背景下,造山带下先存的亏损地幔(已受流体的交代影响)发

生熔融并沿着破碎和断裂带快速上涌,在上升侵位过程中经历了橄榄石和单斜辉石等矿物的分离结晶,最终形成研究区基性岩。

6 结论

(1) K-Ar 法年龄测定表明榆木川辉绿岩形成于~260 Ma。

(2) 主元素和微量元素研究表明榆木川辉绿岩属于低钾斑岩系列岩石;微量元素蛛网图和稀土分布模式都具有 MORB 型特征,但与之相比富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba;榆木川辉绿岩岩浆具有较低的 Sr 初始比值(0.704958-0.705631)和较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(7.2-8.1之间),表明其岩浆来源于受到俯冲大洋沉积物析出流体交代的均一亏损地幔源区,但岩浆上升过程中没有明显受到地壳物质的混染。

(3) 榆木川辉绿岩的侵位表明兴安造山带此时已处于造山后的伸展拉张阶段。结合前人的研究成果,在270 Ma左右兴安造山带逐渐结束造山,随后发生了岩石圈的拆沉减薄和伸展拉张,受到古亚洲洋沉积物析出流体改造的亏损岩石圈地幔在减压条件下发生熔融并快速上涌,并经历了橄榄石和单斜辉石等矿物的分离结晶作用,最终形成了榆木川辉绿岩。

李才教授、迟效国教授、于晓飞博士和邱殿明博士在野外工作中给予了帮助,在此一并感谢!

参考文献(References):

- [1] 邵济安, 张履桥. 华北北部中生代岩墙群[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 312-318.
Shao Ji-an, Zhang Lü-qiao. Mesozoic dyke swarms in the north of North China [J]. Acta Petrol Sinica, 2002, 18(3): 312-318 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘泉, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 鲁西晚中生代基性脉岩的成因和源区性质: 岩石学和地球化学[J]. 地质评, 2004, 50(6): 577-586.
Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Feng Cai-xia. Genesis and source characteristics of the mafic-ultramafic dikes in west Shandong Province: Evidence from petrology and geochemistry[J]. Geol Rev, 2004, 50(6): 577-586 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张贵山, 温汉捷, 胡瑞忠, 裴榆卓, 许成. 闽东南基性岩脉成因及动力学背景研究: Sr-Nd 同位素、元素地球化学[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 793-804.
Zhang Gui-shan, Wen Han-jie, Hu Rui-zhong, Qiu Yu-zhuo,

- Xu Cheng. Genesis and dynamic setting of mafic dikes in southeastern Fujian: Evidence from Sr-Nd isotopic and major and trace element geochemistry[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(4): 793-804 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 14-31.
- Li Xian-hua, Hu Rui-zhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China[J]. Geochimica, 1997, 26(2): 14-31 (in Chinese with English abstract).
- [5] 周琴, 吴福元, 储善银, 杨岳衡, 孙德伟, 葛文春. 吉林蛟河地幔橄辉岩捕虏体的 Sr-Nd-Hf-Os 同位素特征与岩石圈地幔时代[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1269-1280.
- Zhou Qin, Wu Fu-yuan, Chu Zhu-yin, Yang Yue-heng, Sun De-you, Ge Wen-chun. Sr-Nd-Hf-Os isotopic characterizations of the Jiaohe peridotite xenoliths in Jilin province and constraints on the lithospheric mantle age in northeastern China[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(6): 1269-1280 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张广良, 吴福元. 吉林红旗岭地区造山后镁铁-超镁铁岩体的年代测定及其意义[J]. 地震地质, 2005, 27(4): 600-608.
- Zhang Guang-liang, Wu Fu-yuan. Geochronology significances of the post-orogenic mafic-ultramafic rocks in Hongqingling area of Jilin Province, NE China[J]. Seismol Geol, 2005, 27(4): 600-608 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵富春, 张晓博, 曹成润, 李晓英. 东北地区及邻区晚中生代晚期构造特征及演化规律[J]. 吉林地质, 2007, 26(4): 8-13.
- Zhao Fu-chun, Zhang Xiao-bo, Cao Cheng-run, Li Xiao-ying. The end of the late Paleozoic structural features and evolutionary regularity in northeast China and adjacent area[J]. Jilin Geol, 2007, 26(4): 8-13 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨忠辉, 吴福元, 张艳斌, 张旗, Wilde S A. 辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1878-1882.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Zhang Qi, Wilde S A. Identification of Mesoproterozoic zircons in a Triassic dolerite from the Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. Chinese Sci Bull, 2004, 49(18): 1958-1962.
- [9] 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 倪培, 凌洪飞, 刘敦一. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2161-2168.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Ni Pei, Ling Hongfei, Liu Dunyi. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China[J]. Chinese Sci Bull, 2005, 50(22): 2612-2620.
- [10] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 赵全国. 吉林通化赤柏松长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 2005, 35(5): 393-398.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yang Debin, Zhao Quanguo. SHRIMP zircon U-Pb dating and its geological significance of Chibaosong gabbro in Tonghua area, Jilin Province, China[J]. Sci China (D), 2006, 49(4): 368-374.
- [11] 宋彪, 乔秀夫. 辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆石年龄及其构造意义[J]. 地球学报, 2008, 15(3): 250-262.
- Song Biao, Qiao Xiu-fu. Ages of the zircons from basalts of the Erdaogou Formation and diabase dyke warms in Northern Liaoning, and their significances[J]. Earth Sci Front, 2008, 15(3): 250-262 (in Chinese with English abstract).
- [12] 赵庆英, 李春峰, 李殿超, 陈跃军. 延边地区五道沟群辉长岩岩脉的锆石年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 2008, 27(2): 150-155.
- Zhao Qing-ying, Li Chun-feng, Li Dian-chao, Chen Yue-jun. Dating for zircons from gabbro dike of Wudaogou Group in Yanbian area and its geological significance[J]. Global Geol, 2008, 27(2): 150-155 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孟思, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 纪伟强, 于洋, 张兴洲. 佳木斯地块东缘及东南缘二叠纪火山作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 科学通报, 2008, 53(8): 956-965.
- Meng En, Xu Wenliang, Yang Debin, Pei Fuping, Yu Yang, Zhang Xing-zhou. Permian volcanisms in eastern and south-eastern margins of the Jiamusi Massif, northeastern China: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and its tectonic implications[J]. Chinese Sci Bull, 2008, 53(8): 1231-1245.
- [14] Liu Shen, Hu Ruizhong, Gao Shan, Feng Caixia, Feng Guang-ying, Coulson I M, Li Cai, Wang Tao, Qi Youqiang. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust[J]. Lithos, 2010, 114(3/4): 423-436.
- [15] 张永清, 凌文黎, 李方林. 峡东地区南华纪-寒武纪地层风化过程元素及 Sr-Nd 同位素演化特征及其地球化学意义[J]. 地球科学, 2008, 33(3): 301-312.
- Zhang Yong-qing, Ling Wen-li, Li Fang-lin. Element and Sr-Nd isotopic mobility during weathering process of the Nanhuanian-Cambrian sedimentary strata in the eastern Three Gorges and its geochemical implication[J]. Earth Sci, 2008, 33(3): 301-312 (in Chinese with English abstract).
- [16] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc Spec Publ 42, 1989: 313-345.
- [17] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite [J]. Nature, 2003, 425(6958): 605-609.
- [18] Yang Jianjun, Godard G, Kienast J-R, Lu Yongzheng, Sun Jinxiong. Ultrahigh-pressure (60 kbar) magnesite-bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China[J]. J Geol, 1993, 101(5): 541-554.
- [19] Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zhidan, Hu Yiken. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochim Cosmochem Acta, 1998, 62(11): 1959-1975.
- [20] Gurenko A A, Chaussidon M. Enriched and depleted primitive melts included in olivine from Icelandic tholeiites: Origin by continuous melting of a single mantle column[J]. Geochim

- Cosmochem Acta, 1995, 59(14): 2905–2917.
- [21] Johnson K T M. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressure[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 133(1/2): 60–68.
- [22] Zhao Jun-Hong, Zhou Mei-Fu. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precamb Res*, 2007, 152(1/2): 27–47.
- [23] Liu Shen, Su Wenchao, Hu Ruizhong, Feng Caixia, Gao Shan, Coulson I M, Wang Tao, Feng Guangying, Tao Yan, Xia Yong. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China[J]. *Lithos*, 2010, 114(1/2): 253–264. doi: 10.1016/j.lithos.2009.08.012
- [24] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1995, 23: 251–285.
- [25] Munker C. The isotope and trace element budget of the Cambrian Devon River arc system, New Zealand: Identification of four source components[J]. *J Petrol*, 2000, 41(6): 759–788.
- [26] McKenzie D, O'Nions R K. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations[J]. *J Petrol*, 1991, 32(5): 1021–1091.
- [27] Kinzler R J. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(B1): 853–874.
- [28] Walter M J. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere[J]. *J Petrol*, 1998, 39(1): 29–60.
- [29] McKenzie D, O'Nions R K. The source regions of ocean island basalts[J]. *J Petrol*, 1995, 36(1): 133–159.
- [30] 唐文龙, 杨言辰. 吉林红旗岭镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 2007, 26(2): 164–172. Tang Wen-long, Yang Yan-chen. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks and their geological significance in Hongqiling mine of Jilin[J]. *Global Geol*, 2007, 26(2): 164–172 (in Chinese with English abstract).
- [31] Jahn B M, Wu F Y, Hong D W. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Proc Indian Acad Sci (Earth Planet Sci)*, 2000, 109: 5–20.
- [32] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Sun D Y. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 89–113.
- [33] Wood D A, Tarney J, Varet J, Saunders A D, Bougault H, Joron J L, Treuil M, Cann J R. Geochemistry of basalts drilled in the North Atlantic by IPOD Leg 49: Implications for mantle heterogeneity [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1979, 42(1): 77–97.
- [34] Kelemen P B, Hanghøj K, Greene A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust [M]/Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry Volume 3: The Crust*. New York: Elsevier, 2003: 593–659.
- [35] Regelous M, Collerson K D, Ewart A, Wendt J I. Trace element transport rates in subduction zones: Evidence from Th, Sr and Pb isotope data for Tonga-Kermadec Arc lavas[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 150(3/4): 291–302.
- [36] Johnson M C, Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments [J]. *Geochem Geophys Geosys*, 1999, 1(12), 1007. doi:10.1029/1999GC000014
- [37] 吴福元, 曹林. 东北亚地区的若干重要基础地质问题[J]. *世界地质*, 1999, 18(2): 1–13. Wu Fu-yuan, Cao Lin. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. *World Geol*, 1999, 18(2): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张兴洲, 杨宏俊, 吴福元, 刘国兴. 中国兴安-蒙古黑地区岩石圈结构基本特征[J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 816–823. Zhang Xing-zhou, Yang Bao-jun, Wu Fu-yuan, Liu Guo-xing. The lithosphere structure in the Hinggan-Jilhe (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China[J]. *Geol China*, 2006, 33(4): 816–823 (in Chinese with English abstract).
- [39] Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Jahn Bor-ming, Wilde S. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chem Geol*, 2002, 187(1/2): 143–173.
- [40] 彭向东, 张梅生, 李晓敏. 吉黑造山带古生代构造古地理演化[J]. *世界地质*, 1999, 18(3): 24–28. Peng Xiang-dong, Zhang Mei-sheng, Li Xiao-min. The evolution of Paleozoic tectonic paleogeography in Jilin and Heilongjiang orogenic belt [J]. *World Geol*, 1999, 18(3): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- [41] 林炯, 赵崇斌, 肖焕钦, 陈广浩, 闫义, 张德圣, 刘士林, 陈运平. 华北克拉通构造活化的动力学机制与模型[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(2): 133–142. Lin Ge, Zhao Chong-bin, Xiao Huan-qin, Chen Guang-hao, Yan Yi, Zhang De-sheng, Liu Shi-lin, Chen Yun-ping. Dynamic mechanisms and models of tectonic activation in North China craton[J]. *Geotecton Metallogen*, 2008, 32(2): 133–142 (in Chinese with English abstract).