

佳木斯地块中部二叠纪永清花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义

张磊¹ 李秋根² 史兴俊¹ 童英¹ 侯继尧^{1,3} 张建军^{1,3} 王涛¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中国地质大学, 北京 100029)

摘要: 位于中国东北佳木斯地块中部的永清花岗闪长岩曾被认为是早古生代麻山群的一部分, LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析表明其形成时代为 265 ± 1 Ma (MSWD=2.1) 相当于中二叠世。该岩体主要由半自形到自形的斜长石(30%~35%)、它形的石英(25%~30%)、它形的钾长石(20%~25%)和半自形的黑云母(10~15%)组成。在地球化学上, 永清花岗闪长岩是高钾钙碱性到钙碱性系列的过铝质岩石, Sm/Dy 值与 Dy 含量、Sr/Y 值与 Y 含量以及 Ce/Sm 值与 δEu 均呈显著的线性相关, 暗示在岩体侵位形成过程中同化混染作用有明显表现。考虑同化混染作用的影响, 永清花岗闪长岩的母岩浆具有较高的 Sr/Y 和 Sm/Dy 值等特征可能反映源区中存在石榴子石, 指示源区深度可能大于 25 km。这与佳木斯地块南缘和张广才岭地区同期侵入岩的源区深度相对较浅形成鲜明的对照。结合区域研究资料, 认为永清花岗闪长岩可能形成于佳木斯地块和松嫩地块及兴凯地块碰撞中或者碰撞后的环境。
关键词: 佳木斯地块; 花岗闪长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 二叠纪; 地球化学

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-1022-15

Zircon U-Pb age and geochemistry of the Permian Yongqing granodiorite intrusion in Jiamusi massif of Northeast China and their implications

ZHANG Lei¹, LI Qiu-gen², SHI Xing-jun¹, TONG Ying¹, HOU Ji-yao^{1,3}, ZHANG Jian-jun^{1,3}
and WANG Tao¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Yongqing granodiorite, located in the inner part of the Jiamusi massif in eastern Northeast China, was previously considered as a part of the Early Paleozoic Mashan complex. LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analysis yields a middle Permian age of 265 ± 1 Ma (MSWD=2.1). The granodiorite is composed of subhedral to euhedral plagioclase (30%~35%), anhedral quartz (25%~30%), anhedral K-feldspar (20%~25%) and subhedral biotite (10%~15%). Geochemically, the granodiorite is high-K calc-alkaline to calc-alkaline and peraluminous in composition, and shows very good linear correlation between Sm/Dy and Dy, Sr/Y and Y, and Ce/Sm and δEu , probably resulting from assimilation and contamination of some country rocks during the emplacement without melt fractionation. Taking the effects of assimilation and contamination into consideration, the authors hold that the high Sr/Y and Sm/Dy ratios of parental magma of the Yongqing granodiorite might

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2013-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102032); 中国地质调查局地质调查工作项目(12120113094000, 12120113096500, 1212010811033)

作者简介: 张磊(1983-), 男, 博士, 主要从事岩浆岩岩石学和大地构造研究, E-mail: windprint@gmail.com.

imply the presence of garnet in the source. The depth of the source rocks might have been greater than 25 km, distinctly different from the depths of contemporaneous intrusions in southern Jiamusi massif and the Zhangguangcai Mountain. Combined with previous studies, it is suggested that the Yongqing granodiorite was formed during or after the collision between the Jiamusi massif, Songnen block and Xingkai block.

Key words: Jiamusi massif; granodiorite; zircon U-Pb age; Permian; geochemistry

中国东北地区位于中亚造山带的东部,自西向东由额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木斯地块、兴凯地块和那丹哈达地块等数个大小不一的块体组成(图 1a)。近年来,一些基础地质研究的重要进展改变了许多以往对中国东北地区的认识,如:确定佳木斯地块麻山群变质作用发生在早古生代(宋彪等,1997;Wilde *et al.*,2000,2001;任留东等,2010),重新构建了中国东北地区花岗岩时空分布,提出这些花岗岩不都是早期所认为的形成于古生代,而是主要形成于中生代(Wu *et al.*,2011)。特别是近年来一些高精度的锆石 U-Pb 定年数据的获得,重新确定佳木斯地块及邻区一些早期认为形成于前寒武纪或早古生代的侵入岩实际上形成于晚古生代末期(宋彪等,1994;李锦轶等,1999;吴福元等,2001;黄映聪等,2008;杨浩等,2012;魏红艳等,2012;Cui *et al.*,2013;Yu *et al.*,2013)。然而,关于这些晚古生代岩体的构造背景迄今为止还没有获得一致的认识。一些学者提出中晚二叠世佳木斯地块及邻区可能处于松嫩-佳木斯地块之间大洋板块或佳木斯地块以南古亚洲洋板块的俯冲环境(吴福元等,2001;黄映聪等,2008;李旭平等,2010),而另一些学者则认为这一时期佳木斯地块与松嫩地块或华北板块之间大洋板块的俯冲已经结束,这些中晚二叠世侵入岩是这些块体碰撞后形成的(Cui *et al.*,2013;Yu *et al.*,2013)。

值得注意的是,目前所识别出的这些中晚二叠世侵入岩主要分布于佳木斯地块西缘、与佳木斯地块西侧相邻的松嫩地块东缘和东侧相邻的兴凯地块(图 1b),而在佳木斯地块内部是否存在该时期的侵入岩还不清楚。本文在佳木斯地块内部最新识别出一个中二叠世侵入岩体,根据其锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征,结合区域地质资料,初步探讨了这一时期佳木斯地块及邻区的构造环境。

1 地质背景

佳木斯地块是位于中国东北黑龙江省东部的一

个前寒武纪地块(图 1a),向北可延伸到俄罗斯境内,所以又称佳木斯-布列亚地块。佳木斯地块的基底主要由两种变质程度不同的岩石组成:一种是角闪岩相-麻粒岩相变质的麻山群(麻山杂岩),主要分布在地块的内部;另一种是绿片岩相-角闪岩相变质的黑龙江群(黑龙江杂岩),主要出露于地块西缘的 3 个地区,即北部的萝北地区、中部的依兰-桦南地区和南部靠近牡丹江断裂带的地区(e.g.,Wu *et al.*,2007;颜炳强等,2008)。麻山群和黑龙江群曾被认为是太古宙、古元古代或中元古代的变质地层(刘静兰,1991;曹熹等,1992;党延松等,1993;黑龙江省地质矿产局,1993)。近年来的研究表明,麻山群遭受麻粒岩相变质的时间为 500 Ma 左右(宋彪等,1997;李锦轶等,1999;Wilde *et al.*,1999,2000,2001,2003;任留东等,2010)。黑龙江群经历了早古生代、晚古生代晚期和晚三叠世到早中侏罗世 3 期变质作用(李锦轶等,1999;Wu *et al.*,2007;颜炳强等,2008;李旭平等,2009,2010),是一套含有新元古宙洋壳残片的增生碰撞杂岩(Wu *et al.*,2007;颜炳强等,2008)。

除上述两群和一些晚中生代的沉积盖层外,佳木斯地块还发育大量的花岗岩。这些花岗岩类主要分布于佳木斯地块的南缘和中部。吴福元等(2001)通过详细的野外观察将地块南缘的这些花岗岩分为两个大的类型,一类为经历过麻粒岩相变质作用改造的花岗片麻岩类,确认其应为佳木斯地块结晶基底的组成部分;另一类为具有明显的岩浆结晶结构、不具有任何后期变质作用叠加痕迹的片麻状花岗岩类,可能形成于中晚二叠世(吴福元等,2001;黄映聪等,2008)。佳木斯地块中部花岗岩类主要分布于桦南县和双鸭山市附近,是麻山群的组成部分。早期地质工作认为桦南县附近的岩体是一套混合花岗岩,而鸭山市附近的岩体由较早一期花岗闪长岩和较晚一期花岗岩所组成,并认为这些花岗岩类都形成于元古宙。近年来一些高精度的锆石 U-Pb 定年数据表明,佳木斯地块中部这些花岗岩类的形成时代可能为寒武纪(Wilde *et al.*,2000,2001)。

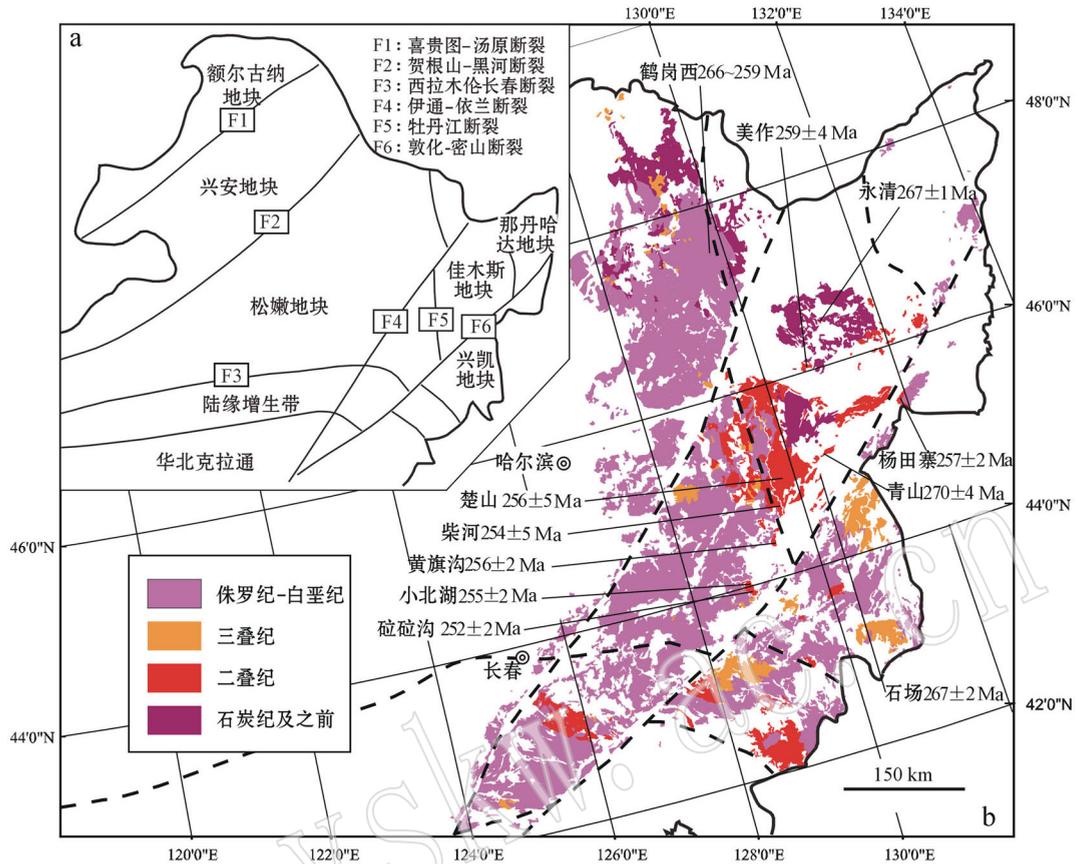


图 1 中国东北构造划分简图(a, 据 Wu *et al.*, 2003)和中国东北地区东部花岗岩类分布图(b, 据 Wu *et al.*, 2011)
Fig. 1 Tectonic framework of Northeast China (a) (after Wu *et al.*, 2003) and distribution of granitoids in eastern Northeast China (b) (modified after Wu *et al.*, 2011)

永清花岗岩闪长岩位于佳木斯地块中部; 楚山、柴河、石场和青山岩体年龄数据来自吴福元等(2001), 黄旗沟、小北湖和砬砬沟岩体年龄数据来自 Yu 等(2003), 鹤岗西鹤林林场附近中二叠世岩体数据来自魏红艳等(2012), 美作岩体年龄数据来自黄映聪等(2008), 杨田寨岩体年龄数据来自杨浩等(2012)

Yongqing granodiorite is located in the inner part of Jiamusi massif; Age data sources: Chushan, Chaihe, Shichang and Qingshan plutons are from Wu Fuyuan *et al.* (2001), Huangqigou, Xiaobeihu and Lalagou plutons are from Yu *et al.* (2013), middle Permian intrusions near Helin forest farm to the west of Hegang City are from Wei Hongyan *et al.* (2012), Meizuo pluton is from Huang Yingcong *et al.* (2008) and Yangtianzhai pluton is from Yang Hao *et al.* (2012)

本文报道的永清岩体是一个位于双鸭山市和桦南县之间的小岩体, 曾被认为是佳木斯地块中部麻山群花岗岩类中较早一期花岗闪长岩的组成部分, 而本文锆石 U-Pb 年龄表明, 其形成时代应为中二叠世。

2 岩体和样品特征

永清岩体位于黑龙江省双鸭山市以南的虎力河边, 是一个出露面积不足 0.5 km² 的小岩体。该岩体呈东西向的长条状分布, 其南侧和北侧分别被早白垩世城子河组和晚白垩世松木河组不整合覆盖。永清岩体由黑云母花岗闪长岩组成, 呈中-粗粒花岗结构, 块状构造, 并且不含其它岩性的包体。野外观

察表明, 该花岗闪长岩未发生明显的变形和变质(图 2a、2b)。

本文所分析的样品为黑云母花岗闪长岩, 取自该岩体出露区的两个露头, GPS 坐标分别为 46°19'10.0"N、131°4'20.2"E 和 46°19'27.4"N、131°2'15.7"E。所采集的样品一致显示, 该花岗闪长岩以暗色矿物不含角闪石而含黑云母为主要特征。在显微镜下, 该花岗闪长岩呈半自形粒状结构(图 2c、2d), 主要由半自形到自形的斜长石(30%~35%)、它形的石英(25%~30%)、它形的钾长石(20%~25%)和半自形的黑云母(10%~15%)组成, 其它副矿物如磷灰石、磁铁矿和榍石较少(计 1%)。所有组成矿物均不显示蚀变或变形特征。

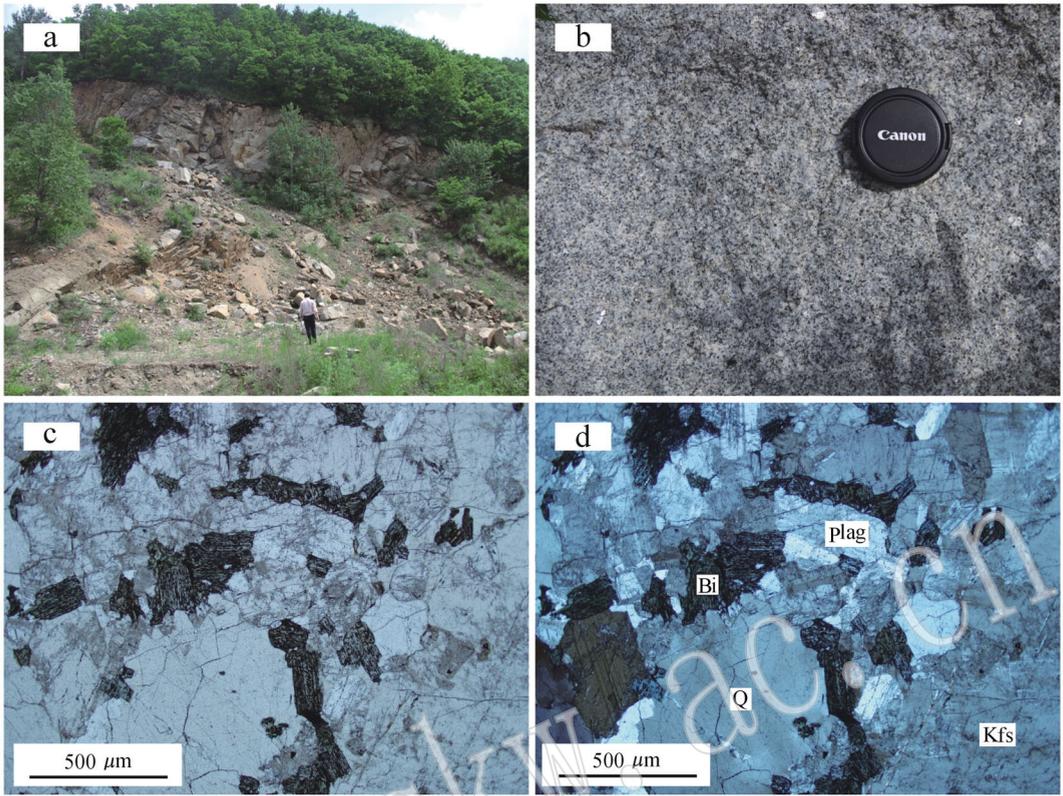


图 2 永清花岗闪长岩岩体的野外(a、b)、显微镜下单偏光(c)和正交偏光(d)照片

Fig. 2 Outcrop of Yongqing intrusion (a, b) and photograph of granodiorite under microscope (c, d) (c, plainlight; d, crossed nicols)

矿物缩写: Bi—黑云母; Kfs—钾长石; Plag—斜长石; Q—石英

Mineral abbreviations: Bi—biotite; Kfs—k-feldspar; Plag—plagioclase; Q—quartz

3 分析方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析

锆石单矿物分离在河北省诚信地质服务公司通过常规方法分选完成。挑选晶形和透明度较好的锆石颗粒制备环氧树脂靶。对环氧树脂靶上的锆石颗粒先后进行透射光、反射光和阴极发光显微拍照。根据图像分析,选取反射光下无裂隙、透射光下无包裹体、在阴极发光图像中无核幔现象的锆石颗粒进行 U-Th-Pb 同位素分析。

测年采用 LA-ICP-MS 方法,完成于天津地质矿产资源研究所。锆石单颗粒 U-Th-Pb 同位素分析采用配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)。激光剥蚀的束斑为 35 μm ,能量密度为 13~14 J/cm^2 ,频率为 8~10 Hz。激光剥蚀物质以 He 为载气送入质谱仪中。锆石标样采用 TEMORA 标准锆石。数据处理采用

ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008)和 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2003),采用 ^{208}Pb 对普通铅进行校正。利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U 和 Th 含量。分析方法与李怀坤等(2010)相同。

3.2 主要氧化物和微量元素含量分析

样品的全岩主微量元素地球化学分析在加拿大温哥华 ACME 实验室完成。详细的样品处理和分析方法为:准确称取 0.20 g 粉末样品,将其与 1.50 g LiBO_2 助熔剂放置于石墨坩埚内进行充分混合。将样品/助熔剂的混合物于马弗炉上在 1 050 $^\circ\text{C}$ 的温度下加热 15 min。提取熔融后的混合物,倒入 100 mL 由去离子水和 ACS 级纯度硝酸配置的 5% 浓度的 HNO_3 中。摇晃溶液 2 h 使其充分溶解,取一部分置入聚丙烯分析管内。将标定标样、检验标样和本底空白样加入样品序列。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和 Ba、Sc、Cu、Zn 和 Ni 含量的分析。在 ICP-MS 上进行其它微量元素以及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分

析 称取 0.50 g 样品,置于 3 mL 高温的(95℃)王水中进行溶解,通过 ICP-MS 进行分析。详细的分析方法与 ACME 中的 4A4B 组的流程相同,所有的分析精度均优于 $\pm 3\%$ 。

4 结果

对所采集的永清花岗闪长岩进行了 1 件 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析和 9 件主微量元

素地球化学分析。

4.1 锆石 U-Th-Pb 同位素

用于 U-Th-Pb 同位素分析的锆石挑选自一件较大的样品(12YQ01)。所分选出的锆石均无继承核,高度自形,并显示明显的岩浆震荡环带(图 3)。选取 32 颗锆石进行了 32 个点的分析(表 1),所有分析点均位于谐和线附近(图 4a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 268.6~260.2 Ma 之间,加权平均值为 265 ± 1 Ma,MSWD 为 2.1(图 4b)。



图 3 锆石阴极发光图像、分析位置及分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images, analytical locations and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of the analyzed zircons

4.2 主微量元素地球化学

永清花岗闪长岩的主微量元素地球化学分析结果(表 2)表明,其以高 Na_2O (3.53%~3.85%) 而低 K_2O (2.49%~3.30%) 为特征, SiO_2 和全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 分别在 65.74%~70.25% 和 6.04%~6.86% 之间,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,全部落入高钾钙碱性-钙碱性系列(图 5a)。永清花岗闪长岩的 A/CNK 和 A/NK 变化范围分别为 1.06~1.12 和 1.74~1.86,属于过铝质 I 型花岗岩(图 5b)。

永清花岗闪长岩的稀土元素中,重稀土元素含量较低,且在不同样品间轻稀土元素含量相近而重

稀土元素含量有较大变化(图 6a)。相应地,其轻、重稀土元素分馏也较大 ($\text{La}/\text{Yb} = 32.4 \sim 172$),并具有较高且变化范围较大的 Ce/Sm (13.1~23.3) 和 Sm/Dy 比值 (2.80~6.84)。此外,所有样品都显示了一定的 Eu 正异常 (1.08~1.57)。

在微量元素方面,永清花岗闪长岩具有明显的 Nb 和 Ta 负异常、较低的 Ti 负异常,以及弱微的 Hf 正异常(图 6b)。所有样品的 Sr 含量高 ($486 \times 10^{-6} \sim 726 \times 10^{-6}$) 但并不显示为强烈的正异常, Y 含量低 ($4.30 \times 10^{-6} \sim 9.30 \times 10^{-6}$),其 Sr/Y 比值 (73.3~133) 相应较高且变化较大。

表 1 永清花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data for Yongqing granodiorite

分析 点号	$w_B/10^{-6}$		同位素比值				年龄/Ma								
	Pb	U	Th	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$					
				1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ				
1	61	1465	408	0.04240	0.00033	0.3023	0.0049	0.05171	0.00077	267.7	2.1	268.2	4.4	272.6	34.1
2	38	936	171	0.04220	0.00027	0.3023	0.0051	0.05196	0.00082	266.4	1.7	268.2	4.5	283.7	36.0
3	34	820	225	0.04220	0.00029	0.3021	0.0062	0.05192	0.00101	266.4	1.8	268.0	5.5	281.8	44.4
4	27	670	114	0.04214	0.00027	0.3046	0.0042	0.05242	0.00066	266.1	1.7	270.0	3.7	303.7	28.9
5	53	1261	350	0.04247	0.00025	0.3022	0.0037	0.05161	0.00059	268.1	1.6	268.1	3.2	268.0	26.3
6	69	1691	363	0.04255	0.00023	0.3013	0.0044	0.05137	0.00071	268.6	1.5	267.4	3.9	257.3	31.9
7	50	1228	317	0.04225	0.00024	0.3072	0.0051	0.05273	0.00083	266.8	1.5	272.0	4.5	317.3	35.7
8	43	1062	217	0.04225	0.00023	0.3004	0.0047	0.05156	0.00078	266.8	1.5	266.7	4.1	266.1	34.7
9	43	1051	220	0.04242	0.00024	0.3041	0.0040	0.05198	0.00065	267.8	1.5	269.6	3.5	284.7	28.7
10	48	1183	262	0.04198	0.00024	0.2971	0.0040	0.05134	0.00066	265.1	1.5	264.1	3.6	255.9	29.5
11	42	1032	291	0.04167	0.00023	0.2977	0.0045	0.05182	0.00075	263.1	1.4	264.6	4.0	277.4	33.2
12	37	903	215	0.04206	0.00023	0.3019	0.0038	0.05206	0.00063	265.6	1.4	267.9	3.3	288.0	27.5
13	51	1253	279	0.04177	0.00023	0.2959	0.0042	0.05138	0.00071	263.8	1.4	263.2	3.8	257.7	31.7
14	34	848	119	0.04167	0.00023	0.3016	0.0046	0.05249	0.00078	263.2	1.5	267.6	4.1	306.8	33.7
15	35	867	246	0.04170	0.00024	0.2955	0.0061	0.05139	0.00105	263.4	1.5	262.9	5.4	258.4	46.9
16	30	732	204	0.04155	0.00024	0.2960	0.0038	0.05167	0.00064	262.4	1.5	263.3	3.4	270.8	28.3
17	41	1026	227	0.04152	0.00031	0.2964	0.0100	0.05178	0.00123	262.2	2.0	263.6	8.9	275.7	54.3
18	47	1161	345	0.04143	0.00023	0.3008	0.0054	0.05266	0.00086	261.7	1.5	267.0	4.8	314.1	37.1
19	37	981	53	0.04141	0.00024	0.2959	0.0053	0.05183	0.00075	261.5	1.5	263.2	4.7	277.9	33.1
20	56	1406	411	0.04152	0.00024	0.2963	0.0068	0.05175	0.00098	262.3	1.5	263.5	6.1	274.3	43.4
21	29	738	151	0.04159	0.00025	0.2954	0.0069	0.05152	0.00091	262.7	1.6	262.8	6.1	264.2	40.3
22	38	963	226	0.04159	0.00026	0.2931	0.0077	0.05112	0.00098	262.7	1.6	261.0	6.9	246.4	44.0
23	35	904	166	0.04170	0.00026	0.2979	0.0087	0.05181	0.00106	263.4	1.6	264.7	7.7	276.8	47.0
24	44	1106	235	0.04201	0.00028	0.3012	0.0098	0.05200	0.00119	265.3	1.7	267.4	8.7	285.6	52.2
25	31	792	143	0.04119	0.00029	0.2999	0.0108	0.05281	0.00130	260.2	1.8	266.3	9.6	320.8	56.0
26	29	741	146	0.04179	0.00026	0.3049	0.0094	0.05292	0.00125	263.9	1.7	270.2	8.3	325.3	53.8
27	23	589	101	0.04224	0.00025	0.3044	0.0075	0.05228	0.00098	266.7	1.6	269.9	6.7	297.5	43.0
28	46	1156	210	0.04221	0.00024	0.2981	0.0072	0.05122	0.00105	266.5	1.5	264.9	6.4	250.8	47.3
29	38	958	173	0.04198	0.00024	0.3035	0.0057	0.05244	0.00085	265.1	1.5	269.2	5.1	304.6	36.8
30	38	948	209	0.04245	0.00024	0.3030	0.0056	0.05178	0.00088	268.0	1.5	268.8	5.0	275.5	39.0
31	37	920	184	0.04212	0.00023	0.2952	0.0046	0.05048	0.00076	266.0	1.5	261.1	4.1	217.4	34.7
32	33	814	189	0.04230	0.00023	0.3015	0.0046	0.05169	0.00076	267.1	1.5	267.6	4.1	271.9	33.6

表 2 永清花岗闪长岩主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)地球化学特征Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) concentrations of Yongqing granodiorite

样号	12YQ01	12YQ02	12YQ03	12YQ04	12YQ05	12YQ06	12YQ07	12YQ08	12YQ10
SiO ₂	66.22	65.81	67.06	65.89	66.97	65.74	66.13	70.25	67.41
TiO ₂	0.48	0.53	0.46	0.53	0.53	0.56	0.49	0.36	0.46
Al ₂ O ₃	17.02	16.79	16.41	17.00	16.65	17.14	16.80	15.48	16.74
Fe ₂ O ₃ ^T	3.13	3.40	3.11	3.07	2.97	3.09	3.14	2.22	2.76
MgO	1.01	1.15	1.01	1.02	0.97	1.05	1.03	0.70	0.90
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03
CaO	3.46	3.59	3.20	3.57	3.42	3.54	3.47	2.90	3.43
Na ₂ O	3.85	3.59	3.55	3.66	3.53	3.66	3.68	3.55	3.76
K ₂ O	2.96	3.06	3.30	3.07	3.00	2.93	3.18	2.49	2.69
P ₂ O ₅	0.14	0.16	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.10	0.13
烧失量	1.40	1.60	1.40	1.70	1.50	1.80	1.60	1.80	1.40
总量	99.75	99.73	99.72	99.71	99.71	99.71	99.73	99.82	99.72
Sc	4	5	4	4	4	5	4	2	3
V	23	24	22	20	18	23	20	15	18
Co	3.2	4.2	3.6	4	3.3	3.5	4.1	2.1	3
Ni	1.5	1.5	1.1	1.4	1.6	1.1	1.3	1.0	1.4
Cu	0.4	0.5	0.5	0.1	7.8	0.2	0.5	<0.1	0.7
Zn	77	87	79	78	70	73	79	53	73
Ga	20.5	21.7	18.6	19.3	17.8	20.1	19.2	17.2	21.1
Rb	83.5	83.7	90.8	67.6	61.3	65.9	85.8	66.3	77.4
Sr	638	644	611	682	645	673	641	486	726
Y	4.8	5.3	5.4	9.3	8.3	8.0	4.9	4.3	5.9
Zr	196	199	188	203	92	202	196	140	188
Nb	2.6	4.2	3.5	4.6	5.6	4.6	3.9	7.1	7.4
Cs	2.3	2.6	1.9	1.2	1.7	1.2	2.8	2.3	2.2
Ba	1013	1107	1323	1253	1348	1311	1180	736	1221
La	37.2	50.3	45.2	37.9	41.2	48.0	48.9	41.4	30.7
Ce	71.3	99.3	85.7	75.6	82.2	92.5	95.8	80.4	58.3
Pr	7.43	10.3	9.25	8.53	9.18	10.3	10.0	8.98	6.52
Nd	27.4	38.8	29.2	35.0	34.5	37.9	35.1	31.3	24.3
Sm	3.06	4.72	4.07	4.18	4.55	5.3	4.27	4.57	4.45
Eu	1.19	1.36	1.28	1.31	1.42	1.53	1.34	1.24	1.52
Gd	1.74	2.08	2.09	2.49	2.98	3.06	2.09	2.65	2.83
Tb	0.15	0.18	0.18	0.27	0.29	0.31	0.18	0.27	0.29
Dy	0.51	0.69	0.69	1.38	1.62	1.48	0.73	1.01	1.50
Ho	0.12	0.11	0.15	0.21	0.22	0.25	0.13	0.14	0.17
Er	0.37	0.31	0.37	0.55	0.62	0.65	0.25	0.40	0.47
Tm	0.05	0.06	0.06	0.12	0.11	0.11	0.06	0.03	0.07
Yb	0.42	0.50	0.62	0.87	1.27	0.77	0.57	0.24	0.44
Lu	0.08	0.10	0.10	0.13	0.17	0.12	0.11	0.05	0.05
Hf	6.6	5.7	5.7	5.3	5.9	6.1	5.8	3.9	5.3
Ta	0.1	0.2	0.3	0.3	0.6	0.3	0.1	0.2	0.3
W	0.6	0.9	0.6	0.6	0.8	0.9	<0.5	0.5	<0.5
Pb	5.3	6.8	6.1	5.9	5.2	5.4	6.0	4.6	3.5
Th	7.6	11.1	9.0	7.5	8.2	9.1	9.8	7.3	5.3
U	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.3	0.9	0.6	0.7

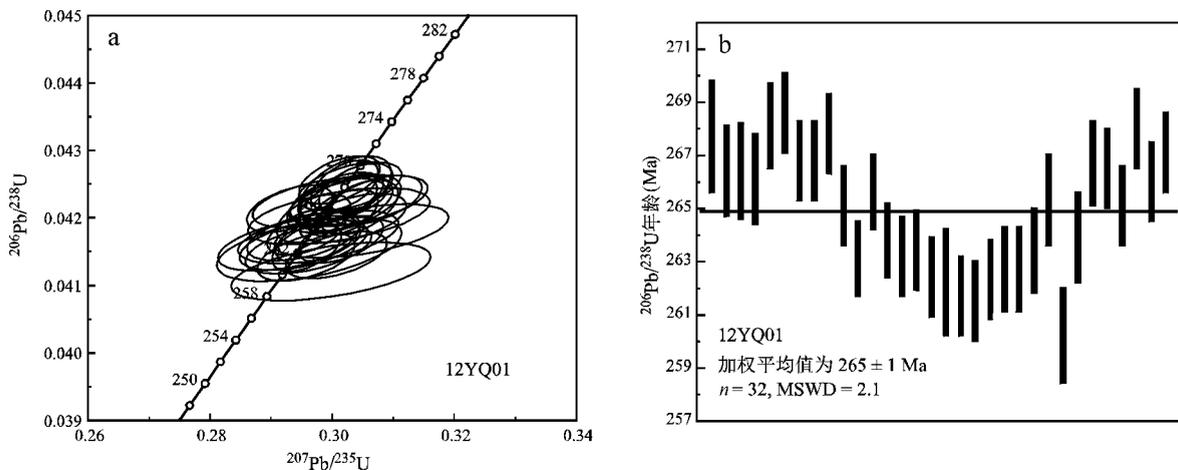


图 4 永清花岗闪长岩的锆石 U-Pb 谐和图 (a) 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均统计图 (b)

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons from Yongqing granodiorite (a) and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (b)

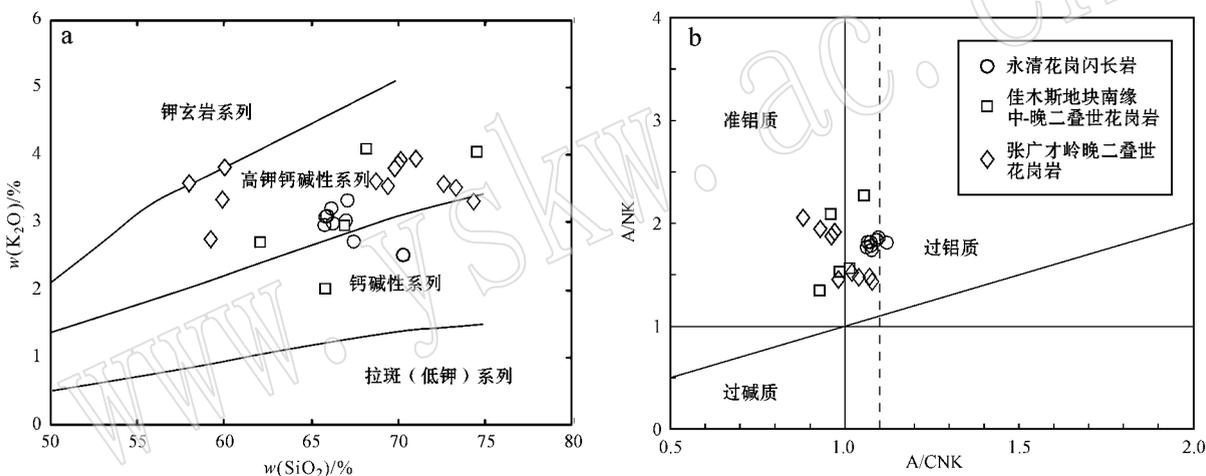


图 5 永清花岗闪长岩的 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 和 $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ (b, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 图解

Fig. 5 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ (b, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams for Yongqing granodiorite

5 讨论

锆石 U-Th-Pb 分析结果显示,永清花岗闪长岩的形成时代为 $265 \pm 1 \text{ Ma}$, 相当于中二叠世, 而不是原来认为的元古宙和早古生代 (e.g., Wilde *et al.*, 2000, 2001; Wu *et al.*, 2011)。这一结果表明佳木斯地块中部这些早期被认为形成于元古宙的岩体, 其形成时代不完全是新近所认识的早古生代, 其中可能还含有一些晚古生代岩浆活动的产物。

5.1 岩浆源区特征

尽管永清花岗闪长岩的形成时代与佳木斯地块

南缘的美作、青山、楚山、柴河和石场岩体以及松嫩地块东部张广才岭的黄旗沟、小北湖和砬砬沟等岩体 (图 1) 的形成时代相近 (吴福元等, 2001; 黄映聪等, 2008; Yu *et al.*, 2013), 但是永清花岗闪长岩具有与这些岩体不同的微量元素地球化学特征。

如前所述, 永清花岗闪长岩显示了较高的 Sm/Dy 值的特点。并且, Sm/Dy 值和 Dy 含量呈负相关 (图 7a)。前人研究表明, 在花岗质岩浆演化过程中, 主要造岩矿物如角闪石、黑云母、斜长石、钾长石和石英等的分离结晶均不会造成 Sm 和 Dy 的明显分异, 但磷灰石、锆石等副矿物可以造成 Sm 和 Dy 一定程度的分异。然而, P_2O_5 和 Zr 等含量与 Sm/Dy

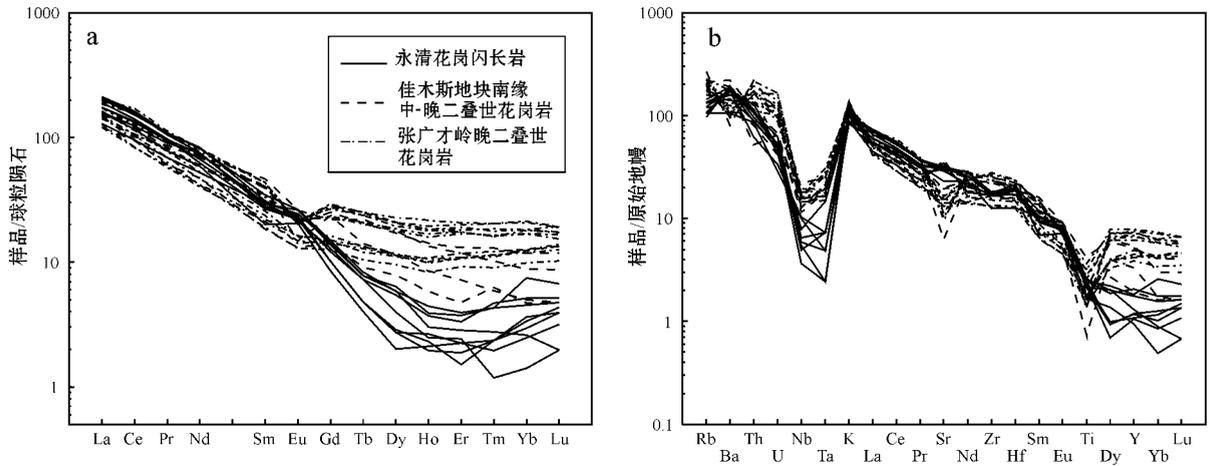


图 6 微量元素原始地幔标准化图解 (a) 和稀土元素球粒陨石标准化 (b) 图解 (原始地幔和球粒陨石数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle normalized trace elements (a) and chondrite normalized REE (b) patterns for Yongqing granodiorite (primitive mantle and chondrite values are from Sun and McDonough, 1989)

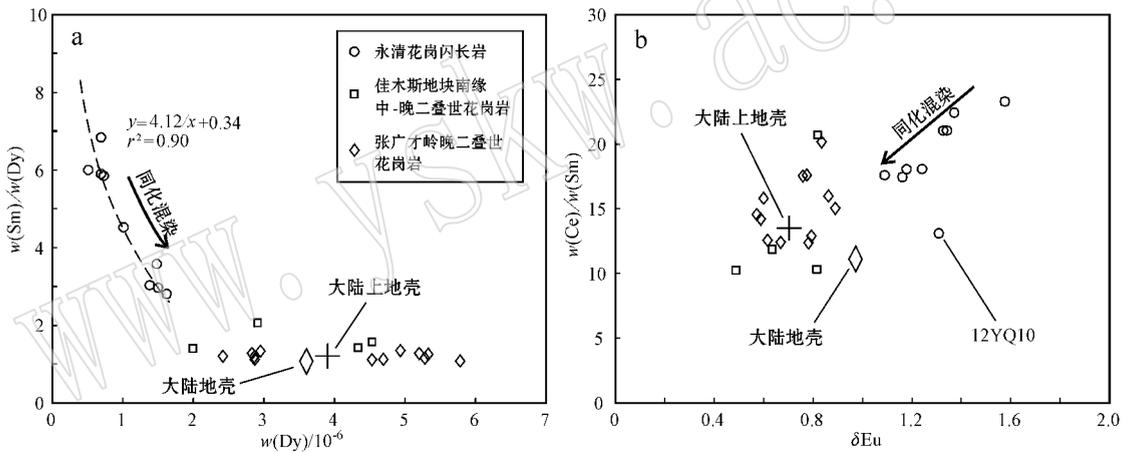


图 7 永清花岗闪长岩中 Sm/Dy - Dy (a) 和 Ce/Sm - δ Eu (b) 图解

Fig. 7 Sm/Dy - Dy (a) and Ce/Sm - δ Eu (b) diagrams of Yongqing granodiorite

佳木斯地块南缘中晚二叠世花岗岩数据来自吴福元等 (2001) 和黄映聪等 (2008); 张广才岭晚二叠世花岗岩数据来自 Yu 等 (2013); 大陆地壳和大陆上地壳数据来自 Rudnick 和 Gao (2003)

Middle-Late Permian granites from southern Jiamusi massif are from Wu Fuyuan *et al.* (2001) and Huang Yingcong *et al.* (2008);

Late Permian granites from the Zhangguangcai Mountain are from Yu *et al.* (2013); Continental crust and upper continental crust values are from Rudnick and Gao (2003)

值不相关,说明岩浆演化过程中副矿物的分异不是造成永清花岗闪长岩具有高 Sm/Dy 值的原因。这一结果与在岩石学观察到的永清花岗闪长岩中这些副矿物含量较少相一致。永清花岗闪长岩不同样品中 Sm 含量无较大差异,并且与大陆上地壳 (e. g., Condie, 1993; Taylor and McLennan, 1995; Rudnick and Gao, 2003) 中含量相近,但 Dy 含量变化较大,而且显著低于大陆上地壳 (Taylor and McLennan,

1995; Rudnick and Gao, 2003) 中的含量。因此,永清花岗闪长岩中 Sm/Dy 值和 Dy 含量呈显著负相关可能与岩浆侵位演化过程中与围岩不同程度的同化混染作用有关。此外,在永清花岗闪长岩中,除 12YQ10 外其它样品的 Ce/Sm 比值与 Eu 异常呈正相关 (图 7b),所有样品的 Sr/Y 值与 Y 含量呈负相关 (图 8a)。这些都进一步表明永清花岗闪长岩可能同化或者受到了具有弱 Eu 负异常、低 Ce/Sm 和 Sr/Y

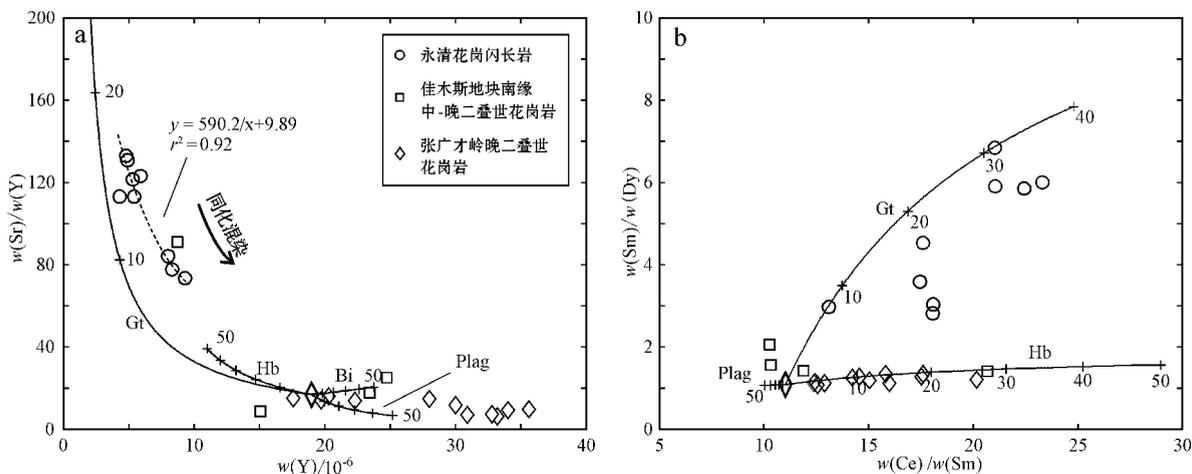


图 8 永清花岗闪长岩 Sr/Y - Y (a) 和 Sm/Dy - Ce/Sm (b) 图解

Fig. 8 Variation diagrams for Sr/Y versus Y (a) and Sm/Dy versus Ce/Sm (b) for Yongqing granodiorite

采用批式熔融模型 根据英安质熔体中矿物/熔体分配系数(表 3)计算不同矿物平衡熔体的成分,计算所用的初始成分(Sr、Y、Ce、Sm 和 Dy 分别为 320×10^{-6} 、 19×10^{-6} 、 43×10^{-6} 、 3.9×10^{-6} 和 3.6×10^{-6})采用大陆地壳的组成(Rudnick and Gao, 2003);平衡熔体成分曲线上代表矿物百分含量的刻度之间的间隔是 10;Bi—黑云母;Bt—石榴子石;Hb—角闪石;Plag—斜长石

Compositions of equilibrium melt with minerals are calculated with mineral/melt partition coefficients for dacitic melts(Table 3), using batch melting equation. Composition of the initial material(Sr , Y , Ce , Sm and Dy are 320×10^{-6} , 19×10^{-6} , 43×10^{-6} , 3.9×10^{-6} and 3.6×10^{-6} , respectively) is the same as that of the continental crust(Rudnick and Gao , 2003). The cross-markers on the curve of the equilibrium melt represent the mineral proportions , and all their intervals are 10. Mineral abbreviations : Bi—biotite , Gt—garnet , Hb—hornblende , Plag—plagioclase

值以及高 Y 含量的大陆地壳或上地壳围岩(Condie , 1993 ; Taylor and McLennan , 1995 ; Rudnick and Gao , 2003)的混染。

考虑到同化混染作用的影响,永清花岗闪长岩母岩浆应当具有较高的 Sr/Y、Ce/Sm 和 Sm/Dy 比值与较低的 Y 含量,明显不同于佳木斯地块南部(吴福元等, 2001; 黄映聪等, 2008)和张广才岭(Yu *et al.* , 2013)同期的花岗岩。这些不同岩体地球化学特征的差异可能是其母岩浆分别形成时源区地球化学特征、部分熔融程度或残余矿物组成的不同所造成的。尽管一些研究估计大陆下地壳可能具有较高的 Sr/Y(~ 80)(Weaver and Tarney , 1984),一方面这仍远低于永清花岗闪长岩母岩浆的 Sr/Y 值(> 130),另一方面大多数研究认为大陆下地壳 Sr/Y 值应较低(15 ~ 20),与大陆地壳平均组成相似(e. g. , Condie , 1993 ; Taylor and McLennan , 1995 ; Rudnick and Gao , 2003 ; Moyen , 2009)。因而,永清花岗闪长岩与邻区同期侵入岩地球化学特征的差异可能是源区矿物组成不同或部分熔融程度不同所造成的。根据英安岩(花岗闪长岩)熔体中不同矿物与熔体的分配系数(表 3),不同含量的斜长石、黑云母和角闪石均不会造成平衡熔体具有较高的 Sr/Y 值,而石榴

子石的含量可以显著影响平衡熔体中的 Sr/Y 值(图 8a)。此外,尽管较高含量的角闪石可以使平衡熔体具有较高的 Ce/Sm 值,但其对 Sm/Dy 值影响很小(图 8b),而石榴子石含量与其平衡熔体中 Sm/Dy 值呈明显正相关(图 8b)。这些不同矿物平衡熔体的地球化学特征表明,永清花岗闪长岩与邻区同期侵入岩在地球化学特征上的差异可能主要是由于其源区中存在石榴子石。

研究表明,不同岩石类型中石榴子石稳定域的压力有所不同。在交代的地幔橄榄岩中,石榴子石出现时压力一般大于 2.5 GPa(Rapp *et al.* , 2000 , 2007),在镁铁质岩石中,其可以在 1.0 ~ 1.2 GPa 时

表 3 英安质熔体中矿物-熔体分配系数

Table 3 Mineral/melt partition coefficients for dacitic melts

矿物	Sr	Y	Ce	Sm	Dy
角闪石	0.49 ^a	2.46 ^a	0.899 ^b	3.99 ^b	6.2 ^b
黑云母	0.31 ^c	0.6 ^c	0.037 ^d	0.058 ^d	0.097 ^d
斜长石	2.84 ^e	0.51 ^c	0.251 ^f	0.136 6 ^f	0.111 6 ^f
石榴子石	0.015 4 ^e	35 ^b	0.35 ^b	2.66 ^b	28.6 ^b

数据来源: a. Sisson (1994); b. Arth (1976); c. Ewart 和 Griffin (1994); d. Schnetzler 和 Philpotts (1970); e. Philpotts 和 Schnetzler (1970); f. Fujimaki 等(1984)。

出现 (Martin *et al.*, 2005; Moyen, 2009), 而在安山质岩石中可以在压力为 0.8 GPa 时出现 (e. g., Müntener *et al.*, 2008; Alonso-Perez *et al.*, 2009)。因而, 如果永清花岗闪长岩的源区组成类似于安山质或者镁铁质组分含量更高, 其源区深度可能大于 25 km (约相当于 0.8 GPa 的压力)。

5.2 构造环境

上世纪 90 年代以前, 佳木斯地块及邻区的花岗质侵入岩均被认为形成于古元古代甚至太古宙 (孙白云, 1983; 李之彤等, 1987; 黑龙江省地质矿产局, 1993)。位于佳木斯地块南缘的楚山 (256 ± 5 Ma)、柴河 (254 ± 5 Ma)、青山 (270 ± 4 Ma) 和石场岩体 (267 ± 2 Ma) 是佳木斯地块及邻区最早被识别出的一些晚古生代侵入岩 (宋彪等, 1994; 李锦轶等, 1999; 吴福元等, 2001)。这些侵入岩均表现出火山弧型花岗岩的特点, 且主要分布于佳木斯地块南缘, 因此在当时推测这些中晚二叠世花岗岩可能形成一个向东俯冲的构造背景 (吴福元等, 2001)。众所周知, 花岗岩往往是源区性质与岩浆演化过程的综合结果, 在缺少地质制约的情况下, 根据岩石地球化学特征判别构造环境是极为困难的事 (韩宝福等, 2007)。因而, 佳木斯地块南缘中晚二叠世花岗岩的地球化学特征并不能作为确定这些侵入岩与俯冲相关的充分条件。

不断深入的研究逐渐揭示出中晚二叠世侵入岩不但佳木斯地块西缘有所出露, 而且在张广才岭 (魏红艳等, 2012; Yu *et al.*, 2013) 和佳木斯地块东南的兴凯地块 (杨浩等, 2012) 同样发育 (图 1b)。尤其是永清花岗闪长岩的发现, 暗示佳木斯地块内部同样存在这一时期的岩浆侵入活动。这些中晚二叠世侵入岩在空间分布上不受佳木斯地块东西边界构造单元的严格控制 (吴福元等, 2001; Wu *et al.*, 2007; 黄映聪等, 2008; 魏红艳等, 2012; 杨浩等, 2012; Cui *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2013)。如果这些中晚二叠世侵入岩形成于同一构造背景, 它们可能并不支持佳木斯地块与松嫩地块或兴凯地块之间的大洋板块向佳木斯地块俯冲的构造模式。

尽管关于松嫩地块与佳木斯地块的聚合时限长期以来有多种不同的认识 (李锦轶等, 1999; Wu *et al.*, 2007; 颜炳强等, 2008; 李旭平等, 2010; 许文良等, 2012; Xu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2012; 邵济安等, 2013), 大多数研究均认同松嫩地块与佳木斯地块在中志留世已经完成初步聚合 (颜炳

强等, 2008; Wang *et al.*, 2012)。位于佳木斯地块西缘的黑龙江杂岩具有类似蛇绿岩层序的特征, 长期以来被作为佳木斯地块与松嫩地块缝合的标志 (张兴洲等, 1991; 李锦轶等, 1999; 张兴洲等, 2006; Wu *et al.*, 2007; 颜炳强等, 2008; 李旭平等, 2010)。牡丹江、依兰-桦南和萝北 3 个黑龙江群出露区的变质岩中均存在早古生代、二叠纪和晚三叠世到早中侏罗世变质事件的记录 (Wu *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009; 李旭平等, 2009, 2010), 其中二叠纪变质事件在一些研究中也作为佳木斯地块和松嫩地块之间洋壳俯冲、拼贴和碰撞作用的证据 (李旭平等, 2010)。然而牡丹江地区斜长角闪片岩的研究表明, 黑龙江群中的超基性岩可能形成于新元古代, 并受到了早古生代变质作用的影响 (颜炳强等, 2008)。这一地区一些晚古生代—中生代火山岩的研究结果表明, 黑龙江群杂岩中广泛发现的晚三叠世到早中侏罗世变质年龄可能是这两个地块在早中生代再次裂解后聚合过程的反映 (许文良等, 2012; Xu *et al.*, 2013)。尽管黑龙江群二叠纪变质事件的意义还不明确, 但以上研究结果表明从形成时代上来看, 佳木斯地块及邻区中晚二叠世侵入岩应当是松嫩地块与佳木斯地块之间大洋闭合之后的产物。

佳木斯地块东南缘 (孟恩等, 2008; Meng *et al.*, 2008) 出露的一些二叠纪火山岩的研究表明, 早二叠世佳木斯地块东南缘相当于活动大陆边缘, 而随后该地区出现的中二叠世中酸性火山岩则反映了佳木斯地块与兴凯地块之间古亚洲洋的消失和两陆块的碰撞拼合。因而佳木斯地块及邻区中晚二叠世侵入岩形成时, 佳木斯地块与兴凯地块之间的大洋同样应该已经闭合。

大量的研究结果表明, 佳木斯地块与华北板块之间古亚洲洋最终闭合可能发生在晚二叠世晚期—早三叠世 (孙德有等, 2005; Li, 2006; 李锦轶等, 2007; Cao *et al.*, 2013)。佳木斯南缘西侧张广才岭一些早二叠世火山岩呈现出双峰式的特点, 被认为与古亚洲洋板块向松嫩—张广才岭和佳木斯地块之下的俯冲相关, 该地区当时的构造环境类似于弧后盆地 (Meng *et al.*, 2011)。因此, 尽管以永清岩体为代表的一些佳木斯地块及邻区的中晚二叠世侵入岩的侵位形成与古亚洲洋的俯冲消减在时间上有所重合, 但它们相对于张广才岭南部的火山岩距离古亚洲洋俯冲带更远, 因而它们与古亚洲洋俯冲过程

的联系可能微乎其微。

由上可见,佳木斯地块及邻区中晚二叠世侵入岩可能与古亚洲洋向松嫩地块-佳木斯地块之下的俯冲无关,而形成于佳木斯地块和松嫩地块及兴凯地块之间大洋板块闭合之后,可能是这些地块碰撞过程或者碰撞后的产物。

6 结论

对佳木斯地块上的永清花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素和岩石地球化学分析研究,结合区域研究资料,可以得到以下认识:

(1) 永清花岗闪长岩形成于中二叠世(265 ± 1 Ma),表明在佳木斯地块内部存在中二叠世的岩浆活动。

(2) 在岩体形成侵位过程中,岩浆与围岩的同化混染作用对永清花岗闪长岩的地球化学特征具有一定程度的影响。其源区中可能存在石榴子石,源区深度可能大于 25 km,而邻区同期侵入岩的源区深度相对较浅。

(3) 佳木斯地块及邻区中晚二叠世侵入岩可能与古亚洲洋向松嫩地块-佳木斯地块之下的俯冲无关,而可能是佳木斯地块和松嫩地块及兴凯地块碰撞过程或者碰撞后的产物。

致谢 天津地质矿产研究所耿建珍在 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析中给予的帮助和支持,匿名评审人和吉林大学许文良教授对本文的初稿提出了宝贵的修改意见,使本文得以完善,在此表示由衷的感谢!

References

- Alonso-Perez R, Müntener O and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: experimental constraints on andesitic liquids[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 157: 541~558.
- Arth J G. 1976. Behaviour of trace element during magmatic processes - a summary of theoretical models and their applications[J]. *J. Res. U.S. Geol. Surv.*, 4: 41~47.
- Cao H H, Xu W L, Pei F P, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block[J]. *Lithos*, 170~171: 191~207.
- Cao Xi, Dang Zengxin, Zhang Xingzhou, *et al.* 1992. Jiamusi Composite Terranes[M]. Changchun: Jilin Publishing House of Science and Technology, 1~221 (in Chinese with English and Russian abstract).
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales[J]. *Chem. Geol.*, 104: 1~37.
- Cui P L, Sun J G, Han S J, *et al.* 2013. Zircon U-Pb-Hf isotopes and bulk-rock geochemistry of gneissic granites in the northern Jiamusi Massif, Central Asian Orogenic Belt: implications for Middle Permian collisional orogeny and Mesoproterozoic crustal evolution[J]. *Inter. Geol. Rev.*, 55: 1109~1125.
- Dang Yansong and Li Derong. 1993. Discussion on isotope geochronology of Precambrian Jiamusi Block[J]. *J. Changchun Univ. Earth Sci.*, 23: 312~316 (in Chinese with English abstract).
- Ewart A and Griffin W L. 1994. Application of Proton-microprobe data to trace-element partitioning in volcanic rocks[J]. *Chem. Geol.*, 117: 251~284.
- Fujimaki H, Tatsumoto M and Aoki K I. 1984. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between phenocrysts and groundmasses[J]. *J. Geophys. Res.*, 89: 662~672.
- Han Baofu. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination[J]. *Earth Sci. Front.*, 14: 64~72 (in Chinese with English abstract).
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. 1993. Regional Geology of Heilongjiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 192~210 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yingcong, Ren Donghui, Zhang Xingzhou, *et al.* 2008. Zircon U-Pb dating of the Meizuo granite and geological significance in the Huanan Uplift, east Heilongjiang Province[J]. *J. Changchun Univ. Earth Sci.*, 38: 631~638 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, *et al.* 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 26: 2131~2140 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrol. Sin.*, 23: 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Niu Baogui, Song Biao, *et al.* 1999. Crustal Formation and Evolution of Northern Changbaishan Mountain, Northeast China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adja-

- cent regions : closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. *J. Asian Earth Sci.* , 26 : 207~224.
- Li Xuping , Jiao Lixiang , Zheng Qingdao , *et al.* 2009. U-Pb zircon dating of the Heilongjiang complex at Huanan , Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrol. Sin.* , 25 : 1 909~1 916 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuping , Kong Fanmei , Zheng Qingdao , *et al.* 2010. Geochronological study on the Heilongjiang complex at Luobei area , Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrol. Sin.* , 26 : 2 015~2 024 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhitong and Zhao Chunjing. 1987. On the characteristics and origin of Sinkainian granodiorite body in Chushan Mountain , east Heilongjiang province [J]. *Acta Petrol. Sin.* , 3 : 3~16 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jinglan. 1991. The characteristics of greenstone belt of Jiamusi massif and implication of geological background [J]. *Heilongjiang Geol.* , 2 : 33~48 (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 [J]. *Chem. Geol.* , 257 : 34~43.
- Ludwig K R. 2003. Using Isoplot/Ex Version 2 , a geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley : Berkeley Geochronology Centre Special Publications , 1~47.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.* , 101 : 635~643.
- Martin H , Smithies R H , Rapp R P , *et al.* 2005. An overview of adakite , tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid : relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos* , 79 : 1~24.
- Meng E , Xu W L , Pei F P , *et al.* 2011. Permian bimodal volcanism in the Zhangguangcai Range of eastern Heilongjiang Province , NE China : Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemical evidence [J]. *J. Asian Earth Sci.* , 41 : 119~132.
- Meng E , Xu W L , Yang D B , *et al.* 2008. Chronology of Late Paleozoic volcanism in eastern and southeastern margin of Jiamusi Massif and its tectonic implications [J]. *Chinese Sci. Bull.* , 53 : 1 231~1 245.
- Moyen J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios : The meaning of the " adakitic signature " [J]. *Lithos* , 112 : 556~574.
- Müntener O , Ulmer P and Perez R A. 2008. Role of garnet and amphibole fractionation in the genesis of high Mg[#] granitoids [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 72 : A665~A665.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area , Northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 58 : 63~81.
- Philpotts J A and Schnetzler C. 1970. Phenocryst-matrix partition coefficients for K , Rb , Sr and Ba , with applications to anorthosite and basalt genesis [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 34 : 307~322.
- Rapp R , Shimizu N , Norman M D , *et al.* 2000. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge : experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chem. Geol.* , 160 : 335~356.
- Rapp R , Yaxley G , Norman M D , *et al.* 2007. Comprehensive trace element characteristics of experimental TTG and sanukitoid melts [A]. Sixth International Hutton Conference on the Origin of Granitic Rocks , Stellenbosch , South Africa [C].
- Ren Liudong , Wang Yanbin , Yang Chonghui , *et al.* 2010. Metamorphism , migmatization and granites of the Mashan Complex in Heilongjiang Province , Northeast China [J]. *Acta Petrol. Sin.* , 26 : 2005~2014 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust [A]. Rudnick R L. *The Crust* [C]. Oxford : Elsevier-Pergamon , 1~64.
- Schnetzler C C and Philpotts J A. 1970. Partition coefficients of rare-earth elements between igneous matrix material and rock-forming mineral phenocrysts II [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 34 : 331~340.
- Shao Ji'an , Li Yongfei and Tang Kedong. 2013. Restoration of the orogenic processes of Zhangguangcai Range [J]. *Acta Petrol. Sin.* , 29 : 2 959~2 970 (in Chinese with English abstract).
- Sisson T W. 1994. Hornblende-Melt Trace-Element Partitioning Measured by Ion Microprobe [J]. *Chem. Geol.* , 117 : 331~344.
- Song Biao , Li Jinyi , Niu Baogui , *et al.* 1997. Single grain zircon ages and its implications in biotite-plagioclase gneiss in Mashan Group in the eastern Heilongjiang [J]. *Acta Geosci. Sin.* , 18 : 306~312 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao , Niu Baogui , Li Jinyi , *et al.* 1994. Isotope geochronology of granitoids in Mudanjiang-Jixi area [J]. *Acta Petrol. Mineral.* , 13 : 204~213 (in Chinese with English abstract).
- Sun Baiyun. 1983. On the origin of Precambrian granodiorite and granite bodies in Boli-Mudanjiang area , southeastern Heilongjiang province [J]. *Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resource , Chinese Academy of Geological Sciences* , (6) : 68~78 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Gao Shan , *et al.* 2005. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province , and their constraints on the structural pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang area , China [J]. *Earth Sci. Front.* , 12 : 263~275 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Zhang Yanbin , *et al.* 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone - evidence from the Dayushan granitic pluton , Jilin Province [J]. *J. Changchun Univ. Earth Sci.* , 34 : 174~181 (in Chinese with English abstract).

- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Rev. Geophys.*, 33: 241~265.
- Wang F, Xu W L, Meng E, *et al.* 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 49: 234~248.
- Weaver B L and Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust [J]. *Nature*, 310: 575~577.
- Wei Hongyan, Sun Deyou, Ye Songqing, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages and its geological significance of the granitic rocks in the Yichun-Hegang region, southeastern Xiao Hinggan Mountains [J]. *Earth Sci.*, 37 (supp.): 50~59 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Dorsett-Bain H L and Lennon R G. 1999. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi Massif: A exotic fragment of Gondwanaland located in North-Eastern China? [J]. *Gondwana Res.*, 2: 21~46.
- Wilde S A, Wu Fuyuan and Zhang Xingzhou. 2001. The Mashan Complex: SHRIMP U-Pb zircon evidence for a Late Pan-African metamorphic event in NE China and its implication for global continental reconstruction [J]. *Geochimica*, 30: 35~50 (in Chinese with English abstract).
- Wilde S A, Wu F Y and Zhang X Z. 2003. Late Pan-African magmatism in Northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence for igneous ages from the Mashan Complex [J]. *Precambrian Res.*, 122: 311~327.
- Wilde S A, Zhang X Z and Wu F Y. 2000. Extension of a newly identified 500 Ma metamorphic terrain in North East China: further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan Complex, Heilongjiang Province, China [J]. *Tectonophysics*, 328: 115~130.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (1): geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 66: 241~273.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 41: 1~30.
- Wu Fuyuan, Wilde S A and Sun Deyou. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi massif, northern China [J]. *Acta Petrol. Sin.*, 17: 433~452 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang J H, Lo C H, *et al.* 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. *Island Arc*, 16: 156~172.
- Xie Hangqiang, Zhang Fuqin, Miao Licheng, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the amphibole from "Heilongjiang Group" and the granite in Mudanjiang area, NE China, and its geological significance [J]. *Acta Petrol. Sin.*, 24: 1237~1250 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Pei F P, Wang F, *et al.* 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 74: 167~193.
- Xu Wenliang, Wang Feng, Meng En, *et al.* 2012. Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from igneous rock association and U-Pb geochronology of detrital zircons [J]. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)*, 42: 1378~1389 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hao, Zhang Yanlong, Chen Huijun, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages of Khanka Lake granitic complex and its geological implication [J]. *Glob. Geol.*, 31: 621~630 (in Chinese with English abstract).
- Yu J J, Wang F, Xu W L, *et al.* 2013. Late Permian tectonic evolution at the southeastern margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Constraints from geochronology and geochemistry of granitoid [J]. *Gondwana Res.*, 24: 635~647.
- Zhang Xingzhou, Yang Baojun, Wu Fuyuan, *et al.* 2006. The lithosphere structure in Xingmeng-Jihe region, northeastern China [J]. *Geol. China*, 33: 816~823 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xingzhou and Zhang Yuanhou. 1991. Coexistence of blueschist with greenschist: New evidence for tectonic evolution of the Heilongjiang suites [J]. *J. Changchun Univ. Earth Sci.*, 21: 277~282 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, *et al.* 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt [J]. *Tectonophysics*, 478: 230~246.

附中文参考文献

- 曹 熹, 党增欣, 张兴洲, 等. 1992. 佳木斯复合地体 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 党延松, 李德荣. 1993. 关于佳木斯地块前寒武纪同位素地质年代学问题的讨论 [J]. *长春地质学院学报*, 23: 312~316.
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性 [J]. *地学前缘*, 14: 64~72.
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 192~210.

- 黄映聪,任东辉,张兴洲,等. 2008. 黑龙江省东部桦南隆起美作花岗岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38: 631~638.
- 颜炳强,张福勤,苗来成,等. 2008. 东北牡丹江地区“黑龙江群”中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质学意义[J]. 岩石学报, 24: 1 237~1 250.
- 李怀坤,朱士兴,相振群,等. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 26: 2 131~2 140.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 23: 565~582.
- 李锦轶,牛宝贵,宋 彪,等. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化[M]. 北京:地质出版社.
- 李旭平,焦丽香,郑庆道,等. 2009. 黑龙江桦南地区黑龙江杂岩锆石 U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 25: 1 909~1 916.
- 李旭平,孔凡梅,郑庆道,等. 2010. 黑龙江萝北地区黑龙江杂岩年代学研究[J]. 岩石学报, 26: 2 015~2 024.
- 李之彤,赵春荆. 1987. 黑龙江省东部楚山兴凯期花岗闪长岩体的特征和成因[J]. 岩石学报, 3: 3~16.
- 刘静兰. 1991. 佳木斯中间地块绿岩带特征及其大地构造环境浅析[J]. 黑龙江地质, 2: 33~48.
- 孟 恩,许文良,杨德彬,等. 2008. 佳木斯地块东缘及东南缘二叠纪火山作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 科学通报, 53: 956~965.
- 任留东,王彦斌,杨崇辉,等. 2010. 麻山杂岩的变质-混合岩化作用和花岗质岩浆活动[J]. 岩石学报, 26: 2 005~2 014.
- 邵济安,李永飞,唐克东. 2013. 张广才岭造山过程的重构及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 29: 2 959~2 970.
- 宋 彪,李锦轶,牛宝贵,等. 1997. 黑龙江省东部麻山群黑云斜长片麻岩中锆石的年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 18: 306~312.
- 宋 彪,牛宝贵,李锦轶,等. 1994. 牡丹江-鸡西花岗岩类同位素地质年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 13: 204~213.
- 孙白云. 1983. 黑龙江省东南部勃利-牡丹江一带前寒武纪花岗闪长岩及花岗岩体成因探讨[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, (6): 68~78.
- 孙德有,吴福元,高山,等. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. 地质前缘, 12: 263~275.
- 孙德有,吴福元,张艳斌,等. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 174~181.
- 魏红艳,孙德有,叶松青,等. 2012. 小兴安岭东南部伊春-鹤岗地区花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄测定及其地质意义[J]. 地球科学, 37(增刊): 50~59.
- Wilde S A, 吴福元, 张兴洲. 2001. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义[J]. 地球化学, 30: 35~50.
- 吴福元, Wilde S., 孙德有. 2001. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 17: 443~452.
- 许文良,王 枫,孟 恩,等. 2012. 黑龙江省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑岩锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42: 1378~1389.
- 杨 浩,张彦龙,陈会军,等. 2012. 兴凯湖花岗杂岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 31: 621~630.
- 张兴洲,杨宝俊,吴福元,等. 2006. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. 中国地质, 33: 816~823.
- 张兴洲,张元厚. 1991. 蓝片岩与绿片岩共存: 黑龙江岩系构造演化的新证据[J]. 长春地质学院学报, 21: 277~282.